2020-I01-017809

INFORME N° 00248-2020-OEFA/DEAM-STEC

A	:	**FRANCISCO GARCÍA ARAGÓN** Director de Evaluación Ambiental
DE	:	**LÁZARO WALTHER FAJARDO VARGAS** Ejecutivo de la Subdirección Técnica Científica **LUIS ÁNGEL ANCCO PICHUILLA** Coordinador de Evaluaciones Ambientales en Minería y Energía **RICHARD TEODORO JULCA CRUZ** Especialista de Evaluaciones Ambientales
ASUNTO	:	Evaluación ambiental de causalidad en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo, distritos Simón Bolívar, Tinyahuarco, Vicco, provincia y departamento Pasco, en el 2020
CUE	:	2020-01-046
CÓDIGO DE ACCIÓN	:	- 0007-8-2020-412 - 0011-8-2020-412 - 0008-9-2020-412 - 0012-9-2020-412 - 0015-9-2020-412
REFERENCIA	:	Memorando N.° 00670-2020-OEFA/DSEM y Memorando N.° 02242-2020-OEFA/DSEM
FECHA	:	Lima, 27 de diciembre de 2020

Tenemos el agrado de dirigirnos a usted para informarle lo siguiente:

1. INFORMACIÓN GENERAL

Los aspectos generales de la evaluación ambiental de causalidad en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo, distritos Simón Bolívar, Tinyahuarco, Vicco, provincia y departamento Pasco, en el 2020; se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Datos generales de la actividad realizada

a.	Tipo de evaluación	Evaluación ambiental de causalidad
b.	Zona evaluada	Río San Juan y salida de la laguna Alcacocha, río Paria, río sin nombre, quebrada sin nombre 16, quebrada sin nombre 02, río Quicay, río Ragra, río Huaraupampa, río Gashan, quebrada sin nombre 12, río Tinragra, río Blanco y bofedal, ubicados en los distritos Simón Bolívar, Tinyahuarco, Vicco, provincia y departamento Pasco
c.	Unidades fiscalizables o actividades económicas en la zona	Unidad fiscalizable pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo a cargo de las empresas Activos Mineros S.A.C. (antes Centromin Perú S.A), Sociedad Minera El Brocal S.A.A., Empresa Administradora Cerro S.A.C. (antes Volcan Compañía Minera S.A.A) y Compañía Minera Aurífera Aurex S.A.

d.	Problemática identificada	Presunta contaminación del agua, sedimento y suelo por los componentes de cierre de la unidad fiscalizable, afectando al ambiente y la salud de las personas.
e.	La actividad se realizó en el marco de	La DSEM solicita a la DEAM efectuar acciones que amplíen el estudio para determinar la causalidad de las actividades mineras que podrían estar influenciando a los componentes ambientales, mediante: - Memorando N.° 00670-2020-OEFA/DSEM - Memorando N.° 02242-2020-OEFA/DSEM
f.	Periodo de ejecución	Del 5 al 25 de agosto de 2020, del 16 al 26 de agosto de 2020, del 13 al 30 de setiembre de 2020, del 11 al 23 de setiembre de 2020 y del 15 al 21 de setiembre de 2020

Los profesionales que aportaron a este documento se detallan en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Listado de profesionales

N.°	Nombres y apellidos	Profesión	Actividad desarrollada
1	Lázaro Walther Fajardo Vargas	Ingeniero químico	Gabinete
2	Luis Angel Ancco Pichuilla	Ingeniero químico	Gabinete
3	Richard Teodoro Julca Cruz	Ingeniero químico	Gabinete
4	Enoch Matthew Aguirre Alegre	Ingeniero geólogo	Campo y gabinete
5	Fernando Ore Díaz	Ingeniero en recursos naturales renovables	Campo y gabinete
6	Jorge Luis Fernández Najarro	Bachiller en ingeniería ambiental	Campo y gabinete
7	Jorge Luis Peralta Argomeda	Biólogo	Campo y gabinete
8	Vania Rimarachin Ching	Bióloga	Gabinete
9	Ericka Judith Morga Castillanos	Ingeniera en recursos naturales renovables	Campo y gabinete
10	Félix Filio Farfán Amezquita	Biólogo	Campo y gabinete
11	Huber Trinidad Patricio	Biólogo	Campo y gabinete
12	Alex Adonis Cáceres Muña	Biólogo	Campo y gabinete
13	Amanda Cornejo Delgado	Bachiller en ciencias biológicas	Campo y gabinete
14	Rubí Gabriela Lumbreras Huamán	Ingeniera ambiental	Campo
15	Rodolfo Castillo Velásquez	Bachiller en ciencias biológicas	Gabinete

2. DATOS DE LA ACTIVIDAD REALIZADA

Los parámetros y matrices evaluados en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo, se presentan en la Tabla 2.1

Tabla 2.1. Parámetros y matrices evaluadas

Matriz evaluada	Mes	Parámetros evaluados	Cantidad de puntos
Agua superficial	Agosto	pH, T, CE, OD,TSS, cloruros, fluoruros, nitratos, nitritos, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, acidez, metales disueltos, metales totales	54
		DBO, DQO, aceites y grasas, coliformes termotolerantes	15
		Cianuro wad	14
		Cromo VI	5
Agua turbinada	Agosto	pH, T, CE, OD,TSS, cloruros, fluoruros, nitratos, nitritos, sulfatos, cianuro wad, cromo IV, bicarbonatos, carbonatos, acidez, aceites y grasas, metales disueltos, metales totales	1
Agua residual doméstica	Agosto	pH, T, CE, OD,TSS, cloruros, fluoruros, nitratos, nitritos, sulfatos, DBO, DQO, coliformes termotolerantes, cromo VI,	5

		bicarbonatos, carbonatos, acidez, aceites y grasas, metales disueltos, metales totales	
		Cianuro wad, cromo VI	2
Sedimento	Agosto	Metales totales, mercurio total, análisis granulométrico	34
Comunidades hidrobiológicas	Agosto	Perifiton	48
		Macroinvertebrados	48
Suelos	Setiembre	Metales totales, mercurio total	151
		Cianuro libre, cromo VI	23
		Extracción secuencial por Tessier	14
		Balance acido-base modificado (ABA)	7
		Análisis mineralógico por difracción de rayos X, Análisis granulométrico	5
		Análisis mineralógico Microscopía de barrido electrónico	2
Roca	Agosto	Metales totales y mercurio total	47
		Análisis mineralógico por difracción de rayos X	37
		Análisis mineralógico por microscopia electrónica de barrido	19
		Balance acido-base modificado (ABA)	3
		Análisis mineralógico por microscopia óptica	8
	Setiembre	Metales totales y mercurio total, análisis mineralógico por difracción de rayos X, *Shake flask* aniones	6
		Extracción secuencial por Dold, *shake flask* metales, balance acido-base modificado (ABA)	5
		Análisis mineralógico por microscopia electrónica de barrido	4
Residuos mineros	Agosto	Metales totales y mercurio total	8
		Extracción secuencial por Dold, balance acido-base modificado (ABA), análisis mineralógico por difracción de rayos X, , *shake flask* metales, *Shake flask* aniones	2
	Setiembre	Metales totales y mercurio total, extracción secuencial por Dold, análisis mineralógico por difracción de rayos X, Análisis mineralógico por microscopia óptica, balance acido-base modificado (ABA)	1

Los parámetros que superaron la normativa en la evaluación ambiental de causalidad en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo, en el 2020; se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Parámetros que superan la normativa ambiental

Matriz	Cuerpo de agua/cuerpo receptor/localidad/ poblado	Código OEFA	Norma ambiental vigente					
			ECA agua[1]	LMP 010[2]	LMP 003[3]	CEQG sedimento[4]	ECA suelo[5]	CEQG suelo[6]
			Ago-20				Set-20	
Agua superficial	Río San Juan	SJ-35	Mn	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
		RSjua-19	Mn	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
		RSjua-20A	Mn	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
		RSjua-18	Mn	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
		SJ-34	Mn	N.A	N.A	**	N.A	N.A
	Bofedal	BOF-01	--	N.A	N.A	**	N.A	N.A
Agua superficial	Río San Juan	RSjua-17A	Mn	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
		RSjua-17	pH, Mn	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
		RSjua-16	Mn	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
		SJ-33	Mn	N.A	N.A	**	N.A	N.A
Agua superficial	Río Gashan	RBlan-02	--	N.A	N.A	--	N.A	N.A
		RBlan-01	--	N.A	N.A	--	N.A	N.A
Agua superficial	Río San Juan	RSjua-15	Mn	N.A	N.A	**	N.A	N.A
		RSjua-14	Mn, sulfato	N.A	N.A	**	N.A	N.A
		RSjua-13	Mn, sulfato	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
		RSjua-12	Mn, sulfato	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
		RSjua1	Mn	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
		RSjua1A	Mn	N.A	N.A	**	N.A	N.A
		RSjua-09A	Mn, sulfato	N.A	N.A	**	N.A	N.A
Agua superficial	Río Tinragra	SJ-20	--	N.A	N.A	**	N.A	N.A
Agua superficial	Río San Juan	SJ-18A	Mn	N.A	N.A	**	N.A	N.A
		SJ-18	Mn	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
		RSjua-08C	Mn, sulfato, coliformes termotolerantes	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
Agua superficial	Río Gashan	SJ-16	--	N.A	N.A	As, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
		RGash-02	--	N.A	N.A	--	N.A	N.A
		RGash-01	--	N.A	N.A	As, Hg y Pb	N.A	N.A
Agua superficial	Río Huaraupampa	RHuar-05	--	N.A	N.A	As, Hg y Pb	N.A	N.A
		RHuar-04	--	N.A	N.A	As, Hg y Pb	N.A	N.A
		RHuar-03	--	N.A	N.A	**	N.A	N.A
		RHuar-02	pH	N.A	N.A	As, Hg y Pb	N.A	N.A
		RHuar-01	--	N.A	N.A	As	N.A	N.A
Agua superficial	Río San Juan	SJ-17	OD, Mn, sulfatos, coliformes termotolerantes	N.A	N.A	**	N.A	N.A
Agua superficial	Quebrada sin nombre 12	QSnom-12	--	N.A	N.A	Hg	N.A	N.A

Matriz	Cuerpo de agua/cuerpo receptor/localidad/ poblado	Código OEFA	Norma ambiental vigente					
			ECA agua[1]	LMP 010[2]	LMP 003[3]	CEQG sedimento[4]	ECA suelo[5]	CEQG suelo[6]
			Ago-20				Set-20	
Agua superficial	Río San Juan	RSjua-08A	CE, OD, Mn, sulfatos	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
		RSjua-08	CE, OD, Mn, aceites y grasas, DBO5, DQO, sulfatos, coliformes termotolerantes	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
Agua superficial	Quebrada sin nombre 02	QSnom-02	pH	N.A	N.A	As	N.A	N.A
Agua superficial	Río Ragra	SJ-11	OD, aceites y grasas, DBO5, DQO, sulfatos, coliformes termotolerantes, Fe, Mn, Pb, Zn	N.A	N.A	**	N.A	N.A
		SJ-10	CE, DBO5, DQO, coliformes termotolerantes, Fe, Mn, Zn	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
Agua superficial	Río San Juan	SJ-12	Coliformes termotolerantes, Cu, Mn	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
		RSjua-07	--	N.A	N.A	As, Cd, Cu, Hg, Pb y Zn	N.A	N.A
		SJ-3	--	N.A	N.A	As, Hg y Pb	N.A	N.A
Agua superficial	Río Quicay	RQuic-01	--	N.A	N.A	As y Hg	N.A	N.A
Agua superficial	Río San Juan	SJ-02A	--	N.A	N.A	Hg	N.A	N.A
		RSjua-06	--	N.A	N.A	**	N.A	N.A
		RSjua-05	--	N.A	N.A	**	N.A	N.A
		RSjua-04	--	N.A	N.A	**	N.A	N.A
Agua superficial	Quebrada sin nombre 16	QSnom-16	--	N.A	N.A	--	N.A	N.A
Agua superficial	Río San Juan	RSjua-03	--	N.A	N.A	**	N.A	N.A
		RSjua-02	--	N.A	N.A	**	N.A	N.A
		RSjua-01	pH	N.A	N.A	As, Hg y Pb	N.A	N.A
Agua superficial	Río sin nombre	RSnom-02	--	N.A	N.A	**	N.A	N.A
Agua superficial	Río Paria	RPari-02	--	N.A	N.A	**	N.A	N.A
		RPari-01A	--	N.A	N.A	**	N.A	N.A
Agua superficial	Laguna Alcacocha (Descarga)	LAlca-02	--	N.A	N.A	**	N.A	N.A
Agua turbinada	centro poblado Jurajhuanca	DCLT50Kv	N.A	--	N.A	N.A	N.A	N.A
Agua residual doméstico	Centro poblado Sacrafamilia	AR-01	N.A	N.A	--	N.A	N.A	N.A
	Centro poblado Sacrafamilia	DSF-01	N.A	N.A	Coliformes termo	N.A	N.A	N.A

Matriz	Cuerpo de agua/cuerpo receptor/localidad/ poblado	Código OEFA	Norma ambiental vigente					
			ECA agua[1]	LMP 010[2]	LMP 003[3]	CEQG sedimento[4]	ECA suelo[5]	CEQG suelo[6]
			Ago-20				Set-20	
					tolerantes			
	Centro poblado Jurajhuanca	DRSjua-07	N.A	N.A	Coliformes termotolerantes	N.A	N.A	N.A
	Centro poblado Jurajhuanca	DRSjua-07B	N.A	N.A	--	N.A	N.A	N.A
	Centro poblado Jurajhuanca	DYura-01	N.A	N.A	**	N.A	N.A	N.A
Suelo	Distrito de Simón Bolívar	CS-P20-01	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Pb	Se
		CS-P20-02	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se
		CS-P20-03	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-P20-04	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Hg, Pb	Cu, Se
		CS-P20-05	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Pb	--
		CS-P20-06	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
Suelo	Distrito de Vicco	CS-P50-01	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-P50-02	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-P50-03	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-P50-04	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-P50-05	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-P50-06	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-P50-07	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Pb	Cu, Se, Zn
		CS-P50-08	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
Suelo	Distrito de Simón Bolívar	CS-P22-01	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-P22-02	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Zn
		CS-P22-03	N.A	N.A	N.A	N.A	--	Se
		CS-P22-04	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn

Matriz	Cuerpo de agua/cuerpo receptor/localidad/ poblado	Código OEFA	Norma ambiental vigente					
			ECA agua[1]	LMP 010[2]	LMP 003[3]	CEQG sedimento[4]	ECA suelo[5]	CEQG suelo[6]
			Ago-20				Set-20	
		CS-P22-05	N.A	N.A	N.A	N.A	--	--
Suelo	Distrito de Vicco	CS-DR-30	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-28	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-29	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-27	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-24	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-20	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-16	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Se, Zn
		CS-DR-12	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-11	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-15	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Se, Zn
		CS-DR-14	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Pb	Cu, Se, Zn
		CS-DR-13	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Pb	Cu, Se, Zn
		CS-DR-18	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-19	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Se, Zn
		CS-DR-23	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-17	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-21	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-22	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-26	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-25	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-08	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-07	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn

Matriz	Cuerpo de agua/cuerpo receptor/localidad/ poblado	Código OEFA	Norma ambiental vigente					
			ECA agua[1]	LMP 010[2]	LMP 003[3]	CEQG sedimento[4]	ECA suelo[5]	CEQG suelo[6]
			Ago-20				Set-20	
		CS-DR-09	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-10	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-06	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-05	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-02	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-DR-03	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Se, Zn
		CS-DR-04	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Se, Zn
		CS-DR-01	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CA-01	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CA-01A	N.A	N.A	N.A	N.A	--	Se
Suelo	Distrito de Simón Bolívar	CS-PRS-01	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-02	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Hg, Pb	Cu, Zn
		CS-PRS-04	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-09	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-10	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-17	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Zn
		CS-PRS-11	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-12	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Zn
		CS-PRS-13	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-08	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-07	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-03	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-06	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-05	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-16	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-15	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-14	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn

Matriz	Cuerpo de agua/cuerpo receptor/localidad/ poblado	Código OEFA	Norma ambiental vigente					
			ECA agua[1]	LMP 010[2]	LMP 003[3]	CEQG sedimento[4]	ECA suelo[5]	CEQG suelo[6]
			Ago-20				Set-20	
		CS-PRS-18	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-19	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Se, Zn
		CS-PRS-19.2	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-22	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Hg, Pb	Cu, Zn
		CS-PRS-22.2	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Se, Zn
		CS-PRS-23	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-23.2	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-20	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-20.2	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-24	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Se, Zn
		CS-PRS-24.2	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-25	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-25.2	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CS-PRS-21	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CA-04A	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		CA-04B	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Pb	Cu, Zn
		CA-04C	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Pb	Cu, Zn
		CA-04D	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Pb	Cu, Zn
Suelo	Distrito de Simón Bolívar	MF-01	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Se
		MF-02	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		MF-03	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		MF-04	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		MF-05	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		MF-06	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Ba, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		MF-07	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		MF-08	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		MF-09	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		MF-10	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		MF-11	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn
		MF-12	N.A	N.A	N.A	N.A	As, Cd, Hg, Pb	Cu, Ag, Se, Zn

[1] Estándares de Calidad Ambiental para Agua, categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales, aprobado mediante Decreto Supremo N.° 004-2017-MINAM
[2] Límites Máximos Permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero-Metalúrgicas, aprobado mediante Decreto Supremo N.° 010-2010-MINAM.
[3] Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, aprobados mediante Decreto Supremo N.° 003-2010-MINAM.
[4] Canadian Council of Ministers of the Environment (2002). *Canadian Environmental Quality Guidelines. Sediment. Quality Guidelines for Protection of Aquatic Life of Freshwater* (Valores de la guía de calidad ambiental de Canadá para sedimentos de aguas continentales). De uso referencial al no contar con normativa nacional.
[5] Estándares de Calidad Ambiental para Suelo, uso agrícola; aprobados mediante Decreto Supremo N.° 011-2017-MINAM
[6] Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health, 2007.

NA: No aplica
--: No excedió ningún parámetro
**: No se tomó muestra

3. CONCLUSIONES

Identificación de fuentes contaminantes

Los residuos mineros en 9 de los 51 PAM, de acuerdo a los ensayos de *shake flask* metales (son capaces de lixiviar Fe, Zn, Cu, Pb, As, Se, Cd y Ag), shake flask aniones (presentan sulfatos como anión dominante) y Dold (liberan S, Fe, Cu, Pb y Zn en las fases más susceptibles, soluble en agua e intercambiable); son fuentes contaminantes al suelo, no descartándose su influencia a los suelos de los sectores o zonas donde se reportan PAM, de acuerdo a la «Actualización de inventario inicial de pasivos ambientales mineros» del Minem. Ya que en esas zonas se encuentran actualmente utilizadas como depósitos de gravas, zona de cultivo de forraje (PAM-16), corral para ganado (PAM-33) o en algunos casos revegetados de manera natural.

Los sedimentos fluvio-aluviales mezclados con residuo minero que se encuentran en ambas márgenes del río Ragra entre el depósito de relaves Quiulacocha y el pie de la presa de releves Ocroyoc (área aproximada de 8800 m^2), son fuentes contaminantes, debido a que los resultados del test de ABA demuestran que son generadores de acidez, en el ensayo de *shake flask* metales lixiviaron Fe, Ca, Mg, Mn, Sr, Zn, Cu, Pb, As, Tl, Sb, Cd, Ag y Hg, en el ensayo de *shake flask* aniones lixiviaron sulfatos como anión dominante y en el ensayo de Dold se reportaron S, Ca, Cu, Fe, Pb y Zn en las fases más susceptibles (soluble en agua e intercambiable).

Río San Juan y tributarios

De acuerdo al contexto geológico, la litología de la subcuenca del río San Juan se encuentra dominada por rocas calcáreas (calizas y areniscas calcáreas) con la ocurrencia domos y rocas intrusivas que condicionan el origen de los yacimientos minerales. Dentro de este contexto, se encontró que son 4 los tributarios, del río San Juan, con aporte de metales sobre el nivel de referencia medio estimado en la evaluación para la subcuenca del río San Juan: el río Ragra, el río Culcalhuain, el río Huaraumpampa, la quebrada sin nombre 12; de los cuales solo la quebrada sin nombre 12 no tiene evidencia de actividad minera (colonial o actual).

El río Ragra el cual es una fuente de contaminación para el río San Juan, viene siendo afectado por las aguas residuales domésticas, sedimentos fluvio-aluviales mezclados con residuo minero dispuestos en ambos márgenes del río Ragra y actividades desarrolladas en la parte alta.

Las aguas del río Ragra, los depósitos de sedimentos en el río San Juan, descarga de aguas residual doméstica e industrial al entrar en contacto con el río San Juan influyen sobre los valores del Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales (ICARHS), disminuyendo su categoría de excelente (SJ-3) a pésima (RSjua-08); asimismo produce los cambios en la facies de bicarbonatada cálcica a sulfatada cálcica-magnésica; asi también el sedimento en el río San Juan, presentó un cambio en el riesgo ecológico potencial (PER) de «grado bajo» en SJ-3 (antes de la ex desembocadura del río Ragra) a «grave» en RSjua-08, evidenciandose una influencia sobre la diversidad y composición del perifiton con la presencia de especies tolerantes a metales y dando una clasificación de «pésima» para la calidad ecologica CERA-S mostrandose en la baja riqueza de especies de macroinvertebrados bentónicos.

Los puntos en el río San Juan, aguas abajo de RSjua-08, presentaron una mejora respecto a las categorías establecidas en el ICARHS de «regular» en los puntos RSjua-08A, SJ-17, RSjua-08C, SJ-18 (excepto en el punto SJ-17, que fue «malo»); sin embargo, cuando se evaluó el sedimento de este tramo, los puntos presentaron un riesgo ecológico potencial de «grave», debido a los aportes de sedimento del río Ragra (SJ-10) y el desplazamiento de los depósitos de sedimentos en el río San Juan (SJ-12) hacia la parte baja de este río, lo que se refleja en la influencia sobre la composición de especies del perifiton que se hace notoria con la prevalencia de la microalga *Stigeoclonium* sp. la que es tolerante a metales en este tramo; del mismo modo se observó una baja riqueza de macroinvertebrados bentónicos y una clasificación de «pésima» para la calidad ecológica CERA-S, a excepción del RSjua-08C y SJ-18 que obtuvieron una clasificación «mala».

El punto SJ-12 tuvo una clasificación de calidad de mala, de acuerdo al ICARHS, por la descarga del agua residual doméstica del centro poblado San Antonio de Rancas, con contenido alto en coliformes termotolerantes (170 000 NMP/ 100mL) el cual incumple los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de plantas de tratamientos de aguas residuales (PTAR) domésticas o municipales (Decreto Supremo N.° 003-2010-MINAM), por la descarga del agua residual industrial (sin procedencia identificada) con concentraciones altas de manganeso (3,2293 mg/L) y cobre (17,07 mg/L), donde este último incumple con lo establecido en los LMP para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero – metalúrgicas (Decreto Supremo N.° 010-2010-MINAM), los cuales produjeron el incremento de esos parámetros, superando los valores de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua 2017, categoría 3 riego de vegetales y bebida de animales en el punto de muestreo SJ-12.

Además, para ese mismo punto, en cuanto a la comunidad del perifiton si bien estuvo relacionada en mayor grado con los valores de arsénico, manganeso, cadmio, cobre y plomo del sedimento, en donde el cálculo de riesgo ecológico fue de «grave», por presentar especies tolerantes a metales; también mostró un número de especies tolerantes a cargas orgánicas elevadas dentro de las *chlorophytas*. Por lo que, se evidenció una influencia a dicha comunidad por los metales presentes en el sedimento de este río.

Los puntos del tramo en el río San Juan, ubicado antes del aporte del río Tinragra (RSjua-09A) hasta el delta Upamayo (SJ-35) presentaron una categoría establecida en el ICARHS de «regular» y un riesgo ecológico potencial, calculado del sedimento, de «grave». El único parámetro (metal) que mantiene concentraciones en el agua superiores al valor establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3, es el manganeso el cual proviene, en gran medida, del aporte que el río Ragra introduce al río San Juan. Esto se refleja en una clasificación de la calidad ecológica (CERA-S) entre «mala» y «moderada» (excepto en el RSjua-15, que fue «pésima») y una diversidad y composición de especies del perifiton diferente del resto de puntos y asociada a bajos valores de sulfatos, cloruros, fluoruros en

agua, excepto en los puntos RSjua-12, RSjua-13 y RSjua-14 (ubicadas aguas abajo de la UM Colquijirca y entre los PAM relave San Gregorio y PAM relave colonial Puente San Juan) donde estos aniones presentaron mayores concentraciones del resto de puntos de este tramo.

En el río San Juan entre los puntos RSjua-16 y RSjua-17A se observa un incremento de plomo (de 427 mg/kg a 2522 mg/kg) y mercurio (de 5,48 mg/kg a 11,8 mg/kg), no se descarta el aporte de metales por escorrentía superficial del sitio contaminado API-DR y los residuos del PAM relave colonial Chaqueneoc (PAM-49), PAM relave colonial Chashajircan (PAM-54) en época de avenida; estos incrementos de plomo y mercurio afectan la diversidad y composición de especies de las comunidades de perifiton y macroinvertebrados bentónicos.

En relación a los sedimentos del río Huaraupampa tributario al río Gashan y este al río San Juan, entre los puntos RHuar-01 y RHuar-05, se observa un incremento en las concentracciones de arsénico (de 22,6 mg/kg a 63,3 mg/kg), plomo (de 15,1 mg/kg a 364 mg/kg) y mercurio (<0,01 a 14,3), no se descarta el aporte de metales por escorrentía superficial del PAM relave colonial Planta Santa Rita y Lucero (PAM-32) en época de avenida, que presentó concentraciones de 1149 mg/kg de arsénico, 12373 mg/kg de plomo y 223 mg/kg mercurio, cuyo riesgo ecológico potencial varió de «grado bajo» en el punto RHuar-01 a «moderado» en el punto RHuar-05 y se refleja en la diferencia de la composición de especies del perifiton entre el punto RHuar-01 con respecto a los puntos aguas abajo del PAM mencionado.

En el ámbito del río San Juan y sus tributarios se registraron 2 especies de anfibios *Rhinella spinulosa* (Bufonidae) y *Pleurodema marmoratum* (Leptodactylidae). Las 2 presentaron abundancias similares y se registraron solo en la quebrada sin nombre (Qsnom-02) y en el último tramo del río San Juan, entre el delta Upamayo y el centro poblado Huayrabamba.

Los anfibios, colectados en la subcuenca del río San Juan y uno de sus tributarios, están expuestos y acumulan diferentes metales, provenientes de los sedimentos del cauce y las orillas de estos cuerpos de agua. Se observó una relación entre la concentración de la mayoría de los metales en anfibios y los hallados en sedimentos; decir los puntos de elevada concentración de metales en sedimento son también los transectos con elevada la concentración de metales en anfibios, siendo esta correlación alta y significativa, para el arsénico, bario y plomo. Los metales que presentaron mayor concentración en anfibios fueron el hierro, zinc y aluminio; al igual que en los sedimentos donde además destacaron el plomo y manganeso.

La zona de mayor de afectación fue el ámbito del PAM Delta Upamayo (AM-He-T15, AM-He-T16), donde la concentración de metales en anfibios fue mucho mayor en comparación con los otros dos puntos evaluados (AM-He-T17 y AM-He-T18). El aluminio, arsénico, manganeso y plomo fueron los elementos, que tuvieron mayor diferencia porcentual. Este patrón es similar a lo hallado para la concentración de metales en sedimentos cuyos valores además de ser altos en comparación con otros sectores del río San Juan, exceden los valores referenciales PEL de la de la Guía de calidad ambiental canadiense para sedimento-CEQG, calificando como de «grave» riesgo ecológico potencial.

No se detectaron concentraciones en metales que pudieran causar efectos tóxicos directos en los anfibios; sin embargo, la alta concentración hallada en el sedimento puede ocasionar efectos subletales debido a una exposición crónica. Se identificó el plomo como un contaminante importante ya que las concentraciones en sedimentos del delta Upamayo son mucho mayores a las detectadas en localidades cercanas; y también porque su

concentración en los tejidos de anfibios analizadas este año (5,957 – 23,28 mg/kg) se incrementaron respecto a muestras de *Telmatobius macrostomus* analizadas en el 2008, cuando el plomo se presentó en concentraciones casi imperceptibles (0 – 0,042 mg/kg) en la localidad de Upamayo. Los valores de sedimento en el delta Upamayo (1082 – 8441 mg/kg) sobrepasan por mucho el nivel de 540 mg/kg de plomo en sedimento, a partir del cual los anfibios empiezan a presentar malformaciones que afectan todas las partes del sistema esquelético, disminuyendo sus probabilidades de persistencia.

Sitios contaminados

Se identificó 6 sitios contaminados, de los cuales 1 está asociado a los sedimentos del río San Juan (API DR), 3 asociados a los pasivos ambientales mineros (API PAM 20, API PAM 22 y API PAM 50), 1 que no está asociado a una fuente (API MF) y 1 que está asociado a los depósitos de sedimentos del río San Juan, el PAM relave colonial CM Aurífera Aurex S.A. y el PAM Residuos Coloniales (API PRS).

a) API PRS

Sector 1. Se identificó suelos contaminados por aporte del arrastre y la acumulación de los sedimentos depositados en el río San Juan y exdesembocadura del río Ragra, el sitio presentó concentraciones de arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, que superaron los valores establecidos en los ECA para Suelo 2017, de uso agrícola, en arsénico, mercurio y plomo en todos puntos, cadmio en 18 de 19 puntos, bario en 3 de 19 puntos y al valor de nivel de fondo, el plomo en todos los puntos, arsénico y mercurio en 17 de 19 puntos, por lo que se considera un sitio contaminado; no se descarta la movilidad al río San Juan por escorrentía superficial en época de avenida.

Sector 2. Se identificó suelos contaminados, debido a la acumulación de metales provenientes del sector donde se ubicaron los PAM C.M. Aurífera Aurex S.A. y Residuos Coloniales (ambos inventariados por el Minem), el sitio presentó concentraciones de arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo que superaron los valores establecidos en los ECA para Suelo 2017, de uso agrícola, en arsénico, mercurio y plomo en todos los puntos y cadmio en 5 de 6 puntos en suelos muestreados a nivel superficial (0-15 cm); mientras que arsénico, mercurio, cadmio y plomo en todos los puntos, bario en 2 de 6 puntos en suelos muestreado en profundidad (15-30 cm). Asimismo, al comparar con los valores de nivel de fondo los suelos muestreados a nivel superficial superaron en arsénico, mercurio y plomo en 5 de 6 puntos y los suelos muestreados en profundidad el arsénico y plomo en todos los puntos y mercurio en 5 de 6 puntos, por lo que se considera un sitio contaminado, no se descarta la movilidad de dichos metales al río San Juan por escorrentía superficial en época de avenida.

Las muestras de tejido vegetal de *Dactylis glomerata* «pasto ovillo», presentan una clara diferencia en las concentraciones de metales obtenidas en el API PRS y la zona control; siendo mucho mayor en el API, principalmente en los metales mercurio y plomo. Además, todas las muestras de *Dactylis glomerata* colectadas en el API PRS superaron, de manera referencial, el contenido máximo de los metales arsénico, cadmio, mercurio y plomo establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal).

b) API DR

El desborde del río San Juan producto de los eventos estacionales extraordinarios generó que los sedimentos que arrastra el río fueran depositados en el API DR, donde se encontró sitios con acumulación de material de arrastre de los sedimentos del río San Juan y sitios

con cobertura vegetal. El API presentó concentraciones de arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo que superaron los valores establecidos en los ECA para Suelo 2017, de uso agrícola, en arsénico, plomo y cadmio en todos los puntos, mercurio en 28 de 30 puntos y bario en 20 de 30 puntos y al valor de nivel de fondo en arsénico y plomo en todos los puntos, por lo que se considera un sitio contaminado; no se descarta la movilidad de dichos metales al río San Juan por escorrentía superficial en época de avenida.

Las muestras de tejido vegetal de *Festuca rigescens* «chillihua» y *Azorella diapensioides* «pampa yareta», presentan una clara diferencia en las concentraciones de metales obtenidas en el API DR y la zona control; siendo mucho mayor en el API, principalmente en los metales plata, mercurio y plomo para *A. diapensioides*, y plomo, arsénico y bario para *F. rigescens*. Además, todas las muestras de ambas especies colectadas en el API DR superaron, de manera referencial, el contenido máximo de los metales arsénico, cadmio, mercurio y plomo establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal).

c) API PAM 20

Se identificó suelos contaminados en el sector donde se ubicaba los residuos del PAM relave colonial Tauro 6, que presentó concentraciones de arsénico, cadmio, mercurio y plomo que superaron los valores establecidos en los ECA para suelo 2017, uso agrícola, en arsénico y plomo en todos los puntos, mercurio en 5 de 6 puntos, cadmio en 3 de 6 puntos y a los valores de nivel de fondo en arsénico y plomo en 5 de 6 puntos, por lo que se considera un sitio contaminado; no se descarta la movilidad de dichos metales al río San Juan por escorrentía superficial en época de avenida.

Las muestras de tejido vegetal de *Festuca rigescens* «chillihua», no presentan una clara diferencia en las concentraciones de metales obtenidas entre el API PAM 20 (zona con vegetación) y la zona control. Sin embargo, las muestras de tejido vegetal colectadas en el API superaron, de manera referencial, el contenido máximo de los metales arsénico y mercurio establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal).

d) API MF

Se identificó suelos contaminados, cuyo origen no ha sido identificado en la presente evaluación, que registraron concentraciones de arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo las cuales superaron los valores establecidos en los ECA para suelo 2017, uso agrícola, en arsénico, cadmio y mercurio en todos los puntos, bario en 1 de 12 puntos y plomo en 11 de 12 puntos y a los valores de nivel de fondo en arsénico en todos los puntos y plomo en 9 de 12 puntos, por lo que se considera un sitio contaminado; no se descarta la movilidad de dichos metales al río San Juan por escorrentía superficial en época de avenida.

e) API PAM 22

Se identificó suelos contaminados en el sector donde se ubicaba los residuos del PAM relave colonial Canal Rancas, que presentó concentraciones de arsénico, cadmio, mercurio y plomo que superaron los valores establecidos en los ECA para suelo 2017, uso agrícola, en arsénico, cadmio, mercurio y plomo en 3 de 5 puntos, y a los valores de nivel de fondo en arsénico y plomo en 3 de 5 puntos, por lo que se considera un sitio contaminado; no se descarta la movilidad de dichos metales al río San Juan por escorrentía superficial en época de avenida.

Las muestras de tejido vegetal de *Plantago tubulosa* y *Festuca rigescens* «chillihua», no presentaron una clara diferencia en las concentraciones de metales obtenidas entre el API PAM 22 (zona con vegetación) y la zona control. Sin embargo, las muestras de tejido vegetal colectadas en el API superaron, de manera referencial, el contenido máximo de los metales arsénico, mercurio y plomo establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal) en *P. tubulosa*, y arsénico y mercurio en *F. rigescens*.

d) API PAM 50

Se identificó suelos contaminados en el sector donde se ubicaba los residuos del PAM relave colonial Chaquiniyo, que presentaron concentraciones de arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo que superaron los valores establecidos en los ECA para suelo 2017, uso agrícola, en arsénico y plomo en todos los puntos, mercurio y cadmio en 7 de 8 puntos y bario en 6 de 8 puntos, y a los valores de nivel de fondo en arsénico y plomo en todos los puntos, por lo que se considera un sitio contaminado; no se descarta la movilidad de dichos metales al río San Juan por escorrentía superficial en época de avenida.

Las muestras de tejido vegetal de *Festuca rigescens* «chillihua», presentaron una clara diferencia en las concentraciones de metales obtenidas en el API PAM 50 y la zona control; siendo mucho mayor en el API, principalmente en los metales mercurio y plata. Además, todas las muestras de *Festuca rigescens* colectadas en el API superaron, de manera referencial, el contenido máximo de los metales arsénico, cadmio, mercurio y plomo establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal).

4. RECOMENDACIONES

- Actualización del plan de cierre, debido a que no se pudo comparar la diversidad hallada con estudios previos debido a que la evaluación de fauna realizada en el marco del «Plan de Cierre Integral de los Pasivos Ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo», estuvo enfocada solo en el grupo de las aves. Dicha evaluación no consideró la temporalidad ni medida del esfuerzo de muestreo, acciones recomendadas en la guía de inventario de fauna silvestre del MINAM.

- Aprobar el informe de la Evaluación ambiental de causalidad en el área de influencia de los pasivos de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo, en el 2020; en vista que cuenta con el sustento técnico requerido.

- Remitir a la Dirección de Supervisión Ambiental en Energía y Minas para los fines que se estimen convenientes.

Atentamente:

Oefa
Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental

Firmado digitalmente por: FAJARDO VARGAS Lazaro Walther FAU 20521286769 soft
Cargo: Ejecutivo de la Subdirección Técnica Científica
Lugar: Sede Central - Lima\Lima\Jesus Maria
Motivo: Soy el autor del documento

Oefa
Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental

Firmado digitalmente por: ANCCO PICHUILLA Luis Angel FAU 20521286769 hard
Cargo: Coordinador de Evaluaciones Ambientales en Mineria y Energia
Lugar: Sede Central - Lima\Lima\Jesus Maria
Motivo: Soy el autor del documento

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental

Firmado digitalmente por: JULCA CRUZ Richard Teodoro FAU 20521286769 soft
Cargo: Especialista de Evaluaciones Ambientales - Profesional I
Lugar: Sede Central - Lima\Lima\Jesus Maria
Motivo: Soy el autor del documento

Visto este informe la Dirección de Evaluación Ambiental ha dispuesto su aprobación.

Atentamente:

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental

Firmado digitalmente por: GARCIA ARAGON Francisco FAU 20521286769 hard
Cargo: Director de la Direccción de Evaluación Ambiental
Lugar: Sede Central - Lima\Lima\Jesus Maria
Motivo: Soy el autor del documento

"Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado por el OEFA, aplicando los dispuesto por el Art. 25 de D.S. 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. Nª 026-2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través de la siguiente dirección web: https://sistemas.oefa.gob.pe/verifica e ingresando la siguiente clave: 06399123"

06399123

EVALUACIÓN AMBIENTAL DE CAUSALIDAD EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DE LOS PASIVOS AMBIENTALES DE ORIGEN MINERO EN EL RÍO SAN JUAN Y DELTA UPAMAYO, DISTRITOS SIMÓN BOLIVAR, TINYAHUARCO Y VICCO, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO PASCO, EN EL 2020

SUBDIRECCIÓN TÉCNICA CIENTÍFICA

DIRECCIÓN DE EVALUACIÓN AMBIENTAL

2020

Profesionales que aportaron a este documento:

FIRMA DIGITAL

Firmado digitalmente por: PERALTA ARGOMEDA Jorge Luis FIR 44384768 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 27/12/2020 13:09:27-0500

FIRMA DIGITAL

Firmado digitalmente por: ORE DIAZ FERNANDO FIR 44814575 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 27/12/2020 13:18:51-0500

FIRMA DIGITAL

Firmado digitalmente por: RIMARACHIN CHING Vania FIR 40455022 hard
Motivo: Soy la autora del documento
Fecha: 27/12/2020 14:22:09-0500

FIRMA DIGITAL

Firmado digitalmente por: FERNANDEZ NAJARRO Jorge Luis FIR 43970034 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 27/12/2020 14:35:30-0500

FIRMA DIGITAL

Firmado digitalmente por: TRINIDAD PATRICIO Huber Sady FIR 46125609 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 27/12/2020 15:37:10-0500

FIRMA DIGITAL

Firmado digitalmente por: DELGADO CORNEJO Jackeline Amanda FIR 42175705 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 27/12/2020 15:47:16-0500

FIRMA DIGITAL

Firmado digitalmente por: JULCA CRUZ Richard Teodoro FAU 20521286769 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 27/12/2020 15:53:25-0500

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN 1
2 ANTECEDENTES 3
3 OBJETIVOS 8
3.1 Objetivo general 8
3.2 Objetivos específicos 8
4 ÁREA DE ESTUDIO 8
4.1 Climatología 11
4.2 Geología regional 11
4.3 Contexto social 11
5 METODOLOGÍA 12
5.1 Objetivo específico 1: Identificar fuentes de contaminación en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo 15
5.1.1 Guías utilizadas para la evaluación 16
5.1.2 Ubicación de puntos de muestreo 17
5.1.3 Parámetros y métodos de análisis 18
5.1.4 Aseguramiento de la calidad 19
5.1.5 Criterios de evaluación 20
5.2 Objetivo específico 2: Determinar la litogeoquímica de las zonas de emplazamiento de los PAM y de los depósitos cuaternarios fluviales, en las zonas de confluencia, de los principales afluentes con el río San Juan en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo 21
5.2.1 Guías utilizadas para la evaluación 22
5.2.2 Ubicación de puntos de muestreo 23
5.2.3 Parámetros y métodos de análisis 25
5.2.4 Aseguramiento de la calidad 26
5.2.5 Criterios de evaluación y Procesamiento de datos 26
5.3 Objetivo específico 3: Determinar la influencia de los elementos de interés provenientes de los PAM, así como otras fuentes en el agua superficial, sedimento y comunidades hidrobiológicas de perifiton, macroinvertebrados acuáticos y peces en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo 29
5.3.1 Protocolos y guías utilizadas para la evaluación 29
5.3.2 Ubicación de puntos de muestreo 30
5.3.3 Parámetros y métodos de análisis 33
5.3.4 Equipos utilizados 35
5.3.5 Aseguramiento de la calidad 35
5.3.6 Procesamiento de datos 35
5.3.7 Criterios de evaluación 43

5.4 Objetivo específico 4: Identificar los sitios contaminados en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo 49
5.4.1Guías utilizadas para la evaluación 49
5.4.2Ubicación de puntos de muestreo..... 50
5.4.3Parámetros y métodos de análisis 59
5.4.4Equipos utilizados 59
5.4.5Tipo de muestreo 60
5.4.6Aseguramiento de la calidad..... 60
5.4.7Procesamiento de datos..... 61
5.4.8Criterios de evaluación..... 73
5.5 Objetivo específico 5: Determinar la influencia de los elementos de interés provenientes de los PAM sobre la flora y fauna silvestre (anfibios) en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo 74
5.5.1Guías utilizadas para la evaluación 74
5.5.2Ubicación de los puntos de muestreo 76
5.5.3Parámetros y métodos de análisis 80
5.5.4Equipos y materiales utilizados..... 80
5.5.5Tipo de muestreo 80
5.5.6Procesamiento de datos..... 81
a.1. Determinación de formaciones vegetales..... 81
a.2 Composición de especies 81
a.3 Correlación bivariada 81
a.4. Prueba de hipótesis..... 82
5.5.7Criterios de evaluación..... 84
6 Resultados y análisis 85
6.1 Objetivo específico 1: Identificar fuentes de contaminación en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo 85
6.1.1Caracterización geoquímica de los residuos mineros 85
6.1.2Agua residual y turbinada..... 91
6.2 Objetivo específico 2: Determinar la litogeoquímica de las zonas de emplazamiento de los PAM y de los depósitos cuaternarios fluviales, en las zonas de confluencia, de los principales afluentes con el río San Juanen el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el San Juan y delta Upamayo..... 97
6.2.1Caracterización litogeoquímica y mineralógica..... 97
6.3 Objetivo específico 3: Determinar la influencia de los elementos de interés provenientes de los PAM, así como otras fuentes en el agua superficial, sedimento y comunidades hidrobiológicas de perifiton, macroinvertebrados acuáticos y peces en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo..... 117
6.3.1Agua superficial..... 117

6.3.2Sedimento 130
6.3.3Comunidades hidrobiológicas 138
6.4 Objetivo específico 4: Identificar los sitios contaminados en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo 149
6.4.1Áreas de potencial interés 149
6.4.2Nivel de fondo 213
6.5 Objetivo específico 5: Determinar la influencia de los elementos de interés provenientes de los PAM sobre la flora y fauna silvestre (anfibios) en el área de influencia de los Pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y Delta Upamayo 222
6.5.1Flora 222
6.5.2Fauna silvestre 235
7 Discusiones 244
8 Conclusiones 379
9 recomendaciónES 384
10 ANEXOS 384
11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 384

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Unidades fiscalízales identificadas en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo 8
Tabla 5.1. Potencial de generación de contaminantes y fuentes de generación 16
Tabla 5.2. Protocolo de muestreo para el material contenido en los PAM 16
Tabla 5.3. Ubicación de los puntos de muestreo para el material contenido en los PAM y aguas residuales que son vertidas al río San Juan 17
Tabla 5.4. Parámetros y métodos de análisis considerados para la evaluación de los PAM 18
Tabla 5.5. Guías de referencia para la caracterización geoquímica y mineralógica de roca 22
Tabla 5.6. Ubicación de los puntos de muestreo de roca y depósitos cuaternarios fluviales 23
Tabla 5.7. Parámetros y métodos de análisis considerados para la caracterización geoquímica y mineralógica de roca.....26
Tabla 5.8. Protocolos y guías para el muestreo de agua superficial, agua residual doméstica, agua residual industrial y efluente minero 29
Tabla 5.9. Ubicación de los puntos de muestreo de agua, sedimento y comunidades hidrobiológicas.....31
Tabla 5.10. Parámetros y métodos de análisis considerados para la evaluación de agua superficial, sedimento y comunidades hidrobiológicas 34
Tabla 5.11. Controles de calidad realizados durante el muestreo de agua y sedimentos. .35
Tabla 5.12. Componentes iónicos mayoritarios del agua 36
Tabla 5.13. Puntajes de sensibilidad asignadas a las familias de macroinvertebrados bentónicos para la obtención del índice ABI 40
Tabla 5.14. Estados de la calidad del cuerpo de agua según el ABI.....41
Tabla 5.15. Calidad hidromorfológica del cuerpo de agua.....41
Tabla 5.16. Calidad ecológica del cuerpo de agua 42
Tabla 5.17. Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA) empleados en la evaluación ambiental. 43
Tabla 5.18. Parámetros a evaluar en el ICARHS para la Categoría 3 de agua 44
Tabla 5.19. Interpretación de la clasificación ICARS 45
Tabla 5.20. Concentraciones de metales en sedimentos de agua dulce, según la guía canadiense (CEQG) 46
Tabla 5.21. Relaciones entre los valores del factor de enriquecimiento (*EF*) y los niveles de contaminación.....47
Tabla 5.22. Relaciones entre los valores del índice de geoacumulación (I_{geo}) y los niveles de contaminación.....48
Tabla 5.24. Estándares de calificación de riesgo ecológico potencial (PER) 49
Tabla 5.24. Guías para la el muestreo e identificación de suelo, y para el levantamiento fotogramétrico 49
Tabla 5.25. Ubicación y descripción de puntos de muestreo en las API y niveles de fondo 51
Tabla 5.26. Ubicación áreas de levantamiento aerofotogramétrico con RPAS 55
Tabla 5.27. Ubicación de los puntos de posicionamiento geodésico.....56
Tabla 5.28. Parámetros y métodos de análisis considerados para la evaluación de suelo 59
Tabla 5.29. Preprocesamiento de imágenes del sensor Parrot Sequoia.....68
Tabla 5.30. Estándares de comparación nacional e internacional en calidad de suelos 73
Tabla 5.31. Guías de referencia para la evaluación de flora y fauna silvestre 74
Tabla 5.32. Ubicación de puntos de colecta de tejido evaluados en el área de estudio 76

Tabla 5.33. Transectos en hábitats acuáticos evaluados en el área de estudio 78
Tabla 5.34. Transectos a evaluar en los grupos de fauna silvestre (anfibios) 80
Tabla 5.35. Fórmulas de los modelos para las curvas de acumulación de especies 83
Tabla 5.36. Valores de comparación para la calidad de tejidos vegetales 84
Tabla 6.1. Descripciones de campo de residuos mineros en el área de influencia del área de estudio 86
Tabla 6.2. Resultado de análisis mineralógico por microscopia óptica que detalla las alteraciones presentes y la clasificación de la muestra de residuo minero PAM-23 87
Tabla 6.3. Resultados de parámetros muestreados en los puntos de agua residual domésticas, comparados con los LMP 003-2010 91
Tabla 6.4. Resultados de parámetros muestreados en los puntos de agua turbinada y agua residual con los LMP 010-2010 92
Tabla 6.5. Cargas de los componentes principales para los parámetros (variables) del agua residual y turbinada 94
Tabla 6.6. Tabla de medias de los parámetros que componen los clústers y del total de puntos de agua residual y turbinada 96
Tabla 6.7. Descripciones de campo de los afloramientos rocosos en el área de influencia del área de estudio 101
Tabla 6.8. Resultado de análisis mineralógico por microscopia óptica que detalla las alteraciones presentes y la clasificación de las muestras de roca 102
Tabla 6.9. Descripciones de campo de los depósitos cuaternarios 103
Tabla 6.10. Resultados del análisis de microscopia electrónica de barrido en muestras de roca 110
Tabla 6.11. Cuadro resumen para el calculo del nivel de referencia 116
Tabla 6.12. Resultados de parámetros muestreados en los puntos de agua superficial en el río San Juan y aportantes, comparados con los ECA para agua 2017, categoría 3 118
Tabla 6.13. Cargas de los componentes principales para los parámetros (variables) del agua superficial del río San Juan y aportantes 123
Tabla 6.14. Tabla de medias de los parámetros que componen los clústers y del total de puntos de agua superficial..... 127
Tabla 6.15. ICARHS para el río San Juan y aportantes para el muestreo realizado en agosto de 2020 128
Tabla 6.16. Resultados de metaloides, metales y textura en los sedimentos del río San Juan y tributarios 131
Tabla 6.17. Resultados de metaloides y metales en los sedimentos del río San Juan y tributarios comparados con los valores ISQG y PEL de la guía canadiense de sedimento 133
Tabla 6.18. Índice de geoacumulación (Igeo) de metales y metaloides en los sedimentos del río San Juan y tributarios..... 134
Tabla 6.19. Factor de enriquecimiento (EF) de metales y metaloides en los sedimentos del río San Juan y tributarios..... 135
Tabla 6.20. Factor de contaminación (CF) de metales y metaloides en los sedimentos del río San Juan y tributarios..... 136
Tabla 6.21. Factor de enriquecimiento (FE) de metales en los sedimentos del río San Juan y tributarios 137
Tabla 6.17. Número de especies..... 141
Tabla 6.23. Diversidad alfa 141
Tabla 6.24. Riqueza de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por orden..... 144
Tabla 6.25. Abundancia de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por orden 145

Tabla 6.26. Índices de diversidad alfa de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por punto de muestreo 147
Tabla 6.27. Índices bióticos y calidad ecológica del agua por punto de muestreo 148
Tabla 6.28. Resultados de parámetros de metales totales del API PAM 20 comparados con los ECA para suelos 2017, uso agrícola 150
Tabla 6.29. Resultados de parámetros de metales totales del API PAM 20 comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola 152
Tabla 6.30. Resultados de parámetros de disponibilidad de metales pesados por la metodología de Tessier en el API PAM 20 154
Tabla 6.31. Información estadística de los índices de vegetación NDVI y NDRE 155
Tabla 6.32. Índice de vegetación (NDVI) y muestreo de suelo 157
Tabla 6.33. Índice de vegetación (NDRE) y muestreo de suelo 157
Tabla 6.34. Resultados de parámetros de metales totales del API MF comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola 158
Tabla 6.35. Resultados de parámetros de metales totales del API MF comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola 160
Tabla 6.36. Resultados de parámetros de metales totales del API PAM 22 comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola 162
Tabla 6.37. Resultados de parámetros de metales totales del API PAM 22 comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola 164
Tabla 6.38. Información estadística de los índices de vegetación NDVI y NDRE 165
Tabla 6.39. Índice de vegetación (NDVI) y muestreo de suelo 167
Tabla 6.40. Índice de vegetación (NDRE) y muestreo de suelo 167
Tabla 6.41. Resultados de parámetros de metales totales del API PRS comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola 168
Tabla 6.42. Resultados de parámetros de metales totales del API PRS comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola 171
Tabla 6.43. Resultados de parámetros de disponibilidad de metales pesados por la metodología de Tessier en el API PRS (muestreo superficial) 174
Tabla 6.44. Resultados de parámetros de disponibilidad de metales pesados por la metodología de Tessier en el API PRS (muestreo superficial) 177
Tabla 6.45. Resultados obtenidos en la prueba estática de balance ácido-base de la muestra CS-PRS-11A del API PRS (muestreo superficial) 178
Tabla 6.46. Resultados de parámetros de metales totales del API PRS comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola 179
Tabla 6.47. Resultados de parámetros de metales totales del API PRS comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola 181
Tabla 6.48. Resultados de parámetros de disponibilidad de metales pesados por la metodología de Tessier en el API PRS (muestreo a profundidad) 183
Tabla 6.49. Resultados de parámetros de metales totales de la calicata CA-04 en el API PRS comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola 183
Tabla 6.50. Resultados de parámetros de metales totales de la calicata CA-04 en el API PRS, comparados de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola 184

Tabla 6.51. Resultados de parámetros de disponibilidad de metales pesados por la metodología de Tessier en la calicata CA-04B del API PRS (muestreo a profundidad) 185
Tabla 6.52. Resultados obtenidos de difracción de rayos X en calicata CA-04 185
Tabla 6.53. Resultados obtenidos de microscopia electrónica de barrido en calicata CA-04 (profundidad) 186
Tabla 6.54. Resultados de parámetros de metales totales del API DR comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola 187
Tabla 6.55. Resultados de parámetros de metales totales del API DR comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola 189
Tabla 6.56. Resultados de parámetros de disponibilidad de metales pesados por la metodología de Tessier API DR (superficial) 192
Tabla 6.57. Resultados de parámetros de disponibilidad de metales pesados por la metodología de Tessier API DR (superficial) 195
Tabla 6.58. Resultados de parámetros de extracción secuencial por la metodología de Tessier API DR (superficial) 197
Tabla 6.59. Resultados obtenidos en la prueba estática de balance ácido-base de las muestras del API DR 199
Tabla 6.60. Resultados de difracción de rayos X en el API DR 199
Tabla 6.61. Resultados obtenidos de difracción electrónica de barrido en la muestra CS-DR-25A 200
Tabla 6.62. Información estadística de los índices de vegetación 201
Tabla 6.63. Índice de vegetación (NDVI) y muestreo de suelo 203
Tabla 6.64. Índice de vegetación (NDRE) y muestreo de suelo 204
Tabla 6.65. Resultados de parámetros de metales totales en calicatas comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola, muestreo a profundidad 206
Tabla 6.66. Resultados de parámetros de metales totales en calicata comparados de manera referencial con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola, muestreo a profundidad 206
Tabla 6.67. Resultados de parámetros de metales totales del API PAM 50 comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola 207
Tabla 6.68. Resultados de parámetros de metales totales del API PAM 50 comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola 207
Tabla 6.69. Información estadística de los índices de vegetación NDVI y NDRE 209
Tabla 6.70. Índice de vegetación (NDVI) y muestreo de suelo 212
Tabla 6.71. Índice de vegetación (NDRE) y muestreo de suelo 213
Tabla 6.72. Concentraciones de nivel de fondo determinado estadísticamente 214
Tabla 6.73. Concentraciones de nivel de fondo determinado estadísticamente 214
Tabla 6.74. Resultados de parámetros de extracción secuencial por la metodología de Tessier en nivel de fondo C para la muestra MF-12C-A 215
Tabla 6.75. Resultados obtenidos en la prueba estática de balance ácido-base de las muestras de nivel de fondo MF-12C-A 217
Tabla 6.76. Resultados obtenidos de difracción de rayos X en el nivel de fondo C 217
Tabla 6.77. Resultados de parámetros de metales totales en la calicata CA-02 comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola 218
Tabla 6.78. Resultados de parámetros de metales totales en la calicata CA-02 comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola 218
Tabla 6.79. Concentraciones de nivel de fondo determinado estadísticamente 218

Tabla 6.80. Resultados de parámetros de extracción secuencial por la metodología de Tessier en nivel de fondo D para la muestra MF-12D-A 219
Tabla 6.81. Resultados obtenidos en la prueba estática de balance ácido-base de las muestras de nivel de fondo MF-12D-A 220
Tabla 6.82. Resultados obtenidos de difracción de rayos X en el nivel de fondo D 221
Tabla 6.83. Resultados de parámetros de metales totales en la calicata CA-03 comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola 221
Tabla 6.84. Resultados de parámetros de metales totales en la calicata CA-03 comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso 221
Tabla 6.85. Número de familias, géneros y especies por cada clase registrada en el área de estudio 222
Tabla 6.86. Especies categorizadas según legislación nacional y especies citadas en los apéndices de la CITES (2019), en el área de estudio 225
Tabla 6.87. Especie endémica registrada en el área de estudio, según León *et al*. (2006) 226
Tabla 6.88. Resultados de metales totales de la parte aérea de *Festuca rigescens* en las API 1, 2, 3 y 4, zona 1 y zonas control 1 y 2 del área de estudio 233
Tabla 6.89. Resultados de metales totales de la parte aérea de *Dactylis glomerata* en el API 5 y zona control 3 del área de estudio 234
Tabla 6.90. Resultados de metales totales de la parte aérea de *Plantago tubulosa* en el API 2 y zona control 1 del área de estudio 234
Tabla 6.91. Resultados de metales totales parte la parte aérea de *Azorella diapensioides* en el API 4, zona 1 y zona control 2 del área de estudio 235
Tabla 6.92. Especies de anfibios y reptiles registrados en el área de estudio 235
Tabla 6.93. Número de muestras colectadas por especie y localidad en el área de estudio 237
Tabla 6.94. Promedios de la concentración de metales, metaloides y cianuro en tejido de anfibios y sedimentos 238
Tabla 6.95. Concentración de metales, metaloides y cianuro por especie y su diferencia porcentual 239
Tabla 6.96. Concentraciones de metales, metaloides y cianuro por localidad y su diferencia porcentual 240
Tabla 6.97. Relación entre la concentración de metales detectados en tejido de anfibios y sedimento 243
Tabla 6.98. Valores del factor de bioacumulación (BAF) en anfibios 243
Tabla 7.1. Resultados de metales fuera de lo establecido en los ECA para agua, categoría 3, y su carga de masa 259
Tabla 7.2. Resultados de los puntos de muestreo de agua superficial SJ-3 y RSjua-07, de agua turbinada (DCLT50Kv) y agua residual (DYura-01) 268
Tabla 7.3. Comparación de resultados de los puntos de muestreo de agua superficial, de agua residual doméstica y agua residual industrial, con sus normtivas respectivas 270
Tabla 7.4. Resultados de los puntos de muestreo de agua superficial en el río San Juan SJ-12, RSjua-08 y río Ragra SJ-11, comparado con los ECA para agua 2017, categoría 3 272
Tabla 7.5. Información estadística de los índices de vegetación NDVI y NDRE 303
Tabla 7.6. Información estadística de los índices de vegetación NDVI y NDRE 320
Tabla 7.7. Concentraciones de metales en muestras de los puntos de sedimento sobre el río San Juan 331
Tabla 7.8. Concentraciones de metales en muestras de los puntos de sedimento sobre el río San Juan 351

Tabla 7.9. Información estadística de los índices de vegetación NDVI y NDRE 355
Tabla 7.10. Información estadística de los índices de vegetación NDVI y NDRE 369
Tabla 7.11. Comparación de la concentración de metales registrados en el Delta Upamayo por OEFA (2020) y en localidades del lago Chinchaycocha (Castillo 2008) . 377

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Ubicación del área de estudio en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo 10
Figura 4.2. Población censada por distrito en las provincias Daniel Alcides Carrión y Pasco . 11
Figura 5.1. Modelo conceptual para la evaluación ambiental de causalidad en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo. A) parta alta y B) parte baja. 14
Figura 5.2. Estrategia de caracterización litogeoquímica y mineralógica de la subcuenca del río San Juan 22
Figura 5.3. Estimación del nivel de referencia mediante los métodos y criterios de la mediana (a) y la media (b) para el parámetro calcio 28
Figura 5.4. Diagrama de cajas del parámetro calcio 28
Figura 5.5. Diagrama de Piper 37
Figura 5.6. Dendograma 38
Figura 5.7. Secuencia de pasos para obtención de imágenes satelitales 61
Figura 5.8. Imagen multitemporal de A) 1988-1990-1994, B) 1994-1997-1999, C) 1999-2005-2007, D) 2007-2011-2013 y E) 2013-2015-2019 63
Figura 5.9. Secuencia de pasos para el análisis de la información 64
Figura 5.10. Ortofoto A) RGB, B) NIR C) Red, D) Green y E) Red Edge del API PAM 20 71
Figura 5.11. Índices de vegetación: NDRE (a la izquierda) y NDVI (a la derecha) 73
Figura 6.1. Concentraciones de metales totales en muestras de los residuos mineros, en comparación con el rango de concentraciones de la corteza, según Rudnick (2014) 86
Figura 6.2. Prueba ABA de muestras de residuos mineros (PAM-16, PAM-23 y PAM-54) analizadas con a) criterio 1 y b) criterio 2 87
Figura 6.3. Resultado de análisis mineralógico por microscopia óptica, que muestra la distribución de los minerales reportados en PAM-23 88
Figura 6.4. Minerales reportados en el análisis mineralógico por difracción de rayos X en muestras de residuos mineros 88
Figura 6.5. Concentraciones de metales en la prueba de lixiviación *shake flask* metales en muestras de residuos mineros 88
Figura 6.6. Concentraciones de aniones en la prueba de lixiviación *shake flask* aniones en muestras de residuos mineros 89
Figura 6.7. Resultados de la extracción secuencial de Dold para las muestras de residuos mineros a) PAM-16, b) PAM-54 y c) PAM-23 90
Figura 6.8. Diagrama de Piper que muestra la composición de iones mayoritarios en las muestras de agua residual y turbinada 93
Figura 6.9. Dendrograma que muestra los grupos jerárquicos entre los puntos de muestreo de agua residual y turbinada (método «Ward») 95
Figura 6.10. Puntuaciones de los componentes principales, con ubicación de los puntos de muestreo de agua residual y agua turbinada separados por clústers 96
Figura 6.11. Configuración geológica a lo largo del río San Juan, consolidado a partir del cuadrángulo de Cerro de Pasco Hoja 22-k del Ingemmet 100
Figura 6.12. Concentraciones de metales totales en muestras de roca, en comparación con el rango de concentraciones de la corteza, según Rudnick (2014) 101

Figura 6.13. Prueba ABA de muestras de roca (CGR-SJ-09, CGR-SJ-12 y CGR-SJ-13) analizadas con a) criterio 1 y b) criterio 2 102
Figura 6.14. Resultado de análisis mineralógico por microscopia óptica, que muestra la distribución de los minerales reportados en muestras de roca 103
Figura 6.15. Concentraciones de metales totales en muestras de roca a) a lo largo del río San Juan, b) tributarios al río San Juan, y en muestras de c) sedimentos fluvio-aluviales del río Ragra mezclados con residuos mineros, en comparación con el rango de concentraciones de la corteza según Rudnick (2014)..... 107
Figura 6.16. Prueba ABA de muestras de roca (Ragra1, Ragra2, Ragra3, Ragra4, Ragra5 y Ragra6) analizadas con el a) criterio 1 y b) criterio 2 108
Figura 6.17. Minerales reportados en el análisis mineralógico por difracción de rayos X en muestras de roca (sedimentos fluviales y fluvio-aluviales de los ríos San Juan y Ragra respectivamente)..... 109
Figura 6.18. Distribución de elementos químicos según la ocurrencia de minerales a lo largo del río San Juan, según el análisis mineralógico por microscopia electrónica de barrido en roca (sedimentos fluviales y fluvio-aluviales de los ríos San Juan y Ragra respectivamente) 113
Figura 6.19. Concentraciones de metales en la prueba de lixiviación *shake flask* metales en muestras de roca (sedimentos fluvio-aluviales del río Ragra) 114
Figura 6.20. Concentraciones de aniones en la prueba de lixiviación *shake flask* aniones en muestras de roca (sedimentos fluvio-aluviales del río Ragra) 114
Figura 6.21. Resultados de la extracción secuencial de Dold para las muestras roca a) Ragra2, b) Ragra3, c) Ragra4, d) Ragra5 y e) Ragra6 115
Figura 6.22. Diagrama spyder de los umbrales de niveles de fondo hallados mediante los métodos y criterios de la media (línea roja), la mediana (línea azul) y diagrama de cajas y bigotes (línea amarilla), para la distribución de elementos en la subcuenca del río San Juan..... 116
Figura 6.23. Diagrama de Piper que muestra la composición de iones mayoritarios en el agua superficial (río San Juan y aportantes) 122
Figura 6.24. Dendrograma que muestra los grupos jerárquicos entre los puntos de muestreo del agua superficial en el río San Juan y aportantes (método «Ward») 125
Figura 6.25. Puntuaciones de los componentes principales, con ubicación de los puntos de muestro de agua superficial separados por clústers 126
Figura 6.26. Representación gráfica del ICA-PE en el río San Juan y aportantes a) parte alta y B) parte baja. 130
Figura 6.27. Riqueza absoluta de especies de perifiton vegetal según especie en los cuerpos de agua del área de estudio evaluada..... 138
Figura 6.28. Número de especies en relación con el gradiente altitudinal por punto de muestreo 139
Figura 6.29. Riqueza de especies de perifiton vegetal por phylum en los puntos de muestreo 139
Figura 6.30. Abundancia relativa de la comunidad de perifiton vegetal según orden en los cuerpos de agua del área de estudio evaluada..... 140
Figura 6.31. Abundancia total de organismos/cm^2 de perifiton vegetal en agosto de 2020 140
Figura 6.32. Abundancia de perifiton vegetal..... 140
Figura 6.33. Riqueza de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por orden..... 143
Figura 6.34. Abundancia de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por orden..... 145
Figura 6.35. Concentraciones de a) arsénico, b) bario, c) cadmio, d) mercurio y e) plomo en el API PAM 20, comparados con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores del nivel de fondo 151
Figura 6.36. Concentraciones de a) cobre, b) plata, c) selenio y d) zinc en el API PAM 20, comparados con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y valores del nivel de fondo..... 153

Figura 6.37. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el API PAM 20 154
Figura 6.38. Índices de vegetación (NDVI y NDRE) de la formación vegetal mixta del API PAM 20 155
Figura 6.39. a) Ortofoto RGB, b) NIR c) Red, d) Green, e) Red Edge) y f) DEM del API PAM 20 156
Figura 6.40. Índice de vegetación (NDVI) y muestreo de suelo 157
Figura 6.41. Índice de vegetación (NDRE) y muestreo de suelo 158
Figura 6.42. Concentraciones de a) arsénico, b) bario, c) cadmio, d) mercurio y e) plomo en el API MF, comparados con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores del nivel de fondo 159
Figura 6.43. Concentraciones de a) cobre, b) plata, c) selenio y d) zinc en el API MF, comparados con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y valores del nivel de fondo 161
Figura 6.44. Concentraciones de a) arsénico, b) bario, c) cadmio, d) mercurio y e) plomo en el API PAM 22, comparados con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores del nivel de fondo 163
Figura 6.45. Concentraciones de a) cobre, b) plata, c) selenio y d) zinc en el API PAM 20, comparados con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y valores del nivel de fondo 164
Figura 6.46. Índices de vegetación (NDVI y NDRE) de la formación vegetal mixta del API PAM 22 165
Figura 6.47. a) Ortofoto RGB, b) NIR c) Red, d) Green, e) Red Edge) y f) DEM del API PAM 22 166
Figura 6.48. Índice de vegetación (NDVI) y muestreo de suelo 167
Figura 6.49. Índice de vegetación (NDRE) y muestreo de suelo 168
Figura 6.50. Concentraciones de a) arsénico, b) bario, c) cadmio, d) mercurio y e) plomo en el API PRS (superficial), comparados con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores del nivel de fondo 170
Figura 6.51. Concentraciones de a) cobre, b) plata, c) selenio y d) zinc en el API PAM 20, comparados con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y valores del nivel de fondo 172
Figura 6.52. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-PRS-05A (muestreo superficial) del API PRS 175
Figura 6.53. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-PRS-11A (muestreo superficial) del API PRS 175
Figura 6.54. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-PRS-25A (muestreo superficial) del API PRS 178
Figura 6.55. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-PRS-21A (muestreo superficial) del API PRS 178
Figura 6.56. Concentraciones de a) arsénico, b) bario, c) cadmio, d) mercurio y e) plomo en el API PRS (profundidad), comparados con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores del nivel de fondo 180
Figura 6.57. Concentraciones de a) cobre, b) plata, c) selenio y d) zinc en el API PAM 20, comparados con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y valores del nivel de fondo 182
Figura 6.58. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-PRS-21A (muestreo a profundidad) 183

Figura 6.59. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CA-04B (muestreo a profundidad) del API PRS 185
Figura 6.60. Concentraciones de a) arsénico, b) bario, c) cadmio, d) mercurio y e) plomo en el API DR (superficial), comparados con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores del nivel de fondo 188
Figura 6.61. Concentraciones de f) cobre, g) plata, h) selenio y i) zinc en el API DR (superficial) comparados con el valor del ECA-2017 para suelo y el valor del nivel de fondo 190
Figura 6.62. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio, y plomo; y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-DR-23A (muestreo superficial) del API DR 193
Figura 6.63. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio, y plomo; y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-DR-25A (muestreo superficial) del API DR 193
Figura 6.64. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo; y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-DR-04A (muestreo superficial) del API API DR 196
Figura 6.65. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo; y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-DR-01A (muestreo superficial) del API DR 196
Figura 6.66. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo; y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-DR-26 (muestreo superficial) del API DR 197
Figura 6.67. Resultados del análisis granulométrico de las muestras del API DR 198
Figura 6.68. Triangulo textural de las muestras obtenidas del análisis granulométrico del API DR 198
Figura 6.69. Índices de vegetación (NDVI y NDRE) de la formación vegetal mixta del API DR 201
Figura 6.70. a) Ortofoto RGB, b) NIR c) Red, d) Green, e) Red Edge), y f) DEM del API DR 202
Figura 6.71. Índice de vegetación (NDVI) y muestreo de suelo 204
Figura 6.72. Índice de vegetación (NDRE) y muestreo de suelo 205
Figura 6.73. Concentraciones de a) arsénico, b) bario, c) cadmio, d) mercurio, y e) plomo en el API PAM 50 comparados con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores del nivel de fondo 208
Figura 6.74. Concentraciones de f) cobre, g) plata, h) selenio y i) zinc en el API PAM 50 comparados con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y valores del nivel de fondo 209
Figura 6.75. Índice de vegetación (NDVI y NDRE) de la formación vegetal mixta del API PAM 50 210
Figura 6.76. a) Ortofoto RGB, b) NIR c) Red, d) Green y e) Red Edge), f) DEM del API PAM 50 211
Figura 6.77. Índice de vegetación (NDVI) y muestreo de suelo 212
Figura 6.78. Índice de vegetación (NDRE) y muestreo de suelo 213
Figura 6.79. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto MF-12C-A (muestreo superficial) del nivel de fondo C 215
Figura 6.80. Resultados del análisis granulométrico de la muestra de nivel de fondo MF-12C-A 216
Figura 6.81. Triangulo textural de las muestras obtenidas del análisis granulométrico del nivel de fondo 216
Figura 6.82. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto MF-12D-A (muestreo superficial) del nivel de fondo D 220
Figura 6.83. Porcentaje de especies por Clase registrado en el área de estudio 222

Figura 6.84. Familias más diversas, indicando número de géneros y especies, registradas en el área de estudio 223
Figura 6.85. Familias con mayor porcentaje de especies, por encima del 5 % de especies registradas en el área de estudio 223
Figura 6.86. Géneros con mayor número de especies registradas en el área de estudio 224
Figura 6.87. Formas de crecimiento de la flora vascular registrada en el área de estudio 224
Figura 6.88. Número de especies y familias presentes en las formaciones vegetales en el área de estudio 225
Figura 6.89. Concentración de metales (mg/kg) registrados en *Festuca rigescens* 227
Figura 6.90. Concentración de metales (mg/kg) registrados en *Festuca rigescens* 228
Figura 6.91. Concentración de metales (mg/kg) registrados en *Festuca rigescens* 229
Figura 6.92. Concentración de metales (mg/kg) registrados en *Plantago tubulosa* 230
Figura 6.93. Concentración de metales (mg/kg) registrados en *Dactilys glomerata* 231
Figura 6.94. Curva de acumulación de especies en el área de estudio 236
Figura 6.95. Diversidad de anfibios (números de Hill, q = 0, 1 y 2) en el área de estudio 237
Figura 6.96. Análisis de componentes principales (CP) con concentraciones de metales en los tejidos de anfibios registrados en el área de estudio 241
Figura 6.97. Concentración de metales y metaloides en anfibios y sedimento en el área de estudio 242
Figura 7.1. Ubicación de muestras de roca y configuración geológica a lo largo del río San Juan, consolidado a partir del cuadrángulo de Cerro de Pasco Hoja 22-k del INGEMMET 245
Figura 7.2. Minerales reportados en el análisis mineralógico por difracción de rayos X en muestras de roca (sedimentos fluviales y fluvio-aluviales de los ríos San Juan y Ragra respectivamente) ordenados de la cabecera de subcuenca San Juan hacia el delta Upamayo 246
Figura 7.3. Distribución de elementos de interés de acuerdo a la presencia de minerales en traza, reportados en el análisis mineralógico por microscopia electrónica de barrido en muestras de roca (sedimentos fluviales y fluvio-aluviales de los ríos San Juan y Ragra respectivamente), ordenados desde la cabecera de subcuenca hacia el delta Upamayo 248
Figura 7.4. Umbral del nivel de referencia para la subcuenca San Juan, de acuerdo a los criterios de la media (líneas de color rojo), la mediana (líneas de color azul) y el diagrama de cajas (líneas de color amarillo) 249
Figura 7.5. Concentraciones de metales en muestras de roca versus nivel de referencia para la subcuenca San Juan (líneas de color rojo) 249
Figura 7.6. Concentraciones de metales en muestras de depósitos fluviales y fluvio-aluviales a lo largo del río San Juan, sin tomar en cuenta los tributarios (líneas de color azul) versus nivel de referencia para la subcuenca San Juan (líneas de color rojo) 250
Figura 7.7. Comparación de las concentraciones de metales en muestras de depósitos fluviales y fluvio-aluviales de los tributarios (líneas de color celeste), y los ríos Ragra, Huaraupampa, Culcalhuain y Sin Nombre (líneas de color naranja) versus nivel de referencia para la subcuenca San Juan (líneas de color rojo) 250
Figura 7.8. Comparación de las concentraciones de metales en muestras de depósitos fluviales y fluvio-aluviales de los 4 tributarios con mayor aporte al río San Juan versus nivel de referencia para la subcuenca San Juan (líneas de color rojo) 251
Figura 7.9. Sedimentos cuaternarios fluviales y fluvio-aluviales del río Ragra con residuos mineros 252
Figura 7.10. Esquema de ubicación de agua turbinada y aguas residuales 254
Figura 7.11. Agua turbinada procedente de la mini central eléctrica. A) Puntos de descarga y recorrido hacia el río San Juan, B) salida del agua turbinada y C) flujo de agua turbinada 255

Figura 7.12. Agua residual doméstica del centro poblado Jurajhuanca. A) Zona donde sale el agua residual doméstica, se observa el poblado Jurajhuanca y B) zona donde sale el agua residual doméstica, se observa la mini central eléctrica 256
Figura 7.13. A) Agua residual doméstica del centro poblado de Rancas y su recorrido hasta su descarga en el río San Juan, B) zona de descarga y C) caja de pase de la tubería que conduce el agua residual doméstica 256
Figura 7.14. A) Esquema de ubicación del punto de muestreo DRSjua-07B (agua residual) y antiguo cauce del río Ragra, B) ubicación del punto de descarga y delimitación de Compañía Minera Aurífera Aurex S.A. y poblado Jurajhuanca y C) vista del punto de descarga debajo de una piedra 257
Figura 7.15. Imágenes de la zona de desembocadura del río Ragra al río San Juan extraídas del Google Earth, donde se observa los cauces antiguos A) 2005 y B) 2013 y cauces actuales C) 2015 y D) 2019 258
Figura 7.16. Esquema de ubicación de los puntos de muestreo de agua superficial en el río Ragra 259
Figura 7.17. Esquema de ubicación de puntos de las aguas residuales domésticas (DFS-01 y AR-01) y agua superficial 260
Figura 7.18. Valores de potencial de hidrógeno en agua superficial comparados con los ECA para agua 2017, categoría 3 y valores de pH en agua turbinada y residual 261
Figura 7.19. Valores de conductividad, y concentraciones de oxígeno disuelto y aceites y grasas de agua superficial comparados con los ECA para agua 2017, categoría 3 y valores de estos parámetros en agua turbinada y residual 262
Figura 7.20. Concentraciones de DBO_5, DQO y sulfatos de agua superficial comparados con los ECA para agua 2017, categoría 3 y valores de estos parámetros en agua turbinada y residual 263
Figura 7.21. Concentraciones de cobre total, hierro total y manganeso total de agua superficial comparados con los ECA para agua 2017, categoría 3 y valores de estos parámetros en agua turbinada y residual 264
Figura 7.22. Concentraciones de plomo total, zinc total y coliformes termotolerantes de agua superficial comparados con los ECA para agua, categoría 3 y valores de estos parámetros en agua turbinada y residual 265
Figura 7.23. Esquema de la ubicación de los API-20 y API-22 respecto al río San Juan 266
Figura 7.24. Valores históricos en conductividad, sulfatos, cobre y manganeso en el punto de muestreo RSjua-03 267
Figura 7.25. Ubicación de los puntos de muestreo DYura-01 y DCLT50Kv y de los puntos de agua superficial SJ-3 y RSjua-07 en el río San Juan 268
Figura 7.26. Ubicación de los puntos de muestreo DRSjua-07 y DRSjua-07B y de los puntos de agua superficial RSjua-07 y SJ-12 en el río San Juan 269
Figura 7.27. Ubicación de los puntos de muestreo SJ-11, SJ-12 y RSjua-08 271
Figura 7.28. Resultados históricos (ANA-2012 a 2018 y OEFA-2020) de conductividad, coliformes termotolerantes, sulfatos, manganeso, plomo y zinc en los puntos de muestreo SJ-02A, SJ11 y RSjua-08A 273
Figura 7.29. Ubicació de los puntos de muestreo SJ-02A, SJ11 y RSjua-08A 273
Figura 7.30. Esquema de ubicación de puntos de las aguas residuales domésticas DFS-01 y AR-01 y aguas superficiales 274
Figura 7.31. Esquema de ubicación de puntos de las aguas superficiales RSjua1, RSjua-12, RSjua-13 y RSjua-14 275
Figura 7.32. A) Comparación de las concentraciones de Fe, Al, As, Pb, Zn, Cd, Hg, Cu, Ni, Ca, Mn, Ba, Mo, Ag entre los sedimentos del río San Juan y sus tributarios, y B) predominancia de hierro y calcio (%) 276
Figura 7.33. Ubicación de los puntos RSjua-07, SJ-12 (CSG-SJ-20), SJ-10 (Ragra6, Ragra5, Ragra4, Ragra1, CSG-SJ-22), RSjua-08 (CSG-SJ-19), RSjua-08A (CSG-SJ-18), además se observa los depósitos de sedimentos fluvio-aluviales mezclados con residuos mineros dispuestos en ambos márgenes del río Ragra (color ocre) 277

Figura 7.34. Distribución de metales de acuerdo a la presencia de minerales traza reportados en el análisis mineralógico por microscopia electrónica de barrido en muestras de roca (sedimentos fluviales y fluvio-aluviales de los ríos San Juan y Ragra respectivamente) 278
Figura 7.35. Concentraciones de A) arsénico, B) plomo, C) zinc, D) cadmio, E) mercurio y F) cobre en los sedimentos del río San Juan y tributarios, comparados con el valor PEL de la guía canadiense de sedimento 280
Figura 7.36. Concentraciones de A) arsénico, B) plomo, C) zinc, D) cadmio, E) mercurio y F) cobre en los sedimentos del río Huaraupampa, Gashan y Blanco, comparados con el valor PEL de la guía canadiense de sedimento 281
Figura 7.37. Curvas de absorción de metales pesados sobre hidróxidos de hierro (Smith, 1991) 282
Figura 7.38. A) Textura arena arcillosa en el punto RSjua-08A, los puntos RSjuan-07, SJ-12, SJ-10, RSjuan-08 presentan textura arenosa, y B) mapa de pendientes y perfiles de elevación a lo largo del río San Juan, que muestra el suave relieve y las bajas pendientes dominantes de la zona de evaluación, lo que condiciona los desbordes del río San Juan en épocas de avenida extraordinarias 283
Figura 7.39. A) Punto SJ-12, ubicado dentro del sector contemplado en el Estudio de ingeniería de detalle para ejecutar las obras de plan de cierre integral de los pasivos-plano CSL-137800-1-T0-03, donde se presenta los depósitos de sedimentos en el río San Juan, y B) puntos RSjua-07 y SJ-12 ubicados próximos a la exdesembocarura del río Ragra (imagen satelital 2013) 284
Figura 7.40. Factor de enriquecimiento de los sedimentos del río San Juan y sus tributarios 286
Figura 7.41. Índices de geo acumulación en los sedimentos del río San Juan y tributarios ... 288
Figura 7.42. Correlación de la similaridad de especies en los puntos de muestreo mediante el análisis de Coordenadas Principales (PCO) de la comunidad de perifiton vegetal teniendo como referencia los cluster de agua superficial..... 289
Figura 7.43. Correlación mediante el análisis de distancias con el Criterio de información de Akaike corregido (AICc) entre la comunidad de perifiton y parámetros ambientales teniendo como referencia los cluster de agua superficial..... 290
Figura 7.44. Análisis de Coordenadas Principales (PCO) del perifiton vegetal con un nivel de similaridad de 40 % para el agrupamiento y relacionado con los valores de sedimento al 60 % de confianza..... 291
Figura 7.45. Análisis de Coordenadas Principales (PCO) del perifiton vegetal con las especies que presentan una correlación mayor al 60 %. Donde SJ: Río San Juan, RH: Río Huaraupampa, RR: Río Ragra, RG: Río Gashan, RB: Río Blanco, Q1 y Q2: Quebradas sin nombre y RQ: Río sin nombre 292
Figura 7.46. Agrupamiento de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos, según la clasificación de la calidad ecológica (CERA-S)..... 293
Figura 7.47. Mapa de clasificación de la calidad ecológica (CERA-S) y riqueza de especies de macroinvertebrados bentónicos por punto de muestreo en la subcuenca San Juan 294
Figura 7.48. Análisis de correspondencia canónica entre las variables ambientales (agua y sedimento) y la comunidad de macroinvertebrados bentónicos 295
Figura 7.49. Área con evidente retiro de suelo, descubierto para el API PAM 20..... 296
Figura 7.50. Concentraciones de A) arsénico, B) mercurio, C) cadmio, D) plomo y E) bario en el API PAM 20, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y los valores de nivel de fondo 298
Figura 7.51. Diferencias entre suelo removido y suelo con cobertura..... 299
Figura 7.52. Concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc en el API PAM 20, comparadas con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y los valores de nivel de fondo..... 300

Figura 7.53. Distribución espacial de concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo registradas en el API PAM 20, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola 301
Figura 7.54. Distribución espacial de concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc registradas en el API PAM 20, comparadas con los valores de la guía canadiense, uso agrícola 302
Figura 7.55. Imágenes satelitales Landsat de índice de vegetación NDVI desde julio hasta setiembre para 1988, 1999 y 2015 303
Figura 7.56. NDVI de las imágenes satelitales Sentinel 2A de abril para 2016 y de junio para 2020 303
Figura 7.57. Índice de vegetación (NDVI y NDRE) de la formación vegetal césped con parches de bofedal del API PAM 20 304
Figura 7.58. Distribución de los puntos de muestreo de suelo en una formación vegetal césped con parches de bofedal con respecto a los valores del índice de vegetación NDRE 305
Figura 7.59. Concentración de metales obtenidos en *Festuca rigescens* 307
Figura 7.60. A) Vista panorámica del API MF y B) carretera cercana al API MF 308
Figura 7.61. Presencia de animales bovinos consumiendo vegetación en el API MF 308
Figura 7.62. Concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo, comparadas con los valores de los ECA para suelo, uso agrícola y nivel de fondo 309
Figura 7.63. Concentraciones de A) cobre, B) zinc, C) selenio y D) plata en el API MF comparadas con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y nivel de fondo 310
Figura 7.64. Distribución espacial de concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo registradas en el API MF, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola 311
Figura 7.65. Distribución espacial de concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc registradas en el API MF, comparadas con los valores de la guía canadiense, uso agrícola 312
Figura 7.66. Vista panorámica del API PAM 22, donde se aprecia sus puntos de muestreo.. 313
Figura 7.67. Suelo con signos de remoción en el API PAM 22 314
Figura 7.68. Análisis multitemporal de NDVI de la subcuenca San Juan de A) 1988, 1990 y 1994; de B) 1994, 1997 y 1999; de C) 1999, 2005 y 2007; de D) 2007, 2011 y 2013; y de E) 2013, 2015 y 2019..... 315
Figura 7.69. Concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo en el API PAM 22, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores de nivel de fondo 316
Figura 7.70. Concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc en el API PAM 22, comparadas con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y los valores del nivel de fondo 317
Figura 7.71. Distribución espacial de las concentraciones de A) arsénico, B) cadmio, C) mercurio y D) plomo registradas en el API PAM 22, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola 318
Figura 7.72. Distribución espacial de las concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc registradas en el API PAM 22, comparadas con los valores de la guía canadiense, uso agrícola 319
Figura 7.73. Imágenes satelitales Landsat de índice de vegetación NDVI desde julio hasta setiembre para 1988, 1999 y 2015 320
Figura 7.74. NDVI de las imágenes satelitales Sentinel 2A de abril para 2016 y de junio para 2020 320
Figura 7.75. Índice de vegetación (NDVI y NDRE) de la formación vegetal bofedal con parches de césped del API PAM 22 321

Figura 7.76. Distribución de los puntos de muestreo de suelo en una formación vegetal bofedal con parches de césped con respecto a los valores del índice de vegetación NDVI 321
Figura 7.77. Concentración de metales obtenidos en *Plantago tubulosa* 323
Figura 7.78. Concentración de metales obtenidos en *Festuca rigescens* 324
Figura 7.79. Área de potencial interés PRS, A) imagen del 2013 y, B) imagen del 2020 325
Figura 7.80. Concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio, y E) plomo en el API PRS y de los puntos evaluados por el OEFA en el 2015, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y los valores de nivel de fondo 327
Figura 7.81. Concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc en el API PRS y de los puntos evaluados por el OEFA en el 2015, comparadas con los valores de la guía canadiensie de suelo, uso agrícola y los valores de nivel de fondo 328
Figura 7.82. Diferencia de horizontes de las calicatas de A) nivel de fondo y B) API PR 329
Figura 7.83. Concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo en calicatas del API PRS y del nivel de fondo D, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y los valores de nivel de fondo 330
Figura 7.84. Concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc en calicatas del API PRS y del nidel de fondo D, comparadas con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y los valores de nivel de fondo 331
Figura 7.85. Ubicación de los puntos de sedimento, aguas arriba y abajo del API PRS 332
Figura 7.86. Distribución espacial de las concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) plomo, D) mercurio comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola, y las de E) cobre, F) plata y G) selenio comparadas con los valores de la guía canadiense, uso agrícola; registradas en el API PRS 333
Figura 7.87. Distribución espacial de la concentración de A) cadmio comparada con su valor de los ECA para suelo 2017, uso agrícola, y la de B) zinc comparada con su valor de la guía canadiense, uso agrícola; registradas en el API PRS 334
Figura 7.88. Plano topográfico del sector alto del río San Juan, presentado en el plan de cierre integral de pasivos de origen minero río San Juan y delta Upamayo (2014)..... 334
Figura 7.89. Cambio en la topografía del sector 2 del API PRS, donde las imágenes corresponden al A) 2013 y B) 2020 335
Figura 7.90. Sector 2 del API PRS, área con suelo removido y lugar de pastoreo de animales de los pobladores de la comunidad campesina de Yurajhuanca 336
Figura 7.91. Concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) mercurio, y D) plomo a niveles superficial y de profundidad en el sector 2 del API PRS; comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y los valores de nivel de fondo..... 337
Figura 7.92. Concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc a niveles superficial y de profundidad en el sector del API PRS; comparadas con los valores de la guía canadiense, uso agrícola y los valores de nivel de fondo 338
Figura 7.93. Concentración de metales obtenidos en *Dactylis glomerata* 340
Figura 7.94. Ubicación del API DR tanto en referencia al nivel de fondo C como con respecto al río San Juan..... 341
Figura 7.95. Análisis multitemporal de NDVI de la subcuenca San Juan de A) 1988, 1990 y 1994; de B) 1994, 1997 y 1999; de C) 1999, 2005 y 2007; de D) 2007, 2011 y 2013; y de E) 2013, 2015 y 2019..... 342
Figura 7.96. A) Suelos Upamayo C, y B) API DR, con similitudes visuales 343
Figura 7.97. Concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo en los suelos del Upamayo C y el API DR, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y los valores de nivel de fondo 344
Figura 7.98. Concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio, y D) zinc en los suelos del Upamayo C y el API DR comparadas con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y los valores de nivel de fondo 345
Figura 7.99. Distribución de puntos de muestreo en el API DR 346

Figura 7.100. Distribución de puntos por sectores: A) próximo al río San Juan donde se realizó la calicata CA-03, B) punto CS-DR-14 con cobertura vegetal donde no se superó el valor del ECA para suelo, uso agrícola para mercurio, C) canal formado por los desbordes del río San Juan, D) zona con cobertura vegetal y suelo de color oscuro, E) suelo formado por canales producto del desborde del río San Juan, y F) punto extremo del API DR 347
Figura 7.101. Diferencia de horizontes de suelos en: A) calicata API DR con presencia de material de color anaranjado con elevadas concentraciones de metales en referencia a los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola, y B) calicata nivel de fondo sin presencia del material anaranjado y con concentraciones bajas en referencia a los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola 348
Figura 7.102. Concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo, en calicatas del API DR y del nivel de fondo C, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y los valores de nivel de fondo 349
Figura 7.103. Concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y E) zinc en calicatas del API DR y del nivel de fondo C, comparadas con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y los valores de nivel de fondo 350
Figura 7.104. Ubicación de los puntos de sedimento colectados aguas arriba y aguas abajo del API DR 350
Figura 7.105. Distribución de análisis granulométrico entre el API DR, los sedimentos del río San Juan y el nivel de fondo C 351
Figura 7.106. Distribución espacial de las concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo registradas en el API DR, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola 352
Figura 7.107. Distribución espacial de las concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc registradas en el API DR, comparadas con los valores de la guía canadiense, uso agrícola 353
Figura 7.108. Imágenes satelitales Landsat de índice de vegetación NDVI desde julio hasta setiembre para 1988, 1999, 2007 y 2015 354
Figura 7.109. NDVI de las imágenes satelitales Sentinel 2A de abril para 2016 y de junio para 2020 354
Figura 7.110. Índice de vegetación (NDVI y NDRE) de la formación vegetal en recuperación circundado ‘por césped de puna correspondiente al API DR 355
Figura 7.111. Distribución de los puntos de muestreo de suelo en una formación vegetal mixta que se encuentra en recuperación con respecto a los valores del índice de vegetación NDVI 356
Figura 7.112. Especies colectadas para muestras de tejido vegetal: A) *Festuca rigescens* y B) *Azorella diapensioides*, en el API DR 356
Figura 7.113. Concentración de metales obtenidos en *Azorella diapensioides* 358
Figura 7.114. Concentración de metales obtenidos en *Festuca rigescens* 360
Figura 7.115. Vista panorámica del API PAM 50, donde se aprecia sus puntos de muestreo 361
Figura 7.116. Análisis multitemporal de NDVI de la subcuenca San Juan de A) 1988, 1990 y 1994; de B) 1994, 1997 1999; de C) 1999, 2005 y 2007; D) 2007, 2011 y 2013; y E) 2013, 2015 y 2019 362
Figura 7.117. Concentraciones de A) arsénico, B) mercurio, C) plomo, D) cadmio y E) bario en el API PAM 50, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores de nivel de fondo 364
Figura 7.118. Concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc en el API PAM 50, comparadas con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y los valores del nivel de fondo 365
Figura 7.119. Distribución espacial de concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo registradas en el API PAM 50, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola 366

Figura 7.120. Distribución espacial de las concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc registradas en el API PAM 50, comparadas con los valores de la guía canadiense, uso agrícola 367
Figura 7.121. Imágenes satelitales Landsat de índice de vegetación NDVI desde julio hasta setiembre para 1988, 1999 y 2015 368
Figura 7.122. NDVI de las imágenes satelitales Sentinel 2A de abril para 2016 y de junio para 2020 368
Figura 7.123. Índice de vegetación (NDVI y NDRE) de la formación vegetal en recuperación circundado por césped de puna correspondiente al API PAM 50 369
Figura 7.124. Distribución de los puntos de muestreo de suelo en una formación vegetal mixta que se encuentra en recuperación con respecto a los valores del índice de vegetación NDVI 370
Figura 7.125. Concentración de metales obtenidos en *Festuca rigescens* 372
Figura 7.126. Especies de anfibios registrados en el río San Juan y la quebrada sin nombre Qsnom02: *Rhinella spinulosa* A) adulto, B) subadulto y C) juvenil, y *Pleurodema marmoratum* D) y E) adultos, con patrones de coloración distintos 373

LISTADO DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

SIGLA

DGM: Dirección General de Minería

LMP: Límites Máximos Permisibles

Acrónimo

ABA: Balance ácido-base

DAM: Drenaje Ácido de Mina

DAR: Drenaje ácido de roca

DEAM: Dirección de Evaluación Ambiental

Digesa: Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria

Diresa: Dirección Regional de Salud de Pasco

Dgaam: Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros

DSEM: Dirección de Supervisión Ambiental en Energía y Minas

ECA: Estándar de Calidad Ambiental

GORE Pasco: Gobierno Regional de Pasco

Inacal: Instituto Nacional de Calidad

Ingemmet: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico

Inrena: Instituto Nacional de Recursos Naturales

Minam: Ministerio del Ambiente

Minem: Ministerio de Energía y Minas

Minsa: Ministerio de Salud

OEFA: Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental

PAM: Pasivos Ambientales Mineros

Simco: Sistema de Monitoreo de Conflictos Sociales

Sinada: Servicio de Información Nacional de Denuncias Ambientales

1 INTRODUCCIÓN

La evaluación ambiental de causalidad en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo, cuya remediación de estos están a cargo de las empresas Activos Mineros S.A.C. (antes Centromin Perú S.A.), Sociedad Minera El Brocal S.A.A., Empresa Administradora Cerro S.A.C.[1] (antes Volcan Compañía Minera S.A.A.) y Compañía Minera Aurífera Aurex S.A.[2]; se realizó con la finalidad de abordar parte de la compleja problemática socioambiental en la ciudad de Cerro de Pasco. Señalar que, dicha ciudad fue declarada por el Minam en emergencia ambiental en el 2012[3] y por el Minsa en emergencia sanitaria en el 2017[4]. Por lo que, la problemática descrita estaría vinculada con las actividades mineras desarrolladas en la zona, las cuales comenzaron incluso antes de la época colonial y continúan hasta la actualidad.

El área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo, abarca parte de la subcuenca del río San Juan (17,8 %) en las provincias Daniel Alcides Carrión y Pasco, departamento Pasco[5]. La subcuenca se encuentra en la parte central del Perú y a una altitud entre los 4000 m s. n. m. y 4400 m s. n. m.; además, forma parte de la cuenca del río Mantaro en la vertiente hidrográfica del Atlántico. La red hidrográfica del área de estudio comprende al río San Juan desde su naciente hasta la desembocadura en el delta Upamayo, en la parte alta de dicha subcuenca se destacan los rasgos glaciares en el paisaje, presentando valles en forma de «U», depósitos morrénicos y lagunas altoandinas, precisamente una de ellas es la laguna Alcacocha, la misma que da origen al río San Juan; aguas abajo, este río recibe los aportes de sus semejantes Quicay, Ragra, Culcalhuain, Huaraupampa, Gashan, Tinragra, Blanco, entre otros; cabe precisar que, la parte media se desarrolla en una terraza de inundación donde se aloja la mayor parte de la actividad agrícola y ganadera de la zona, y en la parte baja se extiende un sistema meándrico que desemboca en un delta bien desarrollado hacia el embalse Upamayo (antes de la construcción de la presa llamado laguna Chinchaycocha chica)[6].

En la parte media y baja de la subcuenca, se concentran diversas actividades económicas productivas del rubro minero, además de los pasivos ambientales mineros (PAM depósito de desmontes Excelsior, PAM depósito de relaves Quiulacocha y los pasivos ambientales de origen minero río San Juan y delta Upamayo), PAM previos a las actividades de Centromin Perú S.A. (generados por la otrora Cerro de Pasco Corporation y relaves coloniales) sin responsable e inventariados por el Minem[7], y actividades de pequeña minería

[1] Extraído de la Resolución Ministerial N.° 284-2012-MEM/DM aprobado el 18 de junio de 2012, que indica: «Escrito N° 2184942 del 24 de abril del 2012, la Empresa Administradora Cerro S.A.C dio a conocer que, como consecuencia de la reorganización simple acordada por la juntas generales de accionistas de Volcan Compañía Minera S.A.A. (Volcan) y Empresa Administradora Cerro S.A.C., Volcan transfirió a esta última empresa un bloque patrimonial, debidamente inscrita en los asientos B00018 y B0001 de las partidas Ns 11363057 y 12604031 respectivamente, dejando expresa constancia que cumplirá con todas las obligaciones legales, respetando los acuerdos que adopte para llevar a cabo la remediación ambiental de pasivos de origen minero en el río San Juan, delta Upamayo y parte norte del lago Chinchaycocha.»

[2] Extraído del «Plan de cierre integral de pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo», aprobado mediante Resolución Directoral N.° 001-2009-MEM/AAM, el 6 de enero de 2009.

[3] Extraído de la «Declaratoria de emergencia ambiental en las localidades de Champamarca, Quiulacocha, Paragsha y Asentamiento Humano José Carlos Mariátegui, situadas en el distrito de Simón Bolívar, provincia y departamento de Pasco», aprobado mediante Resolución Ministerial N.° 117-2012-MINAM.

[4] Extraído de la «Declaratoria de emergencia sanitaria por el plazo de 90 días calendario, los distritos de Chaupimarca y Simón Bolívar de la provincia y departamento de Pasco», aprobado mediante Decreto Supremo N.° 020-2017-SA.

[5] Información extraida de: http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/, el 5 de agosto de 2020.

[6] Extraído del «Plan de cierre integral de pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo», aprobado mediante Resolución Directoral N° 001-2009-MEM/AAM, el 6 de enero de 2009, folio 15.

[7] Extraída de: «Aprobar la actualización del Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros», aprobado mediante por Resolución Ministerial N.° 238-2020-MEM/DM, el 24 de agosto de 2020.

(Compañía Minera Aurífera Aurex S.A.); también se desarrollan otras actividades, tales como: minería no metálica (canteras de cal y canteras de agregados), centrales hidroeléctricas (Jupayragra y mini central de Yurajhuanca) y descarga de aguas residuales domésticas poblacionales, las cuales estarían ocasionando una afectación sobre los componentes ambientales, debido a que se han reportado diversas denuncias ambientales por parte de la población[8]; por ejemplo, una de las últimas denuncias reportadas en abril de 2020, fue la coloración amarillenta del río San Juan.

Mediante Memorando N.° 00670-2020-OEFA/DSEM de 12 de marzo de 2020, la DSEM, solicitó a la DEAM efectuar acciones de evaluación ambiental de causalidad en el área de la subcuenca del río San Juan; además, con Memorando N.° 2242-2020-OEFA/DSEM de 6 de octubre de 2020, la DSEM encarga la labor de supervisión a los evaluadores de la DEAM a cargo de la Evaluación ambiental de causalidad en la unidad fiscalizable pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo.

La presente evaluación ambiental de causalidad constó de 3 etapas: la primera fue la planificación de la evaluación, que consistió en la definición de los objetivos, revisión de la información relevante, coordinaciones con otras entidades públicas; la segunda fue la ejecución, la cual radicó en el desarrollo de acciones técnicas[9] en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo, para eso se ejecutaron 2 salidas a campo; finalmente, la tercera etapa comprendió los resultados, que está relacionado al análisis y procesamiento de la información recopilada en las etapas previas.

La primera ejecución se realizó del 8 al 25 de agosto de 2020, donde se colectaron muestras de agua superficial, agua turbinada, agua residual doméstica, sedimento, comunidades hidrobiológicas en el río San Juan y sus tributarios; además, se colectaron muestras de roca y residuos mineros. La segunda ejecución se realizó del 13 al 30 de setiembre de 2020, donde se colectaron muestras de suelos, roca, residuos mineros, flora y fauna con el objeto de caracterizar y cuantificar el grado de afectación producto de las principales actividades desarrolladas en el área de estudio; asimismo, se realizó el levantamiento fotogramétrico con RPAS[10] con fines de obtener un ortomosaico RGB, ortomosaico multiespectral y modelo digital del terreno del área de estudio.

La coloración amarillenta del río San Juan en época de avenida estaría asociado a la disposición de sedimentos fluvio-aluviales mezclados con residuos sulfurosos que se encuentran en ambas márgenes del río Ragra (área aproximada de 8800 m^2) identificados como fuentes contamianantes, estos residuos generan un lixiviado ácido con altas concentraciones de elementos tóxicos y sulfatos, por el proceso denominado drenaje ácido de mina (AMD, sigla del inglés *Acid Mine Drainage*), estos lixiviados producen la degradación de la mayor parte de la red fluvial del río San Juan. Mencionar que, la presente evaluación se realizó en época de estiaje; sin embargo, los parámetros que caracterizan los drenajes ácidos de mina (DAM) y las aguas afectadas por DAM (*i. e.* sólidos en suspensión, sulfatos, pH y metales) se manifiestan principalmente en época de avenida, por lo que se sugiere complementar el estudio en dicha época, además de estudiar la parte norte del lago Chinchaycocha.

---

8 Información extraida de: https://www.oefa.gob.pe/sinada/, el 4 de agosto de 2020.

9 **Reglamento de Evaluación del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental – OEFA**
«(…)
Artículo 5.- Definiciones
Para efecto del presente Reglamento se emplean los siguientes términos
a) **Acciones técnicas:** aquellas acciones con base científica para la obtención de información relevante en campo y análisis sistemático para el cumplimiento del objeto de cada tipo de evaluación, que comprenden muestreo, monitoreo, vigilancia, estudios especializados, mediciones de campo, entre otras.
(…)»

10 RPAS, sigla del inglés *Remotely Piloted Aircraft System*, que significa sistema de aeronave pilotada a distancia.

Por tal motivo, la presente evaluación ambiental de causalidad en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo (en adelante, EAC PRSJDU) tiene por finalidad, identificar posibles fuentes de alteración en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo, así como, contribuir a la solución de la problemática socioambiental de la zona (relacionadas a las denuncias ambientales registradas) y en cumplimiento del encargo de la DSEM. La presente EAC PRSJDU contiene los resultados, análisis y conclusiones obtenidas de la evaluación ambiental de la calidad de agua, sedimento, suelo, comunidades hidrobiológicas, la geoquímica de roca y residuos mineros, así como de los estudios de levantamiento fotogramétrico y niveles de toxicidad de sedimento y agua superficial; la cual constituirá un soporte técnico para las acciones de supervisión y fiscalización ambiental del OEFA, y formarán parte del expediente N.º 193-2020-DSEM-CMIN.

2 ANTECEDENTES

Las actividades mineras en la ciudad de Cerro de Pasco, se desarrollaron desde la época colonial, comenzaron con la explotación de la plata (Ag). En 1901 llegó a dicha ciudad la empresa Cerro de Pasco Invesment Company (posteriormente llamada Cerro de Pasco Copper Corporation – CPCC), que propició el crecimiento y desarrollo de la misma en la microcuenca del río Ragra; también se registran la participación de empresas que ya han cesado sus operaciones, entre las cuales se destacan Huaron S.A., Milpo S.A., y principalmente, Centromin Perú[11].

En 1956, la unidad económica administrativa Cerro de Pasco (yacimiento Cerro de Pasco), una de las más importantes a nivel regional, empieza la explotación de los cuerpos de plomo, zinc y plata del tajo abierto Mc Cune Pit (actualmente, llamado Raúl Rojas); posteriormente en 1974, se creó Centromin Perú S.A. a partir de la estatización de la empresa norteamericana; esta empresa luego, en 1997, crea la subsidiaria Empresa Minera Paragsha S.A. de Centromin Perú S.A. e inicia sus actividades construyendo la planta de tratamiento de aguas ácidas. Finalmente, en 1999 Volcan Compañía Minera S.A.A. adquiere la Empresa Paragsha S.A., mediante proceso de privatización, creándose así la Unidad Económica Administrativa (U.E.A.) Cerro de Pasco.

La unidad Colquijirca inicia sus actividades, en 1890, mediante la explotación de labores subterráneas y producción de minerales de plomo, plata, zinc y cobre; posteriormente, a comienzos del siglo XX la mina fue explotada por Eulogio Fernandini de la Quintana, quien instaló una pequeña fundición para la producción de barras de plata llamada Huraucaca, esta se ubicó a pocos kilómetros tanto de la fundición Tinyahuarco como de en ese entonces pueblo de Cerro de Pasco. Para el abastecimiento de suministro eléctrico de la unidad Colquijirca, en 1909, se construye la central hidroeléctrica Río Blanco y, en 1924, se construye la central hidroeléctrica Jupayragra, la misma que hasta hoy funciona y abastece de suministro eléctrico a dicha unidad minera. En 1956, la empresa queda registrada bajo su razón social actual, como Sociedad Minera El Brocal S.A. y se da inició a la explotación a tajo abierto hasta la actualidad.

Por otro lado, otra unidad económica administrativa, fue la administrada por la Compañía Minera Aurífera Aurex S.A. que ha explotado, desde 1999, los depósitos de relaves amalgamación de la actividad minera colonial en su planta Andes, ubicada en el cauce del exrío Ragra antes de la confluencia con el río San Juan[12].
Producto de las actividades mineras antes mencionadas, que iniciaron en la década de los 30 hasta la actualidad, se generaron los depósitos acumulados en el río San Juan y en el

[11] Extraído de la Resolución Directoral N.° 001-2009-MEM/AAM, de 6 de enero de 2009.
[12] Extraído del Plan de cierre integral de pasivos de origen minero río San Juan y delta Upamayo, con hoja de trámite 2013-E01- 004030, folios 15 y 16.

delta Upamayo; cabe precisar que, hasta finales de los años noventa, la disposición de relaves y efluentes era una actividad que no consideraba los factores ambientales como un punto principal. Recién, en 1996, las descargas mineras comienzan a ser seriamente controladas, pues el Estado exigía a las empresas los Programas de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA[13]).

El 19 de enero de 2002, se promulgó la Ley N.° 27642, Ley que declara en emergencia ambiental la Reserva Nacional de Junín, creándose la Comisión Multisectorial Descentralizada (CMD), encargada de elaborar el Plan y sistema de manejo ambiental sostenible del lago Chinchaycocha (en adelante, Plan Chinchaycocha). Posteriormente, el Plan Chinchaycocha, fue aprobado mediante Resolución Suprema N° 551-2002-PCM, publicado el 18 de diciembre de 2002, la cual consideraba la instalación del Comité de Gestión Ambiental Chinchaycocha, con sus respectivos subcomités, a fin de llevar a cabo los programas de manejo enmarcados en dicho plan.

El 31 de octubre de 2003 se reunieron los representantes de las empresas mineras: «Sociedad Minera El Brocal S.A.A., Volcan Compañía Minera S.A.A., Compañía Minera Aurífera Aurex S.A., Centromin Perú S.A. (hoy Activos Mineros S.A.C.)» y los representantes de la Dirección General de Minería (DGM), que contó con la participación de María Chappuis Cardich, entonces directora de la DGM, en calidad de veedora. Producto de dicha reunión se eligió a la consultora Water Management Consultants (Perú) S.A. a efectos de que realice el estudio para la determinación de responsabilidades y las alternativas de acciones a realizar para la remediación de los PAM, ubicados en el río San Juan y delta Upamayo[14].

En el 2004, mediante la Resolución Suprema N.° 092-2004-PCM, se conformó el Comité de Gestión Ambiental Chinchaycocha, como una instancia de coordinación, concertación, planificación e información; que tiene entre otras funciones, la de facilitar la coordinación intersectorial e interinstitucional para la implementación del Plan Chinchaycocha, así como actualizarla, monitorear su implementación y reportar sus avances. Parte de las entidades involucradas son los ministerios de: (i) Energía y Minas, (ii) Ambiente, (iii) Vivienda, (iv) Producción, entre otros actores como el OEFA, gobiernos regionales y municipalidades provinciales y distritales, representantes de las comunidades ribereñas del lago Chinchaycocha, representantes de las empresas generadoras de energía de Pasco y Junín, Electroandes S.A. (Hoy, Statkfraft Perú S.A.) y Electroperú S.A., entre otros actores.

Mediante Escrito N.º 1648361 de 9 de noviembre de 2006, se remitió a la DGM el informe final del «Estudio de Remediación de los Pasivos de Origen Mineros en el Río San Juan, Delta de Upamayo y Parte Norte del Lago Chinchaycocha» elaborado por la consultora Water Management Consultants (Perú) S.A., en adelante «Estudio». Con Informe N.º 182-2007/MEM-AAM/FVF de 15 de febrero de 2007, la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (DGAAM), emitió opinión sobre el Estudio señalando lo siguiente[15]: *«El Estudio desarrollado por Water Management Consultants S.A. ha efectuado un detallado análisis determinando las magnitudes de contaminación y su grado de impacto, basado en la aplicación del concepto de Carga de Masa Química-CMQ para dos periodos, de estiaje y avenidas. En función de esta clasificación se determinó las fuentes históricas de elementos con altas concentraciones químicas e impactos asociados y fuentes actuales de elementos con altas concentraciones químicas».*

13 Programa de Adecuación y Manejo Ambiental, nace con el Reglamento de Protección Ambiental para las actividades minero-metalúrgicas, aprobado mediante Decreto Supremo Nº 016-93-EM de 28 de abril de 1993, que en su capítulo: «De la Adecuación y Manejo Ambiental de la Industria Minera-Metalúrgica» establece la obligación de que los titulares de actividad minera presenten un PAMA con el objetivo de que logren reducir sus niveles de contaminación ambiental hasta alcanzar los niveles máximos permisibles.

14 Informe N.° 013-2012-MEM-DGM/DTM/PAM, aprobado el 20 de enero de 2012 denominado, Remediación de Pasivos Ambientales Mineros (PAMs) del Estudio de Plan de Cierre Integral de los PAMs «Depósitos de sedimentos en el río San Juan» y «Delta Upamayo y parte Norte del Lago Chinchaycocha»

15 Extraído de la Resolución Ministerial N.° 284-2012-MEM/DM aprobado el 18 de junio de 2012

En función de la Carga de Masa Química (CMQ), se ha determinado el valor ponderado de cada fuente de contaminación, lo cual ha permitido determinar los porcentajes de participación asociados a las fuentes de contaminación tanto del sector alto del río San Juan (Aurex 0,21 %, CENTROMIN 66,97 %, Volcán 13,25 %, **Estado Peruano 19,58 %**) como del sector del embalse de Upamayo y lago Chinchaycocha (Aurex 0,08 %, Brocal 50,0 %, CENTROMIN 24,4 %, Volcán 4,8 %, **Estado Peruano 20,8 %)**; que corresponde tanto a las empresas privadas como al Estado, localizadas en el ámbito de la cuenca del río San Juan. Mencionar que, en el informe se señala que *«el Estudio cumple con los objetivos para los cuales ha sido contratado».* (El resaltado es nuestro).

A través de la Resolución Ministerial N.º 079-2008-MEM/DM de 15 de febrero de 2008, sustentada en el Informe N.º 275-2008-MEM-DGM/DNM de 5 de febrero de 2008, se aprobó la inclusión de 4 PAM al inventario inicial de los mismos, señalados en el Informe N.º 045-2008-MEM-DGM/DTM, ubicados en el río San Juan, delta Upamayo y parte norte del lago Chinchaycocha. Dichos pasivos indicados en el último informe señalado son: relavera Quiulacocha, desmontera Excelsior, sedimento en el delta Upamayo y residuos mineros coloniales en las riberas del exrío Ragra y San Juan.

En el ítem N.º 8 del Informe N.º 121-2008-MEM-DGM/DTM de 7 de marzo de 2008, se recomienda convocar a las empresas mineras involucradas y a la consultora que elaboró el Estudio, afín de que expongan ante los funcionarios de la DGM la metodología de participación múltiple empleada en el Estudio presentado al Minem. Asimismo, que la reunión sirva para formalizar el compromiso asumido por las empresas mineras involucradas en la remediación del río San Juan, delta Upamayo y parte norte del Lago Chichaycocha.

Con Informe N.º 703-2008-MEM-DGM/DNM de 17 de marzo de 2008, la Dirección Normativa de Minería (DNM) recomienda continuar con el análisis de la determinación de responsabilidades, se viabilice la remediación de los PAM «Residuos mineros coloniales en las riberas del exrío Ragra y San Juan», aprobado mediante Resolución Ministerial N.º 079-2008-MEM/DM de 15 de febrero de 2008 y «Cancha de desmontes» y «Canchas de desmontes exfundición Tinyahuarco», aprobado mediante Resolución Ministerial N.º 290-2006-MEM/DM.

Por medio de la Resolución Ministerial N.º 164-2008-MEM/DM de 4 de abril de 2008, se resuelve que, excepcionalmente y en función de la debida tutela del interés público, el Estado asuma la remediación de los PAM de alto riesgo: i) Cancha de desmontes y Canchas de desmontes exfundición Tinyahuarco y ii) Residuos mineros coloniales en las riberas del exrío Ragra y San Juan. Señalar que, estos PAM no son contemplados dentro del Estudio ni del análisis de los porcentajes de participación, siendo el Estado Peruano el único responsable de la remediación.

A través de la Resolución Directoral N.º 001-2009-MEM/AAM de 6 de enero de 2009, sustentada en el Informe N.° 010-2009-MEM-AAM/SDC/ABR/RST de 5 de enero de 2009; se resuelve aprobar el «Plan de cierre integral de pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo», presentado por las empresas mineras: Sociedad Minera El Brocal S.A.A., Volcán Compañía Minera S.A.A., Compañía Minera Aurífera Aurex S.A., Centromin Perú S.A. (hoy Activos Mineros S.A.C.); quedando obligadas a cumplir con las especificaciones técnicas contenidas en dicho plan.

Mediante Informe N.º 187-2009-MEM-DGM/DTM de 21 de abril de 2009, se concluyó que los pasivos «Depósitos de sedimento en el río San juan» y «Depósitos del delta Upamayo», señalados en el plan de cierre voluntario por el comité técnico, son del tipo de responsabilidad compartida, es decir, responsabilidades de remediación entre las empresas mineras y el Estado, y que la responsabilidad de este último aún no ha sido validada.

Además, se recomendó constituir una comisión especial a fin de evaluar la participación del Estado en la remediación de los PAM precitados y formalizar el compromiso de las empresas mineras en la remediación del río San Juan, delta Upamayo y lago Chinchaycocha.

En el Informe N.° 013-2012-MEM-DGM/DTM/PAM, referido a la remediación de PAM del Estudio de plan de cierre integral de los PAM «depósito de sedimento en el río San Juan» y «delta Upamayo y parte norte del lago Chinchaycocha» de 20 de enero de 2012; se menciona que los PAM delta Upamayo y sedimento en el río San Juan, fueron generados por aquellos ubicados en la parte alta de las zonas afectadas, los cuales se diferencian por su origen:

- Pasivos de origen minero previos a las operaciones de Centromin Perú.– Son aquellos originados por la otrora empresa Cerro de Pasco Corporation (Escorias de Tinyahuarco) y los relaves mineros dejados desde la época colonial.
- Pasivos de origen minero.- correspondientes a las empresas Aurex, Cía. Minera Volcan, Sociedad Minera el Brocal y la empresa estatal Centromin Perú.
- Pasivos de origen no minero.- Corresponden aquellos originados por las descargas de aguas residuales y de lluvia provenientes de las diferentes zonas de la ciudad de Cerro de Pasco.

A través de la Resolución Ministerial N.° 284-2012-MEM/DM de 18 de junio 2012, se resolvió:

> «***Artículo 1°.-*** *IDENTIFICAR a Compañía Minera Aurífera Aurex S.A. con 0.21%, Activos Mineros S.A.C. (antes CENTROMIN Perú S.A.) con 66.97%, Empresa Administradora Cerro S.A.C (antes Volcan Compañía Minera S.A.A.) con el 13.24%, y al Estado Peruano con 19.58%, como generadores, responsables de la remediación del pasivo ambiental minero "Depósitos de Sedimentos en el Río San Juan", en los porcentajes asignados.*
>
> ***Artículo 2°.-*** *IDENTIFICAR a Compañía Minera Aurífera Aurex S.A. con 0.07%, Sociedad Mineral El Brocal S.A.A con 49.96%, Activos Mineros S.A.C. (antes CENTROMIN Perú S.A.) con 24.42%, Empresa Administradora Cerro S.A.C. (antes Volcan Compañía Minera S.A.A) con el 4.83%, y al Estado Peruano con 20.72%, como generadores, responsables de la remediación del pasivo ambiental minero "Delta Upamayo y Parte Norte del Lago Chinchaycocha", en los porcentajes asignados.*
>
> ***Artículo 3º.-*** *DISPONER que, excepcionalmente y en función de la debida tutela del interés público, el Estado asuma la remediación, del 19.58% del pasivo ambiental minero "Depósitos de Sedimentos en Río San Juan", así como del 20.72 % del pasivo ambiental minero "Delta Upamayo y Parte Norte del Lago Chinchaycocha".*
>
> ***Artículo 4º.-*** *DISPONER que la Dirección General de Minería realice las medidas administrativas y legales que sean necesarias, a fi n de hacer viable la remediación ambiental de los pasivos señalados en el artículo 1º y 2º de la presente resolución.»*[*sic*].

En el 2012, mediante Resolución Ministerial N.° 117-2012-MINAM, se declaró en Emergencia Ambiental las localidades de Champamarca, Quiulacocha, Paragsha y Asentamiento Humano José Carlos Mariátegui del distrito Simón Bolívar, por un plazo de 90 días; debido a la posible afectación a las personas por las actividades mineras y los pasivos ambientales mineros. Posteriormente, en abril de 2016, el Gobierno Regional de Pasco a través de la Dirección Regional de Salud de Pasco mediante Resolución Directoral N.° 132-2016-GRP-GGR-GRDS/DRS, aprobó el «Plan de Acción de Salud para la provincia de Pasco - Pasco 2016», y en junio de 2017 se declara en Emergencia Sanitaria por el plazo de 90 días calendario los distritos Chaupimarca y Simón Bolívar de la provincia y departamento Pasco.

En el área de estudio se han realizado evaluaciones ambientales o intervenciones relacionados a la calidad ambiental de agua, sedimento y suelos por parte de la Dirección

de Evaluación Ambiental[16], en el 2015 se realizó la «Evaluación Ambiental en la cuenca del río San Juan» que registró la excedencia de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (ECA 2008), Categoría 3: Riego de Vegetales y Bebida de animales para los metales totales: cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn) en marzo (época de avenida), y cadmio (Cd), calcio (Ca), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), mercurio (Hg) y zinc (Zn) en junio (época de estiaje). Además, el río Ragra presentó concentraciones de metales que excedieron los mencionados estándares de comparación para arsénico (As), cobalto (Co), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), plata (Ag), plomo (Pb), mercurio (Hg) y zinc (Zn).

Se registraron concentraciones de metales de cobre (Cu), cadmio (Cd), arsénico (As), plomo (Pb), mercurio (Hg) y zinc (Zn) en los sedimentos del río San Juan y tributarios, que excedieron referencialmente los valores ISQG y PEL establecidos en la norma canadiense (CEQG[17]). Finalmente, los suelos en los puntos de muestreo adyacentes a la cuenca del río San Juan presentaron concentraciones de cianuro libre, cromo VI, arsénico (As), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) que excedieron los valores establecidos en los ECA para Suelo de uso Agrícola, no se descarta la influencia de la mineralización sobre los suelos.

En el 2016, se realizó la «Identificación de sitios contaminados en el ámbito de la subcuenca del río San Juan»[18], la cual consintió inicialmente con la identificación de 5 áreas de potencial interés (API) en las localidades de Champamarca (dentro del Centro Educativo N.° 34037 y sus exteriores) y Paragsha (Estadio municipal, Parque Infantil Ecológico y alrededores de la población); las otras API se localizaron en las comunidades de Santa Rosa de Colquijirca, sector Bandera Punta y sector Andarcancha. En el API ubicado en la localidad de Champamarca se registró concentraciones de arsénico (As) y plomo (Pb) que estuvieron por encima del ECA para Suelo de uso residencial/parques. Se presume que, la posible fuente de contaminación del sitio identificado en la localidad de Champamarca es el depósito de desmonte Excelsior.

En el 2017, la Digesa, emitió los «Resultados del muestreo de la calidad del agua para consumo humano, aire y suelos en los distritos de Chaupimarca y Simón Bolívar, con extensión al distrito de Yanacancha, provincia de Cerro de Pasco departamento de Pasco»[19]; donde para el monitoreo de la calidad del aire excedieron el Estándar Nacional de Calidad Ambiental del Aire (ECA) de 150 µg/m^3 para 24 horas, en la estación E-14 (DIRESA Pasco). Asimismo, los resultados de agua de consumo presentaron concentraciones de manganeso y plomo (localidades de Champamarca) que excedieron el LMP del Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano[20], y presentaron concentraciones de hierro, manganeso y plomo (Quiulacocha-Manantial de Ladera), que excedieron los ECA para Agua (2017), Categoría 1, subcategoría A1[21].

16 Informe N.° 00034-2015-OEFA/DE-SDCA-CEAI

17 *Canadian Environmental Quality Guidelines* (CEQG), extraida de: https://www.ccme.ca/en/resources/canadian_environmental_quality_guidelines/

18 Informe N.° 119-2016-OEFA/DE-SDLB-CEAI, denominado «Identificación de sitios contaminados en el ámbito de subcuenca del río San Juan».

19 Informe N.° 1595-2017/DCOVI/DIGESA, denominado «Resultados del muestreo de la calidad del agua para consumo humano, aire y suelos en los distritos de Chaupimarca y Simón Bolívar, con extensión al distrito de Yanacancha, provincia de Cerro de Pasco departamento de Pasco, agosto 2017»

20 LMP: Límites Máximos Permisibles del Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, aprobado mediante el Decreto Supremo N.° 031-2010-SA.

21 Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM; que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Realizar la evaluación ambiental en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo en los distritos Simón Bolívar, Tinyahuarco y Vicco, provincia y departamento Pasco.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar fuentes de contaminación en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo.

- Determinar la litogeoquímica de las zonas de emplazamiento de los PAM y de los depósitos cuaternarios fluviales, en las zonas de confluencia, de los principales afluentes con el río San Juan en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo.

- Determinar la influencia de los elementos de interés[22,23] provenientes de los PAM, así como otras fuentes en el agua superficial, sedimento y comunidades hidrobiológicas de perifiton, macroinvertebrados acuáticos y peces en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo.

- Identificar los sitios contaminados en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo.

- Determinar la influencia de los elementos de interés provenientes de los PAM sobre la flora y fauna silvestre (anfibios) en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo.

4 ÁREA DE ESTUDIO

La evaluación se realizó en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo, ubicada en la parte central del Perú, pertenece a la cuenca de río Mantaro del sistema hidrográfico de la vertiente del océano Atlántico, comprende los distritos Simón Bolívar, Tinyahuarco y Vicco, provincia y departamento Pasco[24]. El río San Juan vierte sus aguas al río Mantaro y al lago Chinchaycocha (Figura 4.1).

En el área de estudio se identificaron unidades fiscalizables en explotación y pasivos ambientales mineros en etapa de cierre (Tabla 4.1), así como, pasivos mineros inventariados por el Ministerio de Energía y Minas[25].

Tabla 4.1. Unidades fiscalízales identificadas en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo

22 Elementos de interés o contaminantes (parámetros), se refiere a aquellas sustancias químicas de interés toxicológico o ecotoxicológico generados por las actividades y procesos principales, secundarios y auxiliares, que se desarrollan o se desarrollaron en el sitio de estudio; según la «Guía para el muestreo de suelos», aprobada mediante Resolución Ministerial N.° 085-2014-MINAM.

23 Elementos de interés ó contaminantes, se refiere a cualquier sustancia, materia física, química, biológica o radiológica que tiene un efecto adverso sobre el aíre, agua, suelo o la biota; según el Glossary of Environment Statistics de WHO/UNEP (1997). Extraido de: https://stats.oecd.org/glossary/download.asp, el 10 de agosto de 2020.

24 Información extraida de: http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/, el 10 de agosto de 2020.

25 Extraída de: «Aprobar la actualización del Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros», aprobado mediante por Resolución Ministerial N.° 238-2020-MEM/DM, el 24 de agosto de 2020.

N.°	Unidad Fiscalizable	Administrada	Actividad
1	Cerro de Pasco (incluye laguna Yanamate)	Empresa Administradora Cerro S.A.C.	Explotación
2	Planta de óxidos	Óxidos de Pasco S.A.C.	Explotación
3	Colquijirca (antes Colquijirca N° 1 y N° 2)	Sociedad Minera El Brocal S.A.A.	Explotación
4	Quicay	Corporación Minera Centauro S.A.C.	Exploración
5	Pasivos Ambientales Mineros del depósito de desmonte Excelsior	Activos Mineros S.A.C.	Cierre de Pasivos Ambientales Mineros
6	Pasivos Ambientales Mineros del depósito de relaves Quiulacocha	Activos Mineros S.A.C.	Cierre de Pasivos Ambientales Mineros

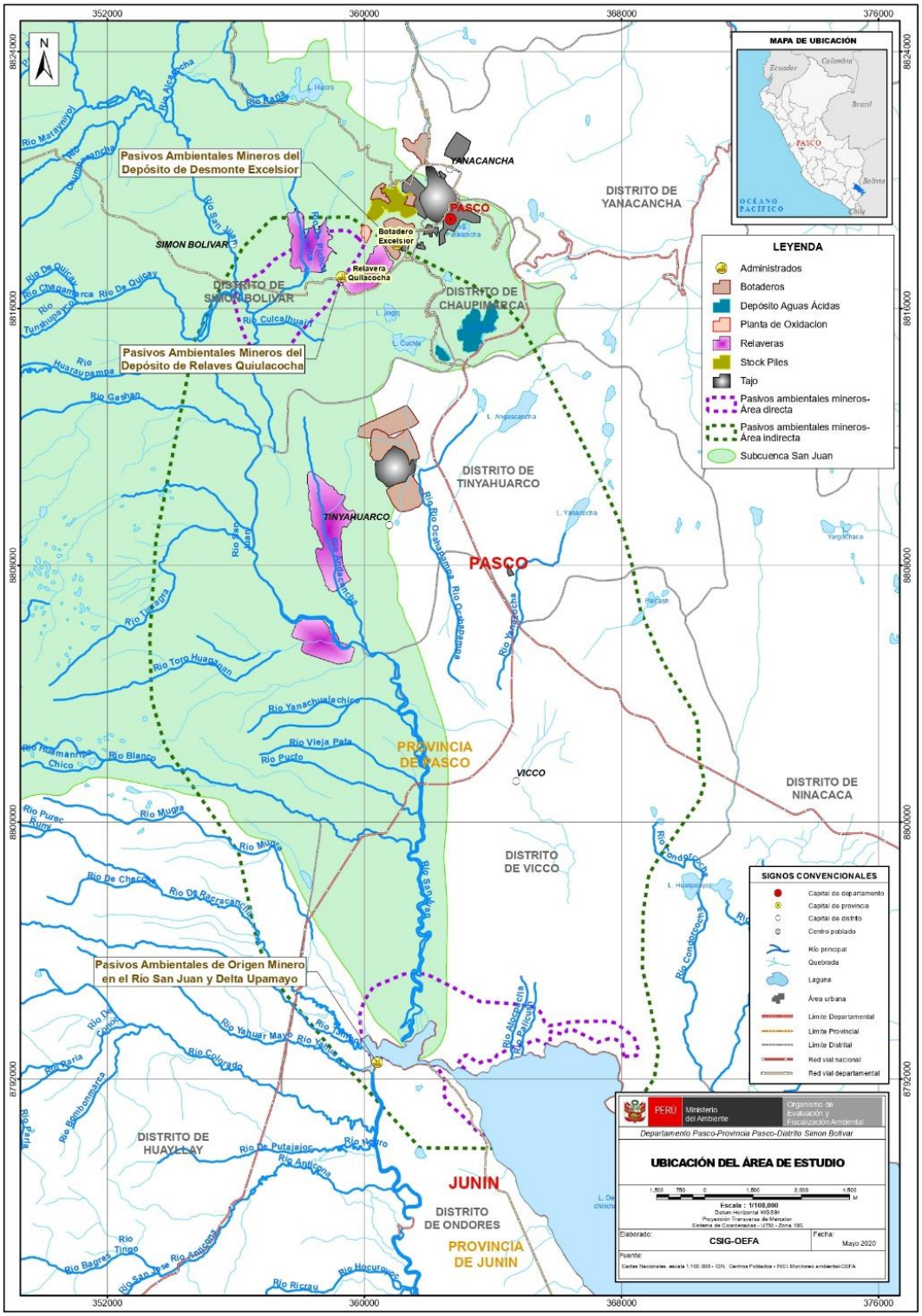


Figura 4.1. Ubicación del área de estudio en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo

Fuente: Las áreas efectivas de influencia ambiental directa e indirecta se encuentran en el expediente N.° 1655752, tomo 3, folio 403 del Plan de Cierre Integral de Pasivos de Origen Minero en el Río San Juan y Delta Upamayo; aprobado mediante Resolución Directoral N.° 001-2009-MEM/AAM, el 6 de enero de 2009.

4.1 Climatología

La temperatura media en la subcuenca del río San Juan no varía notablemente entre las estaciones, y oscila entre los 3,5 °C y 5,5 °C para la parte alta de la subcuenca (estación Cerro de Pasco), y entre 4,6 °C y 6,7 °C en la parte baja (estación Upamayo)[26].

En cuanto a la precipitación en la subcuenca mencionada, muestra una fuerte influencia estacional. Se determinó que un promedio de 73,3 % de la precipitación anual total ocurre entre octubre y marzo, con 22,3 % cayendo entre abril y setiembre. Respecto al periodo de recolección de datos pluviales, el valor máximo de precipitación en 24 horas fue de 50 mm, registrado en 1988.

4.2 Geología regional

El ámbito de la subcuenca del río San Juan, está cubierto con material cuaternario compuesto de acumulaciones sedimentarias fluvio-glaciares provenientes del acarreo desde las partes altas de la subcuenca y reposa sobre caliza altamente metamorforizadas y competente. Estas acumulaciones sedimentarias cuaternarias están conformadas por fragmentos redondeados y angulares en menor proporción de diversos tipos de rocas (calizas, volcánicas, dioritos, arcillas de fricción, etc.). En general, los estratos son bastante compactos y completamente saturados y sedimentados en un área de configuración topográfica muy suave, tipo meseta, y relleno en forma estable en toda la cuenca del río San Juan, y que a nivel regional forma parte de la llamada Meseta del Bombón[27].

4.3 Contexto social

En la provincia Pasco, los distritos más poblados son: Chaupimarca con 25627 habitantes, Simón Bolívar con 12663 habitantes; mientras que, en la provincia Daniel Alcides Carrión, los distritos más poblados son: Santa Ana de Tusi con 21217 habitantes y Yanahuanca con 11333 habitantes (Figura 4.2).

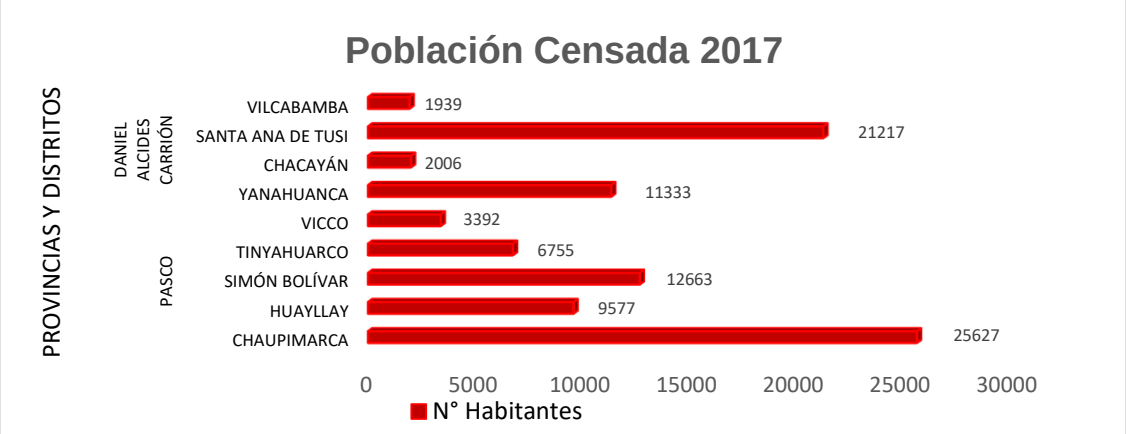


Figura 4.2. Población censada por distrito en las provincias Daniel Alcides Carrión y Pasco
Fuente: INEI (2017) 017[28]

[26] Extraído del «Plan de cierre integral de origen minero río San Juan y delta Upamayo», N.° de registro 2013-E01-004030, folio 00000021.

[27] Extraído de: «Recursos hídricos superficiales: Inventario de infraestructura de riego e identificación de las fuentes de agua del distrito de riego de Pasco, 2002». Ministerio de agricultura, Inrena, Dirección general de aguas y suelos administración técnica del distrito de riego Pasco, folio 95.

[28] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1572/

Los conflictos socioambientales según la Defensoría del Pueblo–Simco, en Pasco se reportaron 8 casos. Además, el Sinada del OEFA, reportó, para el 2019, en su portal institucional un total de 20 denuncias ambientales relacionadas con presunta contaminación por impactos significativos sobre los componentes ambientales asociados a las unidades fiscalizables por el OEFA enmarcados en la subcuenca del río San Juan.

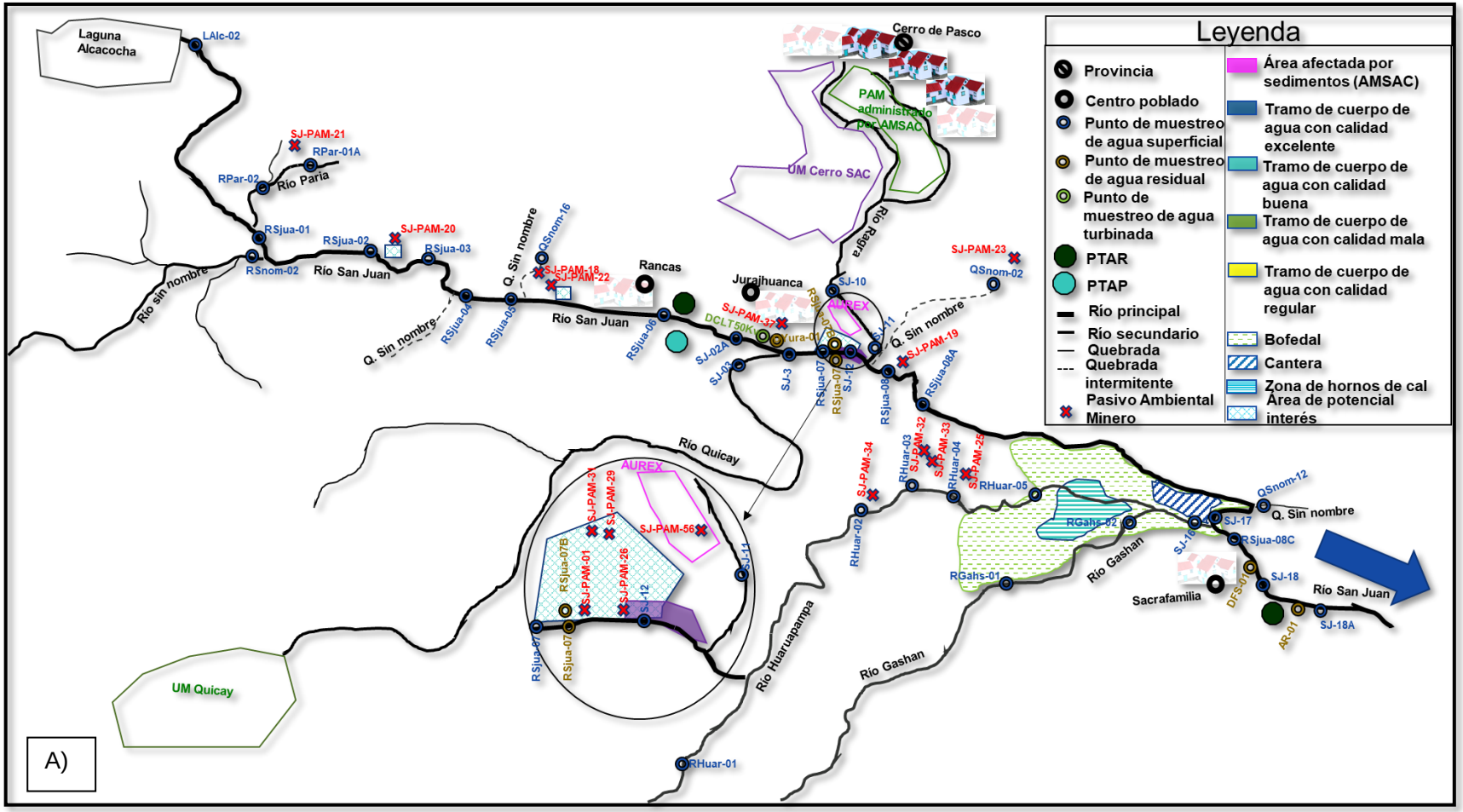
Es así que, en la zona de estudio existe una problemática socioambiental relacionada a la Municipalidad Distrital de Simón Bolívar (MDSB), debido a que las autoridades de la subcuenca San Juan, principalmente de la MDSB, y organizaciones de la sociedad civil (AA. HH. José Carlos Mariátegui, Buenos Aires, Centro Poblado Paragsha y Nueva Columna Pasco – Pelotón 58) vienen realizando medidas de protesta desde el 2012, reclamando mayor supervisión a las empresas mineras ubicadas en la zona, el cierre del PAM Excelsior, atención inmediata en salud por presencia de metales pesados en la sangre de población vulnerable (niños, niñas y madres gestantes) y reubicación de la población afectada.

Finalmente, a esta conflictividad se suma que los dirigentes de comunidades campesinas y organizaciones de la sociedad civil del entorno del lago Chinchaycocha, junto al GORE Pasco y GORE Junín, exigen la atención a la problemática socioambiental, relacionada a la afectación de las actividades agropecuarias y de la calidad ambiental del lago Chinchaycocha. Denuncian que sería debido a las actividades de embalse y desembalse de la presa Upamayo, minería, presencia de pasivos ambientales mineros y ferroviarios, y vertimientos de aguas residuales domésticas.

5 METODOLOGÍA

En este ítem se describen las metodologías usadas para la presente evaluación ambiental de causalidad (en adelante, EAC PRSJDU) en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo, en función de cada uno de los objetivos específicos, los cuales contemplan más de un componente ambiental y estudio especializado.

Se elaboró un modelo conceptual para facilitar la comprensión de los procesos de movilización y transporte de contaminantes desde las fuentes potenciales de contaminación identificadas en el área de influencia de los pasivos ambientales mineros de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo, hacia los componentes ambientales (agua, sedimento, suelo y biota), dichas fuentes fueron: PAM, componentes mineros (tajos, depósitos de desmonte, *stock pile*, depósitos de relaves y otras fuentes contaminantes de origen antrópico (*i.e.* canteras de cal y arena, aguas residuales domésticas e industriales y centrales hidroeléctricas próximas al río San Juan). Es importante diferenciar los PAM, los cuales son de 3 tipos. (Figura 5.1).


Leyenda
Provincia
Centro poblado
Punto de muestreo de agua superficial
Punto de muestreo de agua residual
Punto de muestreo de agua turbinada
PTAR
PTAP
Río principal
Río secundario
Quebrada
Quebrada intermitente
Pasivo Ambiental Minero
Área afectada por sedimentos (AMSAC)
Tramo de cuerpo de agua con calidad excelente
Tramo de cuerpo de agua con calidad buena
Tramo de cuerpo de agua con calidad mala
Tramo de cuerpo de agua con calidad regular
Bofedal
Cantera
Zona de hornos de cal
Área de potencial interés
Laguna Alcacocha
LAlc-02
Río sin nombre
RSnom-02
Río Paria
RPar-01A
RPar-02
SJ-PAM-21
RSjua-01
RSjua-02
RSjua-03
SJ-PAM-20
Río San Juan
Q. Sin nombre
QSnom-16
SJ-PAM-18
SJ-PAM-22
RSjua-04
RSjua-05
RSjua-06
Rancas
Cerro de Pasco
PAM administrado por AMSAC
UM Cerro SAC
Río Ragra
Jurajhuanca
SJ-10
AUREX
SJ-PAM-23
QSnom-02
SJ-PAM-27
DCLT50K
SJ-02A
SJ-02
SJ-3
SJ-11
SJ-PAM-19
RSjua-08A
RSjua-07
SJ-12
Río Quicay
SJ-PAM-31
SJ-PAM-29
SJ-PAM-56
RSjua-07B
SJ-PAM-01
SJ-PAM-28
SJ-13
RSjua-07
UM Quicay
Río Huaruapampa
RHuar-01
SJ-PAM-34
RHuar-03
SJ-PAM-32
SJ-PAM-33
RHuar-04
SJ-PAM-25
RHuar-05
RHuar-02
RGahs-02
RGahs-01
Río Gashan
QSnom-12
Q. Sin nombre
SJ-17
RSjua-08C
SJ-16
SJ-18
Río San Juan
Sacrafamilia
DFS-01
AR-01
SJ-18A
A)

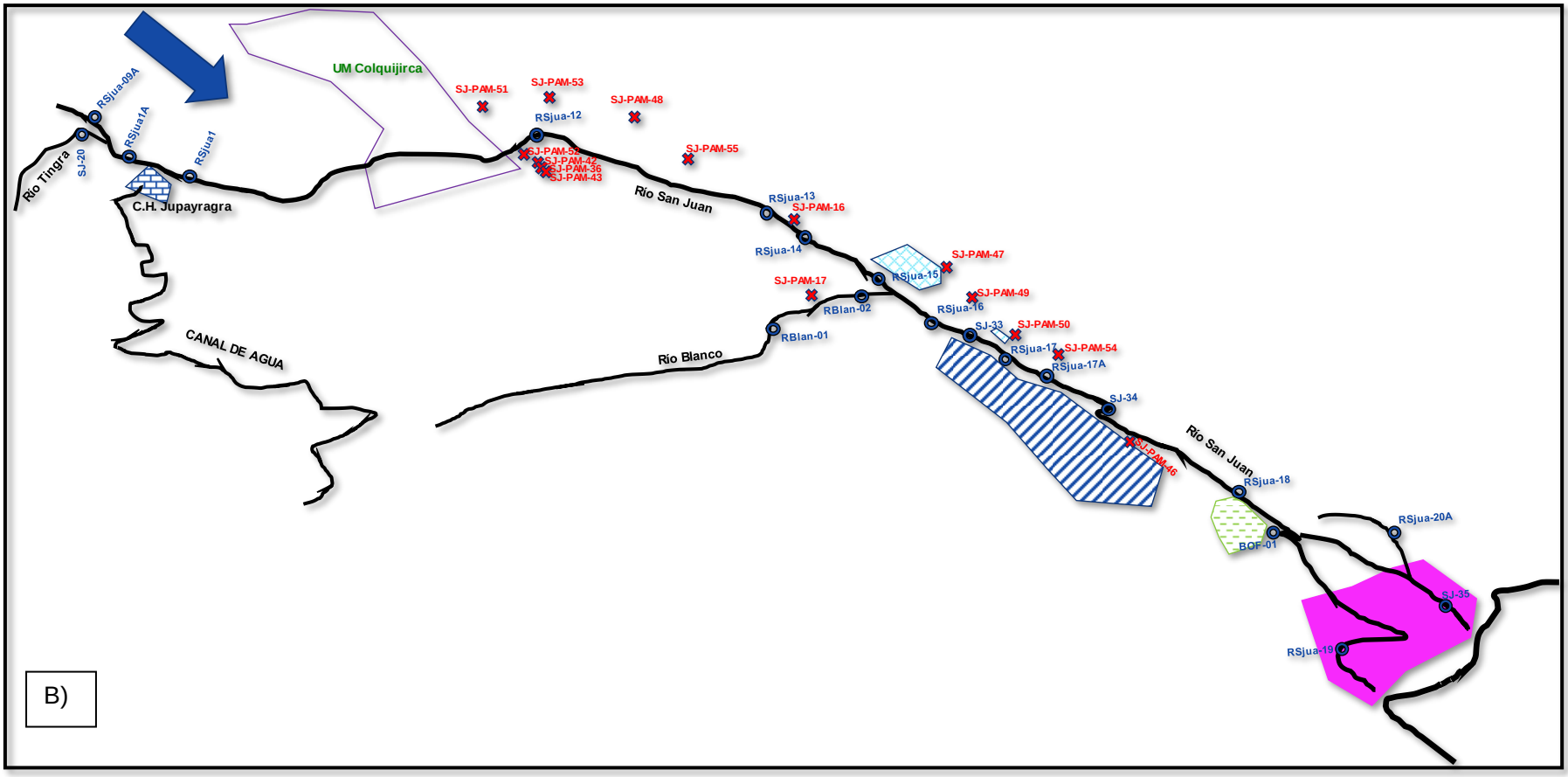


Figura 5.1. Modelo conceptual para la evaluación ambiental de causalidad en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo. A) parta alta y B) parte baja.

La presente evaluación ambiental de causalidad constó de 3 etapas: la primera fue la planificación de evaluación, que consistió en la definición de los objetivos, revisión de la información relevante, coordinaciones con otras entidades públicas; la segunda fue la ejecución, la cual radicó en el desarrollo de acciones técnicas[9] en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo, para eso se ejecutaron 2 salidas a campo.

La primera ejecución se realizó del 8 al 25 de agosto de 2020, donde se colectaron muestras de agua superficial, agua turbinada, agua residual doméstica, sedimento, comunidades hidrobiológicas en el río San Juan y sus tributarios; además, colectaron muestras de roca y residuos mineros entorno a los pasivos ambientales mineros próximos al río San Juan, con objeto de caracterizar y cuantificar el grado de contaminación producto de las actividades mineras, otras fuentes antropogénicas ajenas a la actividad minera y el aporte natural producto de la interacción con el agua meteórica (contacto agua-roca).

La segunda ejecución se realizó del 13 al 30 de setiembre de 2020, donde se colectaron muestras de suelos, geoquímica de roca, residuos mineros, flora y fauna con el objeto de caracterizar y cuantificar el grado de contaminación producto de las principales actividades desarrolladas en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo; además, se realizó el levantamiento fotogramétrico con RPAS con fines de obtener un ortomosaico RGB, ortomosaico multiespectral y modelo digital del terreno del área de estudio.

Finalmente, la última etapa corresponde a los resultados, en la cual se realizó la revisión y análisis exhaustivo de los resultados de laboratorio; también se realizó la sistematización de resultados y el análisis de estos comparándolos con estándares nacionales correspondientes, y en caso no existiesen, con una normativa referencial de uso internacional.

5.1 Objetivo específico 1: Identificar fuentes de contaminación en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo

A fin de correlacionar los resultados obtenidos de los componentes ambientales con la actividad minera, se incluyó la caracterización de material contenido en los PAM, en el ámbito de la subcuenca San Juan, considerados como fuentes potenciales de contaminación, las cuales se identificaron por cada unidad fiscalizable. Es importante diferenciar 3 tipos de PAM, los cuales son: 1) Pasivos de origen minero previos a las operaciones de Centromin Perú S.A., 2) Pasivos de origen minero y 3) Pasivos de origen no minero.

Las fuentes de contaminación pueden ser puntuales o fijas; así como fuentes dispersas o de área y también fuentes móviles (extraído del Glosario de Términos de la Gestión Ambiental Peruana)[29]. En el mismo texto, Corey (1983) las define como un foco natural o artificial a partir del cual se generan y se emiten agentes contaminantes hacia el ambiente. La Tabla 5.1. muestra algunos casos de residuos mineros considerados como fuentes potenciales de contaminación generadores de contaminantes (potencial de generación de aguas ácidas, lixiviados y material particulado entre otros).

[29] Glosario de términos para de la Gestión Ambiental Peruana, http://siar.minam.gob.pe/puno/download/file/fid/59577, pp 75.

Tabla 5.1. Potencial de generación de contaminantes y fuentes de generación

Potencial de generación de contaminación			
Fuentes potenciales	Potencial de generación	Potencial contaminante	Ref.
- **Botaderos:** de baja ley, desmontes, escorias, material estéril, lastre y marinas - **Depósito de relaves:** embalse de relaves, tanque de relaves, relaves filtrados, relaves en pasta y relaves espesados - **Depósitos de lixiviación:** ripios de lixiviación, pilas permanentes, pilas dinámicas y pilas ROM	**Generación de drenaje minero (DM)** Alteración de la calidad del agua superficial, subterránea y sedimentos a causa de la interacción de cursos superficiales con las instalaciones de mina, producto del drenaje, infiltraciones o lluvias y crecidas	Metales pesados y metaloides	a
Residuos mineros sulfúricos: - Depósitos de relaves - Depósito de desmonte de rocas - Depósitos de desmonte de minerales de baja ley (StockPile), entre otros	**Generación de drenaje ácido de mina (AMD)**. Cuando los sulfuros son expuestos a la atmósfera o al agua subterránea oxigenada, los sulfuros podrían oxidarse para producir agua ácida cargado con sulfuros, metales pesados y metaloides. **Generación de drenaje alcalino o neutro de mina**. Dominado por concentraciones altas de hierro y sulfatos, que tienen como fuente la descomposición de la pirita. El drenaje neutro de mina contiene principalmente óxidos férricos hidratados que absorben elementos como el cobre en su estructura.		b
- Depósitos de relaves - Depósito de desmonte de rocas - Depósitos de desmonte de minerales de baja ley (StockPile), entre otros - Pilas de lixiviación	**Suelos contaminados** por material particulado de polvo fugitivo(1) transportado por el viento proveniente de los depósitos de relaves, botaderos y desmontes de desechos	Material particulado con metales y metaloides	c

[a] Sernageomin (2015). Guía metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras. Chile.
[b] Lottermoswer, Berd G. (2010). Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts, 3rd edition, Springer Science & Business Media. Australia.
[c] Alianza Mundial de Derecho Ambiental – ELAW (2010). Guía para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros, 1era edición. U.S.A.
(1) La Agencia de Protección Ambiental de los EEUU (EPA), define **«emisiones fugitivas»** como 'aquellas emisiones que razonablemente no se pueden conducir a través de una chimenea, conducto de ventilación y otras aperturas funcionalmente equivalente" Para los proyectos mineros, las fuentes más frecuentes de emisiones fugitivas son: almacenamiento y manipulación de materiales, procesos mineros, fugas de polvo, voladuras, actividades de construcción, caminos asociados con el proyecto minero, pilas y lagunas de lixiviación; depósitos de material estéril y escombros, entre otros.

5.1.1 Guías utilizadas para la evaluación

Las guías de muestreo que se emplearán en la caracterización del material contenido en los PAM sin responsable, se detallan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Protocolo de muestreo para el material contenido en los PAM

Matriz	Autoridad emisora	País	Dispositivo legal	Referencia	Año	Sección
Pasivos ambientales mineros						
Residuos mineros	Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin)	Chile	(*)	Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras	2015	6. Monitoreo y muestreo en la gestión de la estabilidad química 6.2 El monitoreo en la gestión de la estabilidad química 6.3 El muestreo en la gestión de la estabilidad química 6.3.1 Muestreo en las fuentes potencialmente generadoras de drenaje minero

Matriz	Autoridad emisora	País	Dispositivo legal	Referencia	Año	Sección
						6.3.2 Muestreo en los medios de exposición de drenaje minero
Agua turbinada** y agua residual doméstica						
Agua residual industrial o doméstica	Misterio de Energía y Minas (Minem)	Perú	Resolución Directoral N.º 004-94-EM/DGAA	Protocolo de monitoreo de calidad de agua subsector - minería	1994	Todas
Agua superficial	Autoridad Nacional del agua (ANA)	Perú	Resolución Jefatural N.° 136-2018-ANA	Lineamientos para la identificación y seguimiento de fuentes contaminantes relacionados con los recursos hídricos	2018	7. Fuentes contaminantes relacionados con recursos hídricos 8. Identificación de fuentes contaminantes relacionados los recursos hídricos

(*): Gascon, R., Soto, M., Oblasser, A., Calderón Rosa, C., Hoppe, J., Salazar, N., Lavin, C., Cruz, C., Jorquera, J., & Guala, C. (2015). Guia Metodologica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras. Chile: SERNAGEOMIN. https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2017/11/GuiaMetodologicaQuimica.pdf

(**): En la cadena de custodia, se asignó como matriz agua residual industrial; sin embargo, la muestra corresponde a agua turbinada de la mini central eléctrica de Yurajhuanca, la generación del suministro eléctrico es empleado para bombear agua del rio San Juan al depósito de relaves Ocroyoc de la Empresa Administradora Cerro SAC, empleada para las actividad minero metalúrgica, por lo tanto los resultados de los parámetros evaluados se compararon con valores establecidos en los Límites Máximos Permisibles - LMP, para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas, aprobado mediante Decreto Supremo N.° 010-2010-MINAM el 20 de agosto de 2010

5.1.2 Ubicación de puntos de muestreo

La ubicación de los puntos de muestreo del material contenido en los PAM, se determinaron a partir de los puntos identificados por el Minem «Actualización de inventario inicial de pasivos ambientales»[30]. Inicialmente se establecieron 56 puntos para el muestreo de los PAM, correspondiente a relaves coloniales, teniendo en cuenta los límites de la subcuenca San Juan; de los cuales solo se consideraron 9 puntos para el muestreo, de acuerdo a los reportes de campo N.° RC-034-2020-STEC y N.° RC-048-2020-STEC, su ubicación se presenta en la Figura 5.2 y el detalle de sus coordenadas UTM y descripción se indica en la Tabla 5.3.

Según los reportes de campo mencionados, se desestimaron 47 puntos de muestreo debido a que no se encontró evidencia de los pasivos ambientales, ya que en su lugar se utilizaban como depósitos de gravas, aprovechados por la comunidad para el cultivo de forraje para ganado vacuno y ovino o revegetados de manera natural.

Tabla 5.3. Ubicación de los puntos de muestreo para el material contenido en los PAM y aguas residuales que son vertidas al río San Juan

N.°	Código OEFA	Coordenadas UTM WGS-84 Zona 18 L			Ubvicación referencial
		Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s. n. m.)	
Pasivos ambientales mineros					
1	PAM-54	361869	8797508	4125	Ubicado aproximadamente a 2,7 km al este del centro poblado de Cochamarca, en la margen izquierda del río San Juan.
2	PAM-49	361887	8798727	4126	Ubicado aproximadamente a 3 km al suroeste del centro poblado Vicco, en la margen izquierda del río San Juan.

[30] Extraída de: «Aprobar la actualización del Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros», aprobado mediante por Resolución Ministerial N.° 238-2020-MEM/DM, el 24 de agosto de 2020

N.°	Código OEFA	Coordenadas UTM WGS-84 Zona 18 L			Ubvicación referencial
		Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s. n. m.)	
3	PAM-53	360893	8805526	4162	Ubicado aproximadamente a 2,4 km al sureste del centro poblado de Huaraucaca, en la margen derecha del río San Juan.
4	PAM-32	355402	8814052	4232	Ubicado al oeste del cerro Puca Ingenio, aproximadamente a 2,5 km al noroeste del centro poblado de Sacra Familia, en la margen izquierda del río Huaraumpampa.
5	PAM-33	355360	8814022	4221	Ubicado al oeste del cerro Puca Ingenio, aproximadamente a 2,5 km al noroeste del centro poblado de Sacra Familia, en la margen izquierda del río Huaraumpampa.
6	PAM-26	356520	8815790	4218	Ubicado aproximadamente a 700 m al sur del centro poblado Yurajhuanca, en la margen izquierda del río San Juan.
7	PAM-20	354745	8820993	4226	Ubicado aproximadamente a 3,1 km al norte del centro poblado San Antonio de Rancas, en la margen izquierda del río San Juan.
8	PAM-16	361546	8801201	4142	Punto de muestreo ubicado aproximadamente a 2,5 km al oeste del centro poblado Vicco, en la margen derecha del río San Juan.
9	PAM-23	358717	8815036	4264	Ubicado en la margen izquierda del río Culcalhuain, a 1,6 km del centro poblado de Quiulacocha.
Agua turbinada (*)					
10	DCLT50Kv	356378	8816213	4207	Agua turbinada de la mini central eléctrica de Yurajhuanca.
Agua residual doméstica					
11	AR-01	356253	8810736	4186	Descarga de las aguas municipales tratadas del poblado Sacrafamilia al río San Juan.
12	DFS-01	356549	8811379	4192	Descarga de una tubería rota del poblado Sacrafamilia al río San Juan.
13	DRSjua-07	356481	8815866	4208	Efluente municipal del poblado de Rancas que descarga en el río San Juan, aguas debajo de la comunidad de Yurajhuanca.
14	DRSjua-07B	356503	8815851	4205	Efluente municipal del poblado de Yurajhuanca que descarga en el río San Juan, aguas debajo de la comunidad de Yurajhuanca.
15	DYura-01	356406	8816203	4207	Efluente doméstico de la comunidad de Yurajhuanca.

Nota: La precisión de la medición de las coordenadas fue de ± 3 m,
(*)En la cadena de custodia, se asignó como matriz agua residual industrial; sin embargo, la muestra corresponde a agua turbinada de la mini central eléctrica de Yurajhuanca, la generación del suministro eléctrico es empleado para bombear agua del rio San Juan al depósito de relaves Ocroyoc de la Empresa Administradora Cerro SAC, empleada para las actividad minero metalúrgica, por lo tanto los resultados de los parámetros evaluados se compararon con valores establecidos en los Límites Máximos Permisibles - LMP, para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas, aprobado mediante Decreto Supremo N.° 010-2010-MINAM el 20 de agosto de 2010

5.1.3 Parámetros y métodos de análisis

Los parámetros considerados para la caracterización de los PAM fueron seleccionados en función de la actividad del pasivo minero. En la Tabla 5.4 se detalla los parámetros a analizar para esta evaluación y la cantidad de muestras.

Tabla 5.4. Parámetros y métodos de análisis considerados para la evaluación de los PAM

N.°	Parámetros	Método o técnica de análisis	Laboratorio de ensayo acreditado	Cantidad
Pasivos ambientales mineros				
1	Metales totales	- EPA Method 3050 B Rev.2 (1996) / EPA Method 6020B, Rev. 2 2014 VAL	AGQ PERÚ S.A.C.	9
2	Extracción secuencial de metales pesados por la metodología de Dold	- PNTE-LE-96. Rev.00 Análisis de metales solubles por extracción de 7 etapas continuas	TÉCNICA Y PROYECTOS S.A.	3

N.°	Parámetros	Método o técnica de análisis	Laboratorio de ensayo acreditado	Cantidad
3	ABA (prueba de balance ácido - base)	- Azufre Total por combustión mediante horno Leco y espectroscopia infrarroja - Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials – MEND Report 1.20.1, Chapter 13, Item 13.3.3, December 2009	ALS LS PERÚ S.A.C.	3
4	Análisis mineralógico	Análisis mineralógico por Difracción de rayos X	BIZALAB S.A.C.	3
5		Análisis mineralógico por microscopia óptica - Petromineragrafía	BIZALAB S.A.C.	1
6	*Shake flask* en metales	Extracto SFE Leaching & drainage (1997) /EPA METHOD 6020 B Rev02, 2014	ALS LS PERÚ S.A.C.	2
7	*Shake flask* en aniones	Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Material MEND Report 1.20.1, Chapter 11.5, Shake Flask Test	ALAB PERÚ S.A.C.	2
Agua turbinada y agua residual doméstica				
8	Metales totales por ICP-MS + Hg	EPA 200.8/6020 (ICP-MS)	AGQ PERÚ S.A.C.	6
9	Metales disueltos por ICP-MS +Hg		AGQ PERÚ S.A.C.	6
10	Cloruros	PE-2090 (IC)	AGQ PERÚ S.A.C.	6
11	Sulfatos		AGQ PERÚ S.A.C.	6
12	Nitratos		AGQ PERÚ S.A.C.	6
13	Nitritos		AGQ PERÚ S.A.C.	6
14	Fluoruros		AGQ PERÚ S.A.C.	6
15	Carbonatos	SM 2320 B	AGQ PERÚ S.A.C. y ALS LS PERU S.A.C.	6
16	Bicarbonatos		AGQ PERÚ S.A.C. y ALS LS PERU S.A.C.	6
17	Acidez	SM 2310 B	AGQ PERÚ S.A.C.	6
18	TSS	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 22nd Ed. 2012/Solids: Suspended Solids Dried at 180 °C	AGQ PERÚ S.A.C.	6
19	Demanda Biológica de oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 23rd Ed.2017	ALS LS PERU S.A.C.	6
20	Demanda Bioquímica de oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd Ed. 2017	ALS LS PERU S.A.C.	6
21	Aceites y grasas	ASTM D7066-04 (Validado, 2019)	ALS LS PERU S.A.C.	6
22	Coliformes termotolerantes	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 E1, 23rd Ed.2017	ALS LS PERU S.A.C.	6
23	Cianuro wad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-CN^- I,E, 22nd Ed. 2012	ALS LS PERU S.A.C.	3
24	Cromo VI	SM 3500 Cr-B	AGQ PERÚ S.A.C.	3

Fuente: Reportes de resultados N.° RRE-035-2020-STEC y N.° RRE-043-2020-STEC (Anexo 2)

5.1.4 Aseguramiento de la calidad

Debido a la cantidad de muestras, para el aseguramiento de calidad del proceso de muestreo del material contenido en los PAM se realizó el control junto a los duplicados en campo de la caracterización litogeoquímica, cuyos resultados de los parámetros de control

de calidad se encuentran a detalle en el Anexo 2, el cual corresponde al reporte de resultados N.° RRE-035-2020-STEC y RRE-043-2020-STEC.

5.1.5 Criterios de evaluación

Pasivos ambientales mineros (PAM)

Para la caracterización de los PAM (denominados «residuos mineros», de ahora en adelante), se realizó una descripción en base al contenido mineralógico y concentración de metales de las muestras. También, se empleó la prueba estática de balance ácido-base (ABA), para determinar si las muestras son potenciales generadores de acidez. Para ello se realizó el balance entre el potencial de acidez (PA) y el potencial de neutralización (PN), dichos términos se refieren a la producción y consumo de ácido por parte del material. El criterio de evaluación para esta determinación fue el potencial neto de neutralización (PNN), el cual se define como la diferencia entre el PN y el PA[31].

Además del potencial neto de neutralización se utilizó un segundo criterio, como la relación entre PN/PA, donde el potencial de neutralización (PN) debe exceder al potencial de acidez (PA) por lo menos en 3 a 1, para asegurar que la muestra sea clasificada como no generadora de ácido. Los 2 criterios proveen una buena indicación de la generación de drenaje ácido de mina y fueron empleados en el análisis de datos.

La evaluación de metales solubles se realizó según la metodología de especiación de las fases más solubles en un procedimiento de extracción secuencial adaptado para estudios geoquímicos de residuos de minas de sulfuros de cobre[32]. Este análisis permitió identificar el potencial de movilidad y biodisponibilidad de ciertos elementos presentes en el material de los residuos mineros, además de aportar información sobre los procesos que han actuado para la liberación de dichos elementos al ambiente.

Asimismo, se empleará la prueba *shake flask extraction* para medir la interacción del material de los residuos mineros con agua proveniente de fenómenos meteorológicos (agua meteórica). En este sentido, en la prueba se usa agua destilada, la cual se combina con el material a estudiar en la relación de 3:1, para luego proceder a agitar durante un período de 24 horas. Posteriormente, se colecta el lixiviado y se filtra con una membrana de acetato de celulosa de 0,45 micras. Cabe mencionar que, las proporciones de mezcla 2:1 y 3:1 (líquido/sólido) se consideran las más representativas de situaciones reales en el ambiente en las que el agua de precipitación se filtra a través de una pila de residuos de mineral.

El lixiviado filtrado generado se analizó para determinar los parámetros: potencial de hidrógeno, alcalinidad, acidez, conductividad, sulfatos, cloruros, nitratos, bromuros, y para la determinación de las concentraciones de elementos como arsénico, antimonio, bario, berilio, bismuto, boro, cadmio, calcio, cromo, cobalto, cobre, hierro, plomo, litio, magnesio, manganeso, molibdeno, níquel, potasio, plata, sodio, estroncio, estaño, uranio, vanadio, zinc por el método ICP-OES.

El análisis mineralógico por la metodología de difracción de rayos X, permitió cuantificar e identificar la presencia de las especies minerales metálicas y no metálicas que se

[31] Guía ambiental para el manejo de drenaje ácido de mina. (1997). Ministerio de Energía y Minas. Dirección General de Asuntos Ambientales - DGAA.

[32] Dold, B. (2003). Speciation of the most soluble phases in a sequential extraction procedure adapted for geochemical studies of copper sulfide mine waste. Journal of Geochemical Exploration, 80 (2003), 55 - 68.

encuentran en los materiales de los residuos mineros; y asociarlos a los elementos de interés.

Aguas residuales domésticas y agua turbinada

Los resultados de agua turbinada (agua residual industrial) no contemplados en los IGA de ningún administrado, fueron comparados de manera referencial con los límites máximos permisibles (LMP), aprobados mediante Decreto Supremo N.° 010-2010-MINAM[33]; mientras que, los resultados de agua residual doméstica fueron comparados con límites máximos permisibles (LMP), aprobados mediante Decreto Supremo N.° 003-2010-MINAM[34].

5.2 Objetivo específico 2: Determinar la litogeoquímica de las zonas de emplazamiento de los PAM y de los depósitos cuaternarios fluviales, en las zonas de confluencia, de los principales afluentes con el río San Juan en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo

Caracterización litogeoquímica y mineralógica

Para esta caracterización se realizó la división de la subcuenca San Juan en microcuencas, y se tuvo en cuenta la red hidrográfica y la ubicación de los PAM para determinar la ubicación de las muestras para la caracterización litogeoquímica y mineralógica; por lo que, se definieron 2 tipos de puntos de muestreo, uno en afloramiento rocoso en el ámbito del emplazamiento de PAM, y otro de depósitos cuaternarios fluviales en la confluencia de los principales afluentes del río San Juan (Figura 5.2).

[33] Aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero-Metalúrgicas, el 20 de agosto de 2010

[34] Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, el 16 de marzo de 2010

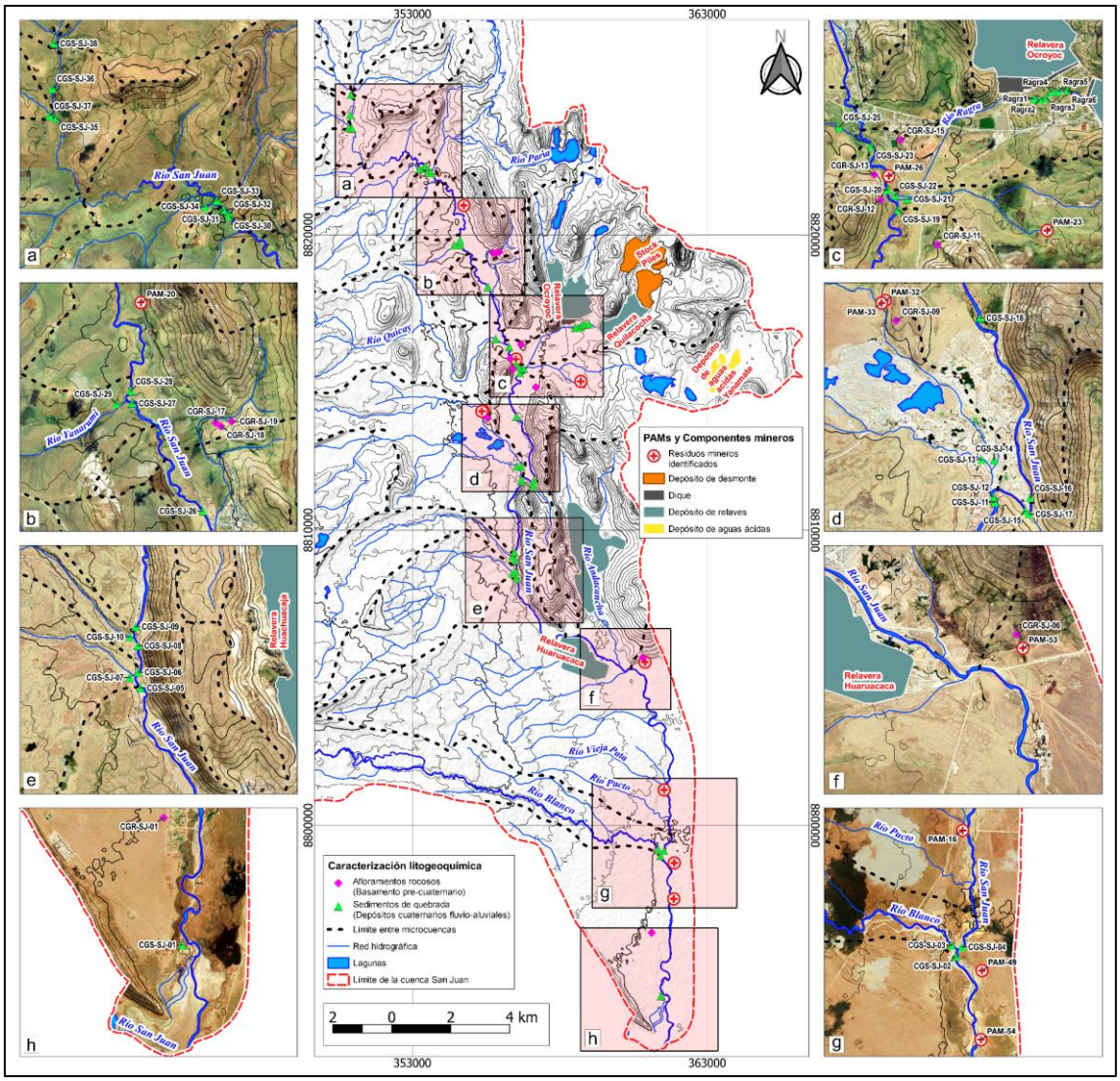


Figura 5.2. Estrategia de caracterización litogeoquímica y mineralógica de la subcuenca del río San Juan

5.2.1 Guías utilizadas para la evaluación

Los protocolos y guías, que se tomaron como referencia para la caracterización geoquímica y mineralógica de roca se mencionan en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Guías de referencia para la caracterización geoquímica y mineralógica de roca

Autoridad emisora/autor	País	Dispositivo legal	Referencia	Año	Sección
Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin)	Chile	(*)	Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras	2015	6. Monitoreo y muestreo en la gestión de la estabilidad química 6.2 El monitoreo en la gestión de la estabilidad química 6.3 El muestreo en la gestión de la estabilidad química 6.3.1 Muestreo en las fuentes potencialmente generadoras de drenaje minero

Autoridad emisora/autor	País	Dispositivo legal	Referencia	Año	Sección
					6.3.2 Muestreo en los medios de exposición de drenaje minero
Editorial Springer Autores: - Jerry R. Miller - Gail Mackin - Suzanne M. Orbock Miller	Estados Unidos	(**)	*Application of Geochemical Tracers to Fluvial Sediment*	2015	*2.3.2 Collection and Characterization of River Sediment*
Editorial Wiley-Blackwell Autores: - Angela L. Coe - Tom W. Argles - David A. Rothery - Robert A. Spicer	Reino Unido	(***)	*Geological field tecniques*	2010	*Secciones 13. Sampling 13.1 Selecting and labelling samples 13.1.1 Samples for thin-sections 13.1.2 Orientated samples 13.1.3 Samples for geochemical analysis 13.1.4 Samples for mineral extraction 13.1.5 Samples for fossils 13.1.6 Sampling for regional studies 13.1.7 High-resolution sample sets 13.1.8 Labelling samples and their packaging 13.2 Practical advice 13.2.1 Packing and marking materials 13.2.2 Extraction of samples*

(*) Publicado en la página web del Sernageomin, cuya dirección URL es:
https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2017/11/GuiaMetodologicaQuimica.pdf
(**) Publicado en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-13221-1
(***) Publicado en: https://www.wiley.com/en-us/Geological+Field+Techniques-p-9781444348231

5.2.2 Ubicación de puntos de muestreo

Los puntos de muestreo de roca se ubicaron estratégicamente en la confluencia de los principales afluentes del río San Juan y zonas aledañas a los PAM, en la Tabla 5.6 se muestra las coordenadas UTM y descripción de las muestras roca y depósitos cuaternarios fluviales.

Tabla 5.6. Ubicación de los puntos de muestreo de roca y depósitos cuaternarios fluviales

N.°	Código OEFA	Coordenadas UTM WGS-84 Zona 18 L			Ubicación referencial
		Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s. n. m.)	
1	CGR-SJ-09	355536	8813812	4274	Ubicado al oeste residuo minero Puente Los Ángeles a 180 m, en la margen derecha del río San Juan.
2	CGR-SJ-06	360824	8805677	4186	Ubicado al noroeste del relave colonial Marcapunta a 200 m, en la margen izquierda del río San Juan.
3	CGR-SJ-01	361125	8796361	4125	Ubicado al suroeste del relave colonial Cochamarca a 1 km en la margen derecha del río San Juan.
4	CGR-SJ-11	357194	8814838	4251	Ubicado al suroeste del relave colonial San Pablo a 500 m, en la margen izquierda del río San Juan.
5	CGR-SJ-12	356405	8815456	4244	Ubicado al sur del residuo minero Sedimentos del Río San Juan, a 370 m, en la margen derecha del río San Juan.
6	CGR-SJ-13	356320	8815809	4235	Ubicado al suroeste del residuo minero Sedimentos de río San Juan a 270 m, en la margen derecha del río San Juan.
7	CGR-SJ-15	356688	8816291	4253	Ubicado al este del relave colonial San Lorenzo a 250 m, en la margen izquierda del río San Juan.

N.°	Código OEFA	Coordenadas UTM WGS-84 Zona 18 L			Ubicación referencial
		Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s. n. m.)	
8	CGR-SJ-17	355735	8819401	4244	Ubicado al oeste del residuo minero Huandohuasi en la margen izquierda del río San Juan a 430 m.
9	CGR-SJ-18	355806	8819355	4256	Ubicado al oeste del residuo minero Huandohuasi en la margen izquierda del río San Juan a 530 m.
10	CGR-SJ-19	355946	8819419	4246	Ubicado al oeste del residuo minero Huandohuasi en la margen izquierda del río San Juan 640 m.
11	CGS-SJ-01	361435	8794228	4116	En la cabecera del cono aluvial, a la bifurcación del río San Juan hacia el delta Upamayo, hacia la margen derecha del río San Juan.
12	CGS-SJ-02	361418	8798975	4133	A 100 metros aguas abajo de la confluencia del río Blanco al río San Juan, en la margen derecha del río San Juan.
13	CGS-SJ-03	361350	8799175	4131	A 130 metros aguas arriba de la confluencia del río Blanco al río San Juan, en la margen derecha del río Blanco.
14	CGS-SJ-04	361536	8799145	4122	A 80 metros aguas arriba de la confluencia del río Blanco al río San Juan, en la margen derecha del río San Juan.
15	CGS-SJ-05	356537	8808375	4191	A 150 metros aguas debajo de la confluencia del río Tinragra al río San Juan, en la margen derecha del río San Juan
16	CGS-SJ-07	356383	8808525	4188	A 80 metros aguas arriba de la confluencia del río Tinragra al río San Juan, en la margen derecha del río Tinragra.
17	CGS-SJ-06	356503	8808600	4190	A 115 metros aguas arriba de la confluencia del río Tinragra al río San Juan, en la margen derecha del río San Juan.
18	CGS-SJ-08	356500	8808981	4190	A 115 metros aguas abajo de la confluencia del río Racurragra al río San Juan, en la margen derecha del río San Juan.
19	CGS-SJ-10	356386	8809106	4198	A 90 metros aguas arriba de la confluencia del río Racurragra al río San Juan, en la margen izquierda del río Racurragra
20	CGS-SJ-09	356464	8809254	4199	A 180 metros aguas arriba de la confluencia del río Racurragra al río San Juan, en la margen derecha del río San Juan.
21	CGS-SJ-15	357077	8811542	4211	A 70 metros aguas debajo de la confluencia de una quebrada sin nombre al río San Juan, en la margen derecha del río San Juan.
22	CGS-SJ-17	357123	8811502	4212	A 30 metros aguas arriba de la confluencia de la quebrada sin nombre al río San Juan, en el canal de la quebrada sin nombre.
23	CGS-SJ-16	357134	8811697	4206	A 150 metros aguas arriba de la confluencia de la quebrada sin nombre al río San Juan, en la margen derecha del río San Juan.
24	CGS-SJ-11	356713	8811645	4211	A 50 metros aguas debajo de la confluencia del río Gashan al río San Juan, en la margen derecha del río San Juan.
25	CGS-SJ-12	356696	8811708	4203	A 20 metros aguas arriba de la confluencia del río Gashan al río San Juan, en la margen izquierda del río San Juan.
26	CGS-SJ-14	356704	8812149	4209	A 130 metros aguas arriba de la confluencia del río Huaraupampa al río Gashan, en la margen derecha del río Huaraupampa.
27	CGS-SJ-13	356555	8812154	4212	A 100 metros aguas abajo de la confluencia del río Huaraupampa al río Gashan, en la margen derecha del río Gashan.
28	CGS-SJ-18	356537	8813845	4215	A 90 metros aguas arriba del sector donde inicia la explotación de no metalicos (canteras de gravas) en la margen derecha del río San Juan.

N.°	Código OEFA	Coordenadas UTM WGS-84 Zona 18 L			Ubicación referencial
		Este (m)	Norte (m)	Altitud (m s. n. m.)	
29	CGS-SJ-19	356653	8815321	4214	A 70 metros aguas abajo de la confluencia del río Culcalhuain en el río San Juan, en la margen izquierda del río San Juan.
30	CGS-SJ-21	356777	8815469	4219	A 220 metros aguas arriba de la confluencia del río Culcalhuain en el río San Juan, en el canal del río Culcalhuain.
31	CGS-SJ-22	356605	8815522	4217	A 85 metros aguas arriba de la confluencia del río Ragra en el río San Juan, en el canal del río Ragra.
32	CGS-SJ-20	356509	8815599	4218	A 130 metros aguas arriba de la confluencia del río Ragra en el río San Juan, en la margen izquierda del río San Juan.
33	CGS-SJ-23	356282	8816206	4215	A 150 metros aguas abajo de la confluencia del río Quicay en el río San Juan, en la margen izquierda hacia el canal del río San Juan.
34	CGS-SJ-25	355829	8816468	4222	A 370 metros aguas arriba de la confluencia del río Quicay en el río San Juan, en la margen izquierda del río Quicay.
35	CGS-SJ-26	355565	8818233	4223	A 190 metros aguas arriba del C.P. Rancas, en la margen izquierda del río San Juan.
36	CGS-SJ-27	354632	8819658	4219	A 90 metros aguas abajo del la confluencia del río Yanarrumi en el río San Juan, en el canal del río San Juan.
37	CGS-SJ-28	354614	8819824	4221	A 150 metros aguas arriba de la confluencia del río Yanarrumi en el río San Juan, en el canal del río San Juan
38	CGS-SJ-29	354417	8819654	4224	A 150 metros aguas arriba de la confluencia del río Yanarrumi en el río San Juan, en el canal del río Yanarrumi.
39	CGS-SJ-30	353630	8822082	4232	A 35 metros aguas abajo de la confluencia del río Alcacocha en el río San Juan, en la margen izquierda del río San Juan.
40	CGS-SJ-31	353538	8822181	4226	A 115 metros aguas arriba de la confluencia del río Alcachocha al río San Juan, en la margen izquierda del río San Juan.
41	CGS-SJ-32	353627	8822120	4230	A 15 metros aguas arriba de la confluencia del río Alcachocha en el Río San Juan, en la margen izquierda del río Alcacocha.
42	CGS-SJ-38	350915	8824748	4251	A 200 metros aguas abajo de la confluencia del río Antiosgo y Peña Blanca, en el canal del río San Juan.
43	CGS-SJ-37	350850	8823634	4240	A 40 metros aguas arriba de la confluencia del río Pacarpan, en el canal del río Pacarpan.
44	CGS-SJ-35	350954	8823600	4247	A 90 metros aguas abajo de la confluencia del río Pacarpan en el río San Juan, en la margen derecha del río San Juan.
45	CGS-SJ-36	350893	8824056	4247	A 430 metros aguas arriba de la confluencia del río Pacarpan en el río San Juan, en la margen derecha del río San Juan.
46	CGS-SJ-33	353442	8822323	4231	A 45 metros aguas arriba de la confluencia del río Chumpacancha en el río San Juan, en la margen izquierda del río San Juan.
47	CGS-SJ-34	353248	8822233	4232	A 180 metros aguas arriba de la confluencia del río Chumpacancha en el río San Juan, en la margen derecha del río Chumpacancha

Nota: La precisión de la medición de las coordenadas fue de ± 3 m

5.2.3 Parámetros y métodos de análisis

Los parámetros evaluados, métodos de análisis y cantidad de muestras para la caracterización geoquímica y mineralógica de roca se presentan en la Tabla 5.7. Todas las muestras fueron analizadas en los laboratorios acreditados contratados por el OEFA.

Tabla 5.7. Parámetros y métodos de análisis considerados para la caracterización geoquímica y mineralógica de roca

Parámetros	Método o técnica de análisis	Laboratorio de ensayo acreditado	Cantidad
Metales totales	- EPA Method 3050 B Rev.2 (1996) / EPA Method 6020B, Rev. 2 2014 VAL	AGQ PERÚ S.A.C.	59
Extracción secuencial de metales pesados por la metodología de Dold	- PNTE-LE-96. Rev.00 Análisis de metales solubles por extracción de 7 etapas continuas	TÉCNICA Y PROYECTOS S.A.	5
ABA (prueba de balance ácido - base)	- Azufre Total por Combustion mediante horno Leco y espectroscopia infrarroja - Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials – MEND Report 1.20.1, Chapter 13, Item 13.3.3, December 2009	ALS LS PERÚ S.A.C.	9
Análisis mineralógico	Análisis mineralógico por Difracción de rayos X	BIZALAB S.A.C.	43
	Análisis mineralógico por Microscopia electrónica de barrido	BIZALAB S.A.C.	23
	Análisis mineralógico por microscopia óptica - Petromineragrafía	BIZALAB S.A.C.	8
Shake flask en metales	Extracto SFE Leaching & drainage (1997) /EPA METHOD 6020 B Rev02, 2014	ALS LS PERÚ S.A.C.	6
Shake flask en aniones	Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Material MEND Report 1.20.1, Chapter 11.5, Shake Flask Test	ALAB PERÚ S.A.C.	6

Fuente: Reportes de resultados N.° RRE-0XX-2020-STEC y N.° RRE-043-2020-STEC (Anexo 2)

5.2.4 Aseguramiento de la calidad

Para el aseguramiento de calidad del proceso de muestreo de roca se realizó el control para 7 duplicados en campo.

Los resultados de los parámetros de control de calidad de roca se encuentran a detalle en el Anexo 3.1, el cual corresponde al reporte de resultados N.° RRE-035-2020-STEC.

5.2.5 Criterios de evaluación y Procesamiento de datos

En cuanto al trabajo de gabinete, se consolidó la información geológica a escala regional proporcionada por el Ingemmet, y mediante el uso de imágenes satelitales (Spot 6, Aster y Landsat) y observaciones de campo se actualizó la disposición de la red hídrica y el afloramiento de los depósitos cuaternarios coluviales, aluviales y fluviales.

Respecto a la evaluación de las muestras recolectadas, la caracterización geoquímica de roca (metales totales) permitió describir la distribución de los elementos químicos en las zonas donde se emplazan los PAM, y en las microcuencas de los principales afluentes del río San Juan; la prueba de balance ácido-base (ABA) permitió determinar zonas que podrían generar drenaje ácido de roca (DAR) o drenaje ácido de mina (DAM) en depósitos cuaternarios contaminados en el ámbito de los pasivos ambientales.

La evaluación de metales solubles se realizó según la metodología de especiación de las fases más solubles en un procedimiento de extracción secuencial adaptado para estudios

geoquímicos de residuos de minas de sulfuros de cobre[35]. Este análisis permitió identificar el potencial de movilidad y biodisponibilidad de ciertos elementos presentes en el material de los componentes mineros, además de aportar información sobre los procesos que han actuado para la liberación de dichos elementos al ambiente.

La caracterización mineralógica mediante estudios petromineragráficos permitió la descripción microscópica de las rocas, las cuales se encuentran constituidas por minerales metálicos y no metálicos, información que complementó la información recopilada respecto al contexto geológico regional; en cuanto a los depósitos cuaternarios (coluviales, aluviales, fluviales, etc.) se estudiaron mediante el análisis mineralógico por difracción de rayos X y por microscopia electrónica de barrido con el objetivo de complementar a la información obtenida de la caracterización geoquímica, para determinar el fondo geoquímico de la subcuenca del río San Juan. Señalar que, debido a que la zona de estudio no es lugar prístino, sino que se realizaron actividades mineras incluso desde antes de la época colonial, el término correcto es nivel de referencia.

Para calcular el umbral del nivel de referencia, se utilizó los criterios de la media, la mediana y el diagrama de cajas y bigotes[36]. Los criterios de la media y la mediana son procedimientos iterativos que consisten en calcular el valor centrar y sumarle a este 2 veces la desviación estándar (para la media) o 2 veces la desviación absoluta de la mediana (para la mediana), para luego descartar todos aquellos valores que sean mayores a este resultado, reanudando el proceso hasta que no queden valores por encima del umbral calculado (Figura 5.3). En cuanto al diagrama de cajas, se realizó el cálculo de los cuartiles y al tercer cuartil (Q3) se le suma 1,5 veces la diferencia entre el tercer y primer cuartil (Q3-Q1), a este valor se le considera como el umbral del nivel de referencia (Figura 5.4). Los resultados de los cálculos para determinar los umbrales para los elementos de interés de nivel de referencia se encuentran a detalle en el Anexo 4.

[35] Dold, B. (2003). Speciation of the most soluble phases in a sequential extraction procedure adapted for geochemical studies of copper sulfide mine waste. Journal of Geochemical Exploration, 80 (2003), 55 - 68.

[36] Matschullat, J., Ottenstein, R., & Reimann, C. (2000). Geochemical background–can we calculate it?. Environmental geology, 39(9), 990-1000.

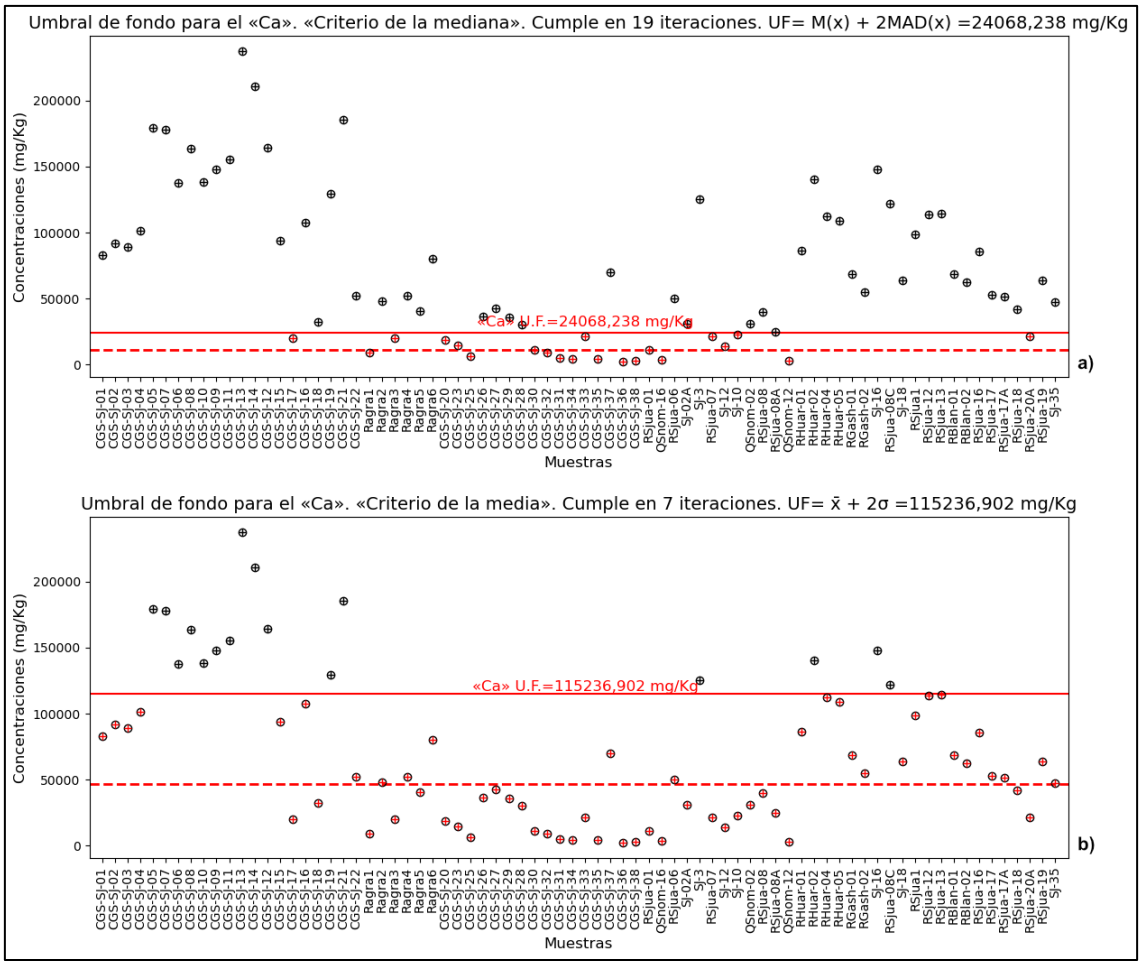


Figura 5.3. Estimación del nivel de referencia mediante los métodos y criterios de la mediana (a) y la media (b) para el parámetro calcio

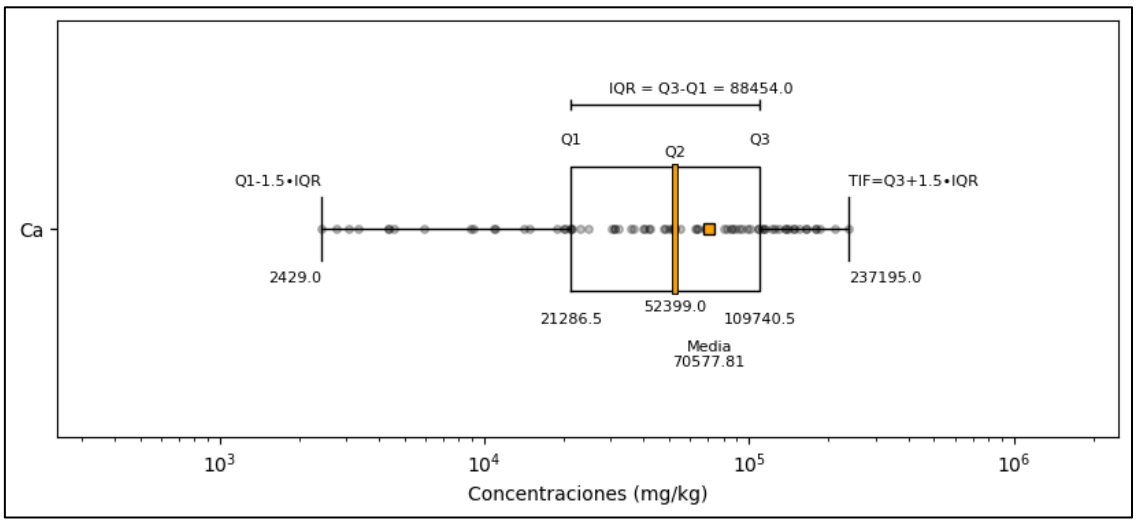


Figura 5.4. Diagrama de cajas del parámetro calcio

Asimismo, se empleó la prueba *shake flask extraction* para medir la interacción de la roca y los pasivos ambientales mineros con agua proveniente de fenómenos meteorológicos (agua

meteórica). Esta prueba utiliza agua destilada, la cual se combina con el material a estudiar en la relación de 3:1, para luego proceder a agitar durante un período de 24 horas. Posteriormente, se colecta el lixiviado y se filtra con una membrana de acetato de celulosa de 0,45 micras. Cabe mencionar que, las proporciones de mezcla 2:1 y 3:1 (líquido/sólido) se consideran las más representativa de situaciones reales en el ambiente en las que el agua de precipitación se filtra a través de una pila de residuos de mineral.

El lixiviado filtrado generado se analizó para determinar los siguientes parámetros: potencial de hidrógeno, alcalinidad, acidez, conductividad, sulfatos, cloruros, nitratos, bromuros, y para la determinación de las concentraciones de elementos como arsénico, antimonio, bario, berilio, bismuto, boro, cadmio, calcio, cromo, cobalto, cobre, hierro, plomo, de litio, magnesio, manganeso, molibdeno, níquel, potasio, plata, sodio, estroncio, estaño, uranio, vanadio, zinc por el método ICP-OES.

5.3 Objetivo específico 3: Determinar la influencia de los elementos de interés provenientes de los PAM, así como otras fuentes en el agua superficial, sedimento y comunidades hidrobiológicas de perifiton, macroinvertebrados acuáticos y peces en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo

A continuación, se presentará la metodología de las matrices de agua superficial, sedimento y comunidades hidrobiológicas.

5.3.1 Protocolos y guías utilizadas para la evaluación

Los protocolos y guías que se aplicaron en la evaluación de agua superficial, sedimento y comunidades hidrobiológicas se muestran en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Protocolos y guías para el muestreo de agua superficial, agua residual doméstica, agua residual industrial y efluente minero

Matriz	Autoridad emisora	País	Dispositivo legal	Referencia	Año	Sección
Agua superficial, aguas residual doméstica e industrial, efluentes mineros						
Agua superficial	Autoridad Nacional del Agua (ANA)	Perú	Resolución Jefatural N.° 010-2016-ANA	Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales	2016	Sección 6
Medición de caudal	Autoridad Nacional del Agua (ANA)	Perú	Resolución Jefatural N.° 010-2016-ANA	Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales	2016	Sección 6.12
	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi)	Perú	----	Manual de hidrometría	2016	Todo el manual
	Organización Metereológica Mundial (OMM)	Países que integran la OMM	----	Guía de prácticas hidrológicas	2011	Capítulo 11
Sedimento						
Sedimento	Instituto nacional de ecología y cambio climático (INECC-CCA)	México	----	Manual de métodos de muestreo y preservación de muestras de las sustancias prioritarias para las	2010	Sección 3.4

Matriz	Autoridad emisora	País	Dispositivo legal	Referencia	Año	Sección
				matrices prioritarias del PRONAME		
	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Colombia	----	Procedimiento para el muestreo de aguas y sedimentos para la determinación de metales	2011	Sección 7.3, Sección 8, Sección 9.2.
	Agencia para la Protección Ambiental (EPA)	Estados Unidos	*EPA-823-B-01-002 October 2001*	Manual técnico. Métodos de recolección, almacenamiento y manipulación de sedimentos para análisis químicos y toxicológicos	2001	Sección 2, 3.2.2, 4.4.2-4, 7
			----	Muestreo de sedimentos	2016	Sección 2, 3, 4, 5, 7.1-2, 9, 11
Comunidades hidrobiológicas						
Comunidades hidrobiológicas	Ministerio del Ambiente	Perú	(*)	Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos y necton (peces) en aguas continentales del Perú	2014	Secciones 4.Perifiton 4.1 Metodología de colecta 4.1.1 Equipos y materiales 4.1.2 Técnicas de colecta 4.1.2.1 Colecta por tipo de sustrato 4.1.3 Preservación y etiquetado 5.Bentos (Macroinvertebrados) 5.1 Metodología de colecta 5.1.1 Equipos y materiales 5.1.2 Técnicas de colecta 5.1.2.1Métodos de recolección cualitativos 5.1.2.2 Métodos de recolección cuantitativos

(*) Publicado en la página web del Minam, cuya dirección URL es: http://www.minam.gob.pe/diversidadbiologica/wp-content/uploads/sites/21/2014/02/M%C3%A9todos-de-Colecta-identificaci%C3%B3n-y-an%C3%A1lisis-de-comunidades-biol%C3%B3gicas.compressed.pdf

5.3.2 Ubicación de puntos de muestreo

La ubicación de los puntos de muestreo de agua superficial, agua residual doméstica, agua residual industrial, efluentes mineros, sedimento y comunidades hidrobiológicas fueron establecidos considerando la actividad de las unidades mineras Quicay de Corporación Minera Centauro S.A.C. y Colquijirca de Sociedad Minera El Brocal S.A., pasivos ambientales mineros a cargo de Activos Mineros S.A.C.; así como, los PAM sin responsable ubicados en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo (Tabla 5.9). Asimismo, la ubicación espacial de los puntos de muestreo se presenta en el Anexo 1.1 (RC-034-2020-STEC).

Tabla 5.9. Ubicación de los puntos de muestreo de agua, sedimento y comunidades hidrobiológicas

Nro.	Cuerpo receptor	Puntos de muestreo	Coordenadas UTM WGS-84 Zona 18L		Altitud (m s. n. m.)	AS	SED	CH	Descripción
			Este (m)	Norte (m)					
Agua superficial									
1	Río San Juan	SJ-35	361589	8792595	4094	X	X	X	Brazo izquierdo del río San Juan, aguas abajo del Delta Upamayo.
2		RSjua-19	360507	8793070	4093	X	X	-	Brazo derecho del río San Juan, aguas abajo del Delta Upamayo.
3		RSjua-20A	362045	8793338	4099	X	X	X	Parte del río San Juan que bordea el Delta Upamayo y que se une con el brazo izquierdo de este río.
4		RSjua-18	361467	8794631	4130	X	X	X	Río San Juan, aguas abajo del residuo minero del PAM Relave Colonial Cochamarca y aguas arriba del delta Upamayo, a 200 m aproximadamente de la bipartición del río.
5		SJ-34	361736	8796494	4102	X	-	X	Río San Juan, aguas abajo del residuo minero del PAM Cashajircan y aguas arriba del residuo minero PAM Relave Colonial Cochamarca.
6	Bofedal	Bof-01	361341	8794149	4108	X	-	-	Descarga del bofedal, ubicado aguas abajo de las canteras de Cochamarca.
7	Río San Juan	RSjua-17A	361685	8797259	4108	X	X	X	Río San Juan antes del residuo minero PAM Relave Colonial Cochamarca (actualmente canteras de Cochamarca).
8		RSjua-17	361722	8797748	4111	X	X	X	Río San Juan, aguas abajo del residuo minero del PAM Relave Colonial Chaquiniyo y aguas arriba del residuo minero PAM Relave Colonial Cashajircan.
9		RSjua-16	361554	8798758	4110	X	X	X	Río San Juan aguas abajo del residuo minero PAM Relave Colonial Baldeon y aguas arriba del residuo minero PAM Relave Colonial Chaqueneoc.
10		SJ-33	361811	8798436	4111	X	-	X	Río San Juan en Cruz Pata, aguas abajo del residuo minero PAM Relave Colonial Chaqueneoc y aguas arriba del residuo minero PAM Relave Colonial Chaquiniyo.
11	Río Blanco	RBlan-02	361308	8799208	4107	X	X	X	En el río Blanco aguas abajo del residuo minero PAM Relave Colonial Río Blanco y 160 m aproximadamente antes de su desembocadura en el río San Juan.
12		RBlan-01	360400	8799600	4117	X	X	X	En el río Blanco aguas arriba del pasivo minero Relave Colonial Río Blanco.
13	Río San Juan	RSjua-15	361573	8799213	4102	X	-	X	Río San Juan aguas arriba del pasivo minero Relave Colonial Baldeon.
14		RSjua-14	361707	8800763	4123	X	-	X	En el río San Juan, aguas abajo del residuo minero PAM Relave Colonial Puente San Juan.
15		RSjua-13	361654	8801345	4125	X	X	X	En el río San Juan aguas arriba del residuo minero PAM Relave Colonial Puente San Juan.
16		RSjua-12	360693	8805166	4146	X	X	X	En el río San Juan, aguas abajo del residuo minero PAM Relave San Gregorio y de la mina Colquijirca.
17		RSjua1	356633	8807727	4151	X	X	X	En el río San Juan, aproximadamente a 200 m aguas abajo de la descarga E-9, de la central hidroeléctrica de

Nro.	Cuerpo receptor	Puntos de muestreo	Coordenadas UTM WGS-84 Zona 18L		Altitud (m s. n. m.)	AS	SED	CH	Descripción
			Este (m)	Norte (m)					
									Jupayragra y aguas arriba de la mina Colquijirca.
18		RSjau1A	356605	8808038	4160	X	-	X	En el río San Juan, aguas arriba de la Central Hidroeléctrica Jupayragra.
19		RSjua-09A	356519	8808637	4172	X	-	X	En el río San Juan a 100 m antes de la confluencia con el río Tinragra.
20	Río Tinragra	SJ-20	356324	8808592	4173	X	-	X	En el río Tinragra a 140 m aproximadamente antes de su confluencia con el río San Juan.
21		SJ-18A	356334	8810664	4185	X	-	X	En el río San Juan, a 100 m aproximadamente aguas abajo de la descarga de las aguas municipales del poblado Sacrafamilia.
22	Río San Juan	SJ-18	356284	8810944	4188	X	X	X	En el río San Juan, a 200 m aproximadamente aguas arriba de la descarga de las aguas municipales tratadas de la población de Sacrafamilia.
23		RSjua-08C	356704	8811666	4196	X	X	X	En el río San Juan, aguas abajo de la confluencia con el río Gashan.
24	Río Gashan	SJ-16	356671	8811790	4185	X	X	X	En el río Gashan, afluente del Río San Juan en la margen derecha, aguas debajo de la cantera para asfalto.
25	Río San Juan	SJ-17	356718	8811763	4164	X	-	X	Río San Juan en puente peatonal, aguas arriba confluencia río Gashan y aguas abajo de la cantera para asfalto.
26	Quebrada sin nombre 12	QSnom-12	357121	8811492	4189	X	X	X	Quebrada sin nombre afluente al Río San Juan.
27	Río Huaraupampa	RHuar-05	355888	8813146	4201	X	X	X	Río Huaraupampa, afluente al río San Juan, aguas abajo de la infraestructura PAM Planta Santa Rita y Lucero.
28		RHuar-04	355354	8813731	4209	X	X	X	Río Huaraupampa, afluente al río San Juan, aguas arriba de la infraestructura PAM Planta Santa Rita y Lucero.
29	Río Huaraupampa	RHuar-03	355243	8814079	4213	X	-	X	Río Huaraupampa, afluente al río San Juan, aguas abajo de la infraestructura PAM Planta Santa Rita y Lucero.
30		RHuar-02	354920	8814198	4214	X	X	X	Río Huaraupampa, afluente al río San Juan, aguas arriba de la infraestructura PAM Planta Santa Rita y Lucero.
31	Río Gashan	RGash-02	356562	8812138	4198	X	X	X	Río Gashan aguas debajo de la zona de hornos de cal, antes de la confluencia con el Río Huaraupampa en la margen derecha.
32		RGash-01	355118	8812577	4209	X	X	X	Río Gashan aguas arriba de la zona de hornos de cal.
33	Río Huaraupampa	RHuar-01	351390	8813801	4231	X	X	X	Río Huaraupampa, aguas arriba de las poblaciones y actividades mineras.
34	Río San Juan	RSjua-08A	356293	8814482	4203	X	X	X	Rio San Juan, aguas abajo del residuo minero Relave Colonial San Pablo.
35		RSjua-08	356644	8815060	4202	X	X	X	Rio San Juan, aguas arriba del residuo minero PAM Relave Colonial San Pablo y aguas debajo de la descarga del río Ragra.
36	Río Ragra	SJ-11	356859	8815495	4211	X	-	-	Río Ragra antes de la confluencia con el río San Juan y aguas abajo de la planta Andes de Aurex.
37		SJ-10	357344	8816464	4196	X	X	X	Río Ragra aguas abajo del depósito de relaves Ocroyoc.

Nro.	Cuerpo receptor	Puntos de muestreo	Coordenadas UTM WGS-84 Zona 18L		Altitud (m s. n. m.)	AS	SED	CH	Descripción
			Este (m)	Norte (m)					
38	Río San Juan	SJ-12	356510	8815753	4192	X	X	X	Río San Juan aguas abajo de la descarga de efluentes municipales de Rancas y Yurajhuanca, y aguas arriba de la descarga del río Ragra.
39		RSjua-07	356435	8815920	4203	X	X	X	Río San Juan, aguas abajo de la comunidad de Yurajhuanca y de las descargas de los efluentes domésticos de las comunidades Rancas y Yurajhuanca.
40		SJ-3	356353	8816178	4178	X	X	X	Río San Juan, aguas abajo del dique y aguas arriba de la descarga de las aguas residuales domésticas de Yurajhuanca y agua turbinada de la planta eléctrica de 50 KV.
41		SJ-02A	356088	8816625	4201	X	X	X	Río San Juan, aguas abajo Rancas y antes de la unión con el río Quicay.
42	Río Quicay	RQuic-01	355793	8816492	4198	X	X	X	Río Quicay, antes de la confluencia con el río San Juan.
43	Quebrada sin nombre 02	QSnom-02	358443	8814995	4243	X	X	-	Quebrada S/N, afluente al río Culcalhuain aguas abajo del residuo minero PAM Relave Colonial Laguna Quiulacocha.
44	Río San Juan	RSjua-06	355855	8817510	4212	X	X	X	Río San Juan, aguas abajo de la comunidad de Rancas y aguas arriba de la comunidad de Yurajhuanca.
45		RSjua-05	354953	8819357	4205	X	-	X	Río San Juan, aguas abajo del residuo minero PAM Relave Colonial Canal Rancas y aguas arriba de la comunidad de Rancas.
46		RSjua-04	354610	8819673	4200	X	-	X	Río San Juan, aguas arriba del residuo minero PAM Relave Colonial Canal Rancas.
47	Quebrada sin nombre 16	QSnom-16	355602	8819455	4213	X	X	X	Quebrada sin nombre, aguas arriba del residuo minero PAM Relave Colonial Huandohuasi.
48	Río San Juan	RSjua-03	354776	8820441	4200	X	-	X	Río San Juan aguas abajo del residuo minero PAM Relave Colonial Tauro 6.
49		RSjua-02	354466	8821036	4214	X	-	X	Río San Juan aguas arriba del residuo minero PAM Relave Colonial Tauro 6.
50		RSjua-01	353899	8822732	4221	X	X	X	Río San Juan parte alta de la cuenca.
51	Río sin nombre	RSnom-02	353666	8822056	4216	X	-	X	Río S/N afluente al río San Juan.
52	Río Paria	RPar-02	354437	8823275	4201	X	-	X	Río Paria aguas abajo del PAM Colonial Paria.
53		RPar-01A	355211	8823135	4239	X	-	-	Río Paria aguas arriba del PAM Colonial Paria.
54	Laguna Alcacocha	LAlc-02	355755	8827046	4340	X	-	-	Al sur de la laguna Alcacocha.
60	---	DYura-01	356406	8816203	4207	X	N.A.	N.A.	Efluente domestico de la comunidad de Yurajhuanca.

Notas: La precisión de la medición de las coordenadas fue de ± 3 m
AS: Agua, SED: Sedimento, CH: Comunidades hidrobiológicas
«-» No se muestreó, N.A.: No aplica.

5.3.3 Parámetros y métodos de análisis

Los parámetros de la calidad de agua superficial y efluentes evaluados se seleccionaron en función a los objetivos de la evaluación y las actividades mineras que se desarrollan en el ámbito de la subcuenca del río San Juan, y parámetros adicionales que permitan la correcta interpretación de los resultados.

Se registró *in situ* la temperatura, oxígeno disuelto, potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica y datos para el cálculo de caudal. Todas las muestras fueron analizadas en laboratorios acreditados. En la Tabla 5.10 se presenta los parámetros y el método de análisis empleados por los laboratorios.

Tabla 5.10. Parámetros y métodos de análisis considerados para la evaluación de agua superficial, sedimento y comunidades hidrobiológicas

N.°	Parámetros	Método o técnica de análisis	Laboratorio de ensayo acreditado	Cantidades
Agua superficial				
1	Metales totales por ICP-MS + Hg	EPA 200.8/6020 (ICP-MS)	AGQ PERÚ S.A.C.	54
2	Metales disueltos por ICP-MS +Hg			54
3	Cloruros	PE-2090 (IC)	AGQ PERÚ S.A.C.	54
4	Sulfatos			54
5	Nitratos			54
6	Nitritos			54
7	Fluoruros			54
8	Carbonatos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2320 B. 22nd/Alkalinity: Titration Method	AGQ PERÚ S.A.C.	54
9	Bicarbonatos			54
10	Acidez	SM 2310 B	AGQ PERÚ S.A.C.	54
11	TSS	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 22nd Ed. 2012/Solids: Suspended Solids Dried at 180 °C	AGQ PERÚ S.A.C.	54
12	DBO_5	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 23rd Ed.2017	ALS LS PERU S.A.C.	15
13	DQO	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd Ed. 2017	ALS LS PERU S.A.C.	15
14	Aceites y grasas	ASTM D7066-04 (Validado, 2019)	ALS LS PERU S.A.C.	15
15	Coliformes termotolerantes	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 9221 E1, 23rd Ed.2017	ALS LS PERU S.A.C.	15
16	Cianuro wad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-CN^- I,E, 22nd Ed. 2012	ALS LS PERU S.A.C.	14
17	Cromo VI	SM 3500 Cr-B	AGQ PERÚ S.A.C.	5
18	Pruebas ecotoxicológicas en agua superficial	Método USEPA - EPA-821-R-02-012: Methods for Measuring the Acute Toxicity of Effluents and Receiving Waters to Freshwater and Marine Organisms. Método USEPA - OCSPP 850.1010: Aquatic Invertebrate Acute Toxicity Test, Freshwater Daphnids.	OEFA	5
Sedimento				
19	Metales totales (incluido Hg)	EPA 3050 B; 1996/EPA 6010 B:1996 EPA 7471 B, Rev 2, February 2007	AGQ PERÚ S.A.C.	34
20	Análisis de tamaño de particulas	ASTM D422-63 (Reapproved 2007)	ALS LS PERU S.A.C.	34

N.°	Parámetros	Método o técnica de análisis	Laboratorio de ensayo acreditado	Cantidades
21	Pruebas ecotoxicológicas en sedimento	American Society for Testing and Materials (ASTM, US) (2000) & United States Environmental Protection Agency (USEPA) - United States Army Corps of Engineers (USACOE) (1998). Standard guide for collection, storage, characterization, and manipulation of sediments for toxicological testing. Guide E1391. Método USEPA - EPA-821-R-02-012: Methods for Measuring the Acute Toxicity of Effluents and Receiving Waters to Freshwater and Marine Organisms. Método USEPA - OCSPP 850.1010: Aquatic Invertebrate Acute Toxicity Test, Freshwater Daphnids.	OEFA	20
Comunidades hidrobiológicas				
22	Perifiton	SMEWW-APHA-AWWA-WEF, Part 10 300 C, 22nd Ed. 2012	48 (x3)	144
23	Macroinvertebrados bentónicos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF, Part 10 500 C, 22nd Ed. 2012	48 (x3)	144

Fuente: Reportes de resultados N.° RRE-035-2020-STEC (Anexo 2)

5.3.4 Equipos utilizados

Los equipos utilizados para la medición de parámetros *in situ*, la medición de caudal y el posicionamiento de los puntos de muestreo, se detallan en el reporte de campo N.° 034-2020-STEC (Anexo 1.1).

5.3.5 Aseguramiento de la calidad

Para el aseguramiento de la calidad del proceso de muestreo de agua se realizaron los controles detallados en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11. Controles de calidad realizados durante el muestreo de agua y sedimentos.

Tipo de control	Contaminación evaluada
Agua superficial, aguas residuales y efluentes mineros	
1 blancos de campo	Contaminación en alguna parte del monitoreo
1 blancos viajeros	Contaminación durante el transporte
6 duplicados	Precisión y repetitividad de los procedimientos de recolección
Sedimento	
6 duplicados	Precisión y repetitividad de los procedimientos de recolección

Los resultados de los parámetros de control de calidad de agua y sedimento se encuentran a detalle en el Anexo 2, el cual corresponde al reporte de resultados N.° RRE-035-2020-STEC; asimismo lo resultados de control de calidad de los frascos empleados para el monitoreo se presentan en el Anexo 6.

5.3.6 Procesamiento de datos

5.3.6.1 Agua

Los resultados de los parámetros evaluados fueron sistematizados y representados en gráficas de barras, para ser comparados con los valores de las normativas descritas en el

ítem de criterios de evaluación. Así mismo, estos resultados fueron empleados para obtener la caracterización hidroquímica de las aguas superficiales, que a continuación se describe.

a) Caracterización hidroquímica

La evaluación de los aspectos químicos del agua y los tipos de reacciones que ocurren en este medio consideró la totalidad de los resultados de agua superficial (ríos, quebradas, lagunas), agua residual industrial y efluentes mineros, ubicados en el área de estudio. Custodio y Llamas (1976) consideran que los análisis de calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, sulfatos, cloruros y parámetros de campo como la conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto y potencial de hidrógeno, son suficientes para el estudio de los principales procesos químicos en los acuíferos y sistemas hidrológicos.

Para iniciar con el procesamiento de los datos se consideró el control de calidad reportados por el laboratorio y consistió en realizar el balance iónico, el cual se encuentra dentro del reporte de resultados (Anexo 2.1). Asimismo, se consideró un rango de error aceptable de 20 %; sin embargo, las muestras que superan el rango serán considerados para el procesamiento de manera referencial para su caracterización.

- **Diagrama de Piper**

Se elaboró el diagrama hidroquímico de Piper, el cual permitió caracterizar las aguas en función de la predominancia catiónica y aniónica (iones mayoritarios del agua) e interacción con la roca (Tabla 5.12).

Tabla 5.12. Componentes iónicos mayoritarios del agua

Constituyentes	Iones mayoritarios
Cationes	Calcio (Ca^{2+}), sodio (Na^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^{2+})
Aniones	Bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}) y cloruro (Cl^-)

En este diagrama se incluye aniones y cationes en forma simultánea, las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas. Está formado por 2 triángulos equiláteros, donde se representan los cationes y aniones mayoritarios. Los vértices del triángulo de cationes son Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+ y K^+. Los vértices del triángulo de aniones son SO_4^{-2}, Cl^- y HCO_3^-. Los datos de los diagramas triangulares se proyectan en un rombo central en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes.

Las concentraciones de los iones en meq/L se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes respectivamente. En cada triángulo se reúnen solo 3 aniones y cationes. A cada vértice le corresponde el 100 % de un anión o catión. En la Figura 5.5 se muestra una apreciación de este diagrama que permite caracterizar varios tipos de aguas. Cabe precisar que, para la realización de los diagramas hidroquímicos se empleó los programas libres Diagrammes versión 6.7 (2013) y EASY QUIM versión 5.0 (2012).

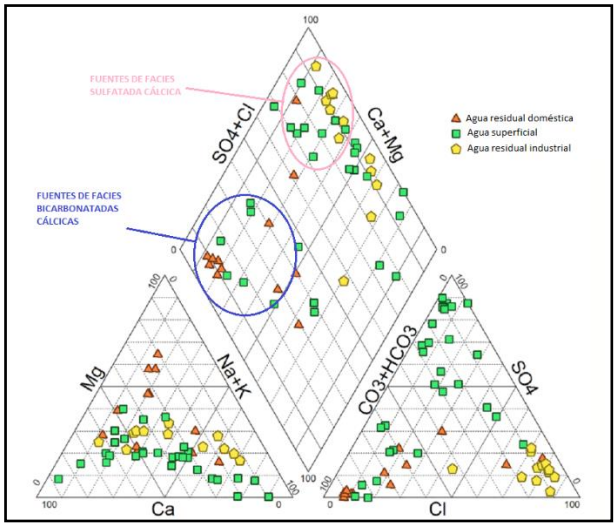


Figura 5.5. Diagrama de Piper

b) Análisis estadístico multivariado

Se han utilizado métodos y modelos estadísticos para evaluar la calidad y cantidad del agua superficial en varias partes del mundo. Por ejemplo, las técnicas estadísticas multivariables ayudan a identificar posibles factores o fuentes que influyen en los sistemas de aguas (superficiales y subterráneas), y ofrecen una herramienta robusta para la gestión de los recursos hídricos, así como una solución a problemas de contaminación. Cuando se tienen muchos parámetros de medición de calidad de agua superficial, se generan grandes conjuntos de datos, que requieren interpretar matrices de datos complejas, para entender mejor la calidad del agua y las interrelaciones entre los parámetros y los sitios de muestreo. Entre las técnicas más empleadas se incluyen el análisis de componentes principales (PCA, siglas en inglés de *Principal Component Analysis*), y el análisis de cluster (CA, siglas en inglés de *Conglomerate Analysis*), junto con el análisis de matriz de correlación de Pearson para resolver la compleja interpretación de los conjuntos de datos. El PCA se usa ampliamente para reducir datos y extraer factores latentes que permitan analizar las relaciones entre las variables observadas (Farnham *et al*., 2003; Gou *et al*., 2007).

El PCA se realizó para extraer los componentes principales (PC, siglas en inglés de *Principal Component*) de los datos de muestreo de agua superficial y así evaluar las variaciones espaciales y la posible fuente de metales pesados y otros compuestos. Si casi toda la variabilidad entre las muestras puede explicarse por una pequeña cantidad de PC, entonces las relaciones entre las muestras multivariables pueden evaluarse mediante una simple inspección de una gráfica de 2 o 3 dimensiones. Por otro lado, el CA se realizó para clasificar los elementos de diferentes fuentes en función de las similitudes de sus propiedades químicas (Rahman *et al*., 2014b). El agrupamiento jerárquico es el enfoque que proporciona relaciones de similitud entre cualquier muestra y todo el conjunto de datos (McKenna, 2003), y se ilustra típicamente mediante un dendrograma (Figura 5.6).

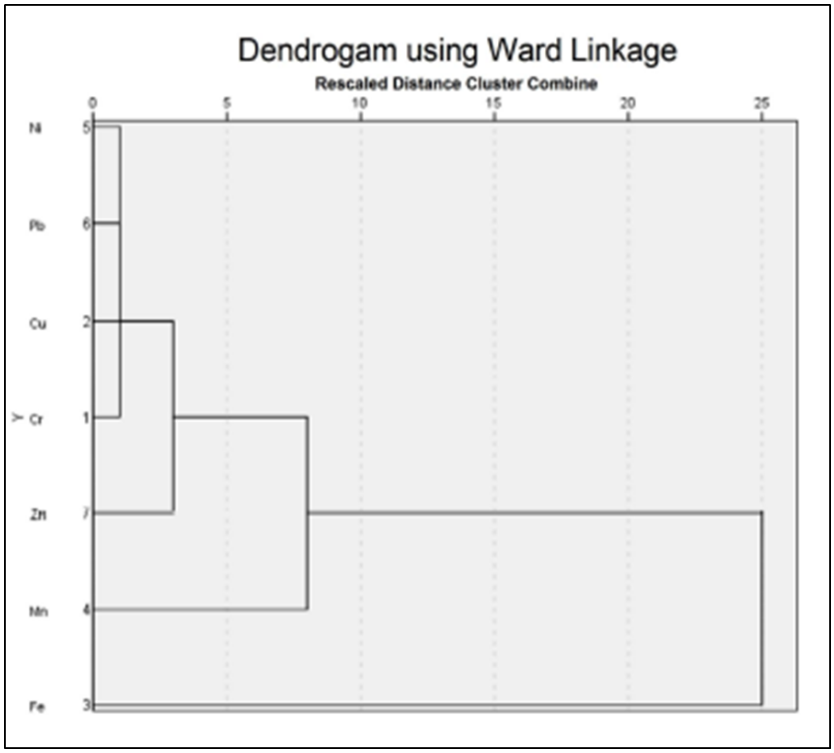


Figura 5.6. Dendograma
Fuente: Magesh *et al*. (2017)

En la presente evaluación los datos obtenidos del muestreo de agua superficial se sometieron a estas herramientas estadísticas para: i) definir su origen geogénico y antropogénico, ii) para identificar posibles fuentes de contaminación como los PAM, y iii) para estimar la contribución de posibles fuentes en la concentración de determinados parámetros. Todos los análisis multivariados se llevaron a cabo con el software IBM SPSS Statistics Subscription versión libre.

5.3.6.2 Comunidades hidrobiológicas

El criterio de análisis de las comunidades hidrobiológicas se basó en el cálculo de diferentes atributos de la comunidad; tales como, composición, riqueza, abundancia, índices de diversidad alfa y beta; así como, análisis de componentes principales, análisis de correspondencia canónica, análisis de escalamiento multidimensional, análisis de similitud y análisis de similitud porcentual.

Los cálculos de todos los análisis se realizarán con el software de código abierto Paleontological Data Analysis Past v3.15.

- **Composición, riqueza y abundancia**

Se realizó la clasificación taxonómica (phylum, clase, orden, familia y especie) de las muestras colectadas de perifiton (microalgas y microorganismos) y macroinvertebrados bentónicos.

La composición, la riqueza y la abundancia de perifiton (microalgas y microorganismos) fueron analizadas y expresadas gráficamente teniendo como base la categoría taxonómica

phylum. En el caso de macroinvertebrados bentónicos, se tuvo como base la categoría taxonómica orden. La identificación taxonómica alcanzó idealmente el nivel de especie; en los casos donde no fue posible, se determinó el menor nivel taxonómico posible.

Es necesario indicar que los resultados de abundancia se analizaron en base a la densidad de la muestra, representándose para el perifiton (microalgas y microorganismos) en organismos/cm^2 y para macroinvertebrados bentónicos en organismos/m^2.

- **Diversidad alfa**

Para la evaluación de diversidad de especies (diversidad alfa) se utilizaron los índices de diversidad verdadera (Números de Hill) en base al número de especies de cada punto de muestreo para cada comunidad hidrobiológica. Para ello se usó la variable N1 como la modificación del índice Shannon-Wiener (H') (Jost, 2006), cuya fórmula se representa en la ecuación 1.

$$N1 = exp(H') \qquad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

H´ = Índice de Shannon-Wiener.

Por otro lado, se usará la variable N2 como la modificación del índice de Simpson (D) (Jost, 2006), cuya fórmula se representa mediante la ecuación 2.

$$N2 = \frac{1}{Índice\ de\ Simpson} \qquad \text{Ecuación 2}$$

Por último, se desarrollará el índice de equidad de Pielou, el cual mide la proporción de la diversidad observada con relación a la máxima diversidad esperada. Su valor se encuentra entre 0 y 1, de forma que 1 corresponde a situaciones donde todas las especies son igualmente abundantes (Pielou, 1975; Peet, 1974). Su fórmula es la que se indica en la ecuación 3.

$$J' = \frac{H'}{H'max} \qquad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

J' = Índice de equidad de Pielou
H' = Índice de diversidad de Shannon-Wiener
H' max = Ln(S)
S = número de especies.

- **Diversidad beta**

Para la evaluación de diversidad beta se utilizó el coeficiente de similitud de Bray Curtis en base a la similitud de especies entre puntos de muestreo para cada comunidad hidrobiológica y se determinará mediante la ecuación 4:

$$IBC = 1 - \frac{(\Sigma\ xi - yi)}{(\Sigma\ xi + yi)} \qquad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

IBC : índice de Bray Curtis
Xi : abundancia o densidad de especies i en un conjunto 1
Yi : abundancia de las especies i en otro conjunto

Para facilitar el análisis de los valores de similitud de manera visual, se elaboraron dendrogramas mediante la unión de pares promedio, esta gráfica resumirá la similitud de las especies entre 2 puntos.

- **Calidad biológica**

La calidad biológica de los cuerpos de agua se estimó de manera referencial a través del índice biótico andino - *Andean Biotic Index* (ABI) propuesto por Acosta *et al*. (2009) y se obtuvo sumando los valores de sensibilidad de cada familia de macroinvertebrados bentónicos (Tabla 5.13), presente en cada punto de muestreo.

Tabla 5.13. Puntajes de sensibilidad asignadas a las familias de macroinvertebrados bentónicos para la obtención del índice ABI

Orden / Clase	Familia	Puntaje	Orden / Clase	Familia	Puntaje
Turbellaria	*	5	Trichoptera	Polycentropodidae	8
Hirudinea	*	3		Xiphocentronidae	8
Oligochaeta	*	1		Glossosomatidae	7
Gasteropoda	Ancylidae	6		Limnephilidae	7
	Hydrobiidae	3		Hydroptilidae	6
	Limnaeidae	3		Hydropsychidae	5
	Physidae	3	Lepidoptera	Pyralidae	4
	Planorbidae	3	Coleoptera	Dryopidae	5
Bivalvia	Sphaeriidae	3		Elmidae	5
Amphipoda	Hyalellidae	6		Hydraenidae	5
Hydracarina	*	4		Lampyridae	5
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	10		Psephenidae	5
	Oligoneuridae	10		Ptilodactylidae	5
	Leptohyphidae	7		Scirtidae(helodidae)	5
	Baetidae	4		Gyrinidae	3
Odonata	Polythoridae	10		Dytiscidae	3
	Calopterygidae	8		Hydrophilidae	3
	Gomphidae	8		Staphylinidae	3
	Aeshnidae	6	Diptera	Blepharoceridae	10
	Coenagrionidae	6		Athericidae	10
	Libellulidae	6		Simuliidae	5
Plecoptera	Perlidae	10		Tipulidae	5
	Gripopterygidae	10		Ceratopogonidae	4
Heteroptera	Corixidae	5		Dixidae	4
	Gerridae	5		Dolichopodidae	4
	Naucoridae	5		Empididae	4
	Notonectidae	5		Limoniidae	4
	Veliidae	5		Stratiomyidae	4
	Belostomatidae	4		Tabanidae	4
Trichoptera	Anomalopsychidae	10		Psychodidae	3
	Calamoceratidae	10		Chironomidae	2
	Helicopsychidae	10		Culicidae	2
	Odontoceridae	10		Ephydridae	2
	Hydrobiosidae	8		Muscidae	2
	Leptoceridae	8		Syrphidae	1
	Philopotamidae	8			

*: Las valoraciones presentadas se basan en la categoría taxonómica Orden o Clase.
Fuente: Acosta *et al*. (2009)

La sumatoria obtenida se comparó con la tabla de «estados de calidad del cuerpo de agua» (Tabla 5.14), propuesta por Acosta *et al.* (2009).

Tabla 5.14. Estados de la calidad del cuerpo de agua según el ABI

Estado de la calidad	ABI	Color
Muy bueno	>74	Azul
Bueno	45 – 74	Verde
Moderado	27 – 44	Amarillo
Malo	11 – 26	Naranja
Pésimo	<11	Rojo

El grado de perturbación de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos se estimó recategorizando las especies registradas a grupos bioindicadores, definidos referencialmente a partir de la clasificación de familias del índice ABI, considerando 3 grupos.

El primer grupo corresponde a las familias sensibles, que presentan un alto nivel de sensibilidad que están en aguas limpias y bien oxigenadas según las categorías del ABI (entre 8 y 10).

El segundo grupo corresponde a las especies que se agrupan dentro de familias facultativas, que según las condiciones pueden tener un grado intermedio de sensiblidad/tolerancia (entre 4 y 7).

El tercer grupo corresponde a las especies que se agrupan dentro de familias tolerantes, que presentan un bajo nivel de sensibilidad (entre 1 y 3) que viven en ambientes alterados.

- **Calidad ecológica**

El Protocolo Simplificado y guía de evaluación de la calidad ecológica de los ríos andinos (CERA-S) (Encalada *et al*., 2011) dió como resultado la calidad ecológica de los cuerpos de agua mediante la combinación de la valoración hidromorfológica y la calidad biológica (macroinvertebrados bentónicos). La base del protocolo es la valoración de la calidad biológica del cuerpo de agua y las características de su entorno y su representación mediante una combinación de colores. En un tramo entre 50 m y 100 m de longitud del punto de muestreo se observaron y valoraron las siguientes características hidromorfológicas:

i. Estructura y naturalidad de la vegetación de ribera
ii. Continuidad de la ribera
iii. Conectividad de la vegetación de ribera con otros elementos del paisaje
iv. Presencia de basuras y escombros
v. Naturalidad del canal fluvial
vi. Composición del sustrato
vii. Regímenes de velocidad y profundidad del río
viii. Elementos de heterogeneidad

Una vez obtenidas las puntuaciones para cada característica hidromorfológica se obtuvo una sumatoria de todas ellas, con la finalidad de tener un solo valor por punto, dichos valores fueron comparados con la escala de la Tabla 5.15.

Tabla 5.15. Calidad hidromorfológica del cuerpo de agua

Clase	Puntuación	Calidad hidromorfológica
1	> 35	Excelente
2	28 - 35	Buena
3	20 - 28	Moderada
4	10 - 20	Mala
5	0 - 10	Pésima

Se utilizó los datos de calidad biológica y calidad hidromorfológica para obtener la calidad ecológica que resultó combinando las valoraciones de ambas (Tabla 5.16).

Tabla 5.16. Calidad ecológica del cuerpo de agua

		Calidad Biológica				
		Excelente	Buena	Moderada	Mala	Pésima
Calidad hidromorfológica	Excelente	Excelente	Buena	Moderada	Mala	Pésima
	Buena	Buena	Buena	Moderada	Mala	Pésima
	Moderada	Buena	Moderada	Moderada	Mala	Pésima
	Mala	Mala	Moderada	Moderada	Mala	Pésima
	Pésima	Moderada	Mala	Mala	Pésima	Pésima

- **Análisis de componentes principales**

Para determinar el gradiente de presiones que afecta a las comunidades perifiton (microalgas) y macroinvertebrados bentónicos se realizó un análisis de componentes principales (ACP) utilizando las variables como los parámetros *in situ*: temperatura, potencial de hidrógeno, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y las concentraciones de los metales totales.

- **Análisis de correspondencia canónica**

Para determinar la relación entre las variables ambientales del agua y la abundancia relativa de macroinvertebrados bentónicos se realizó el análisis de correspondencia canónica (ACC). Dicho análisis aportó información importante sobre el porcentaje de variabilidad de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos que puede ser explicado por el efecto de las variables ambientales.

Para el análisis fueron seleccionadas como variables ambientales aquellas especies que presenten una abundancia relativa (A.R.) ≥ 5 y una frecuencia relativa (F.R.) ≥ 6 en relación con el total de puntos evaluados; mientras que, las variables ambientales correspondieron a los parámetros de campo y metales totales del ACP, el cual explicó mayor variabilidad de datos.

- **Análisis Escalamiento Multidimensional**

Se comparó el grado de similitud entre los puntos de muestreo y cuerpos de agua evaluados según la composición de especies de cada comunidad hidrobiológica, a través del coeficiente de similitud de Bray-Curtis (Warwick y Clarke, 1995). Para describir de manera visual el grado de similitud entre los puntos de monitoreo se elaborará una gráfica mediante el método de escalamiento multidimensional (MDS, por sus siglas en inglés).

- **Análisis de Similitud**

Esta prueba no paramétrica determinó la diferencia significativa entre 2 o más grupos, en función de cualquier medida de distancia (Warwick y Clarke, 1995). Las distancias se convierten en rangos. ANOSIM (del inglés *Analysis of Similarity*) se utiliza normalmente en la comparación de taxa entre grupos de muestras ecológicas.

- **Análisis de Similitud Porcentual o Disimilitud**

Es un método para determinar los taxa que son los principales responsables de la diferencia registrada entre grupos de muestras (Warwick y Clarke, 1995). La medida de similitud de Bray-Curtis es implícita al Análisis de Similitud Porcentual (Simper). De esta manera se pudo definir especies indicadoras de la calidad ambiental en los puntos de muestreo.

5.3.7 Criterios de evaluación

5.3.7.1 Agua

a) Comparación con ECA para agua 2017

La clasificación de los cuerpos de agua del estudio se ha realizado de acuerdo a lo establecido en la Resolución Jefatural N.° 056-2018-ANA. Los cuerpos de agua en el ámbito de estudio que no se encuentran mencionados en la resolución, al ser aportantes del río San Juan, se clasificaron en la categoría 3.

Los resultados obtenidos del análisis de agua superficial fueron comparados con los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA para Agua) – Categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales, subcategorías D1 y D2; y Categoría 4: conservación del ambiente acuático, subcategoría E1 para laguna y lagos; aprobados mediante Decreto Supremo N.° 004-2017-MINAM (Tabla 5.17).

Tabla 5.17. Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA) empleados en la evaluación ambiental.

Parámetros	Unidad	Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA)			
		Decreto Supremo N.° 004-2017-MINAM			
		Categoría 3			Categoría 4
		D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales	E1: Lagunas y lagos
		Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido	D2: Bebida de animales	
Potencial de hidrogeno (pH)	Unid. pH	6,5 – 8,5		6,5 – 8,4	6,5 – 9,0
Temperatura	º C	Δ3		Δ3	Δ3
Oxígeno disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4		≥ 5	≥ 5
Conductividad	µs/cm	2500		5000	1000
Cloruros	mg/L	500		---	---
Fluoruros	mg/L	1		---	---
Carbonatos	mg/L	---		---	---
Bicarbonatos	mg/L	518		---	---
Aceites y grasas	mg/L	5		10	5,0
Nitratos + Nitritos	mg/L	100		100	---
Nitratos	mg/L	---		---	13
Nitritos	mg/L	10		10	---
Sulfatos	mg/L	---		---	---
Acidez	mg/L	---		---	---
Sólidos suspendidos totales	mg/L	---		---	≤ 25
Cianuro wad	mg/L	0,1		0,1	
Antimonio	mg/L	---		---	0,64
Aluminio	mg/L	5		5	---
Arsénico	mg/L	0,1		0,2	0,15
Bario	mg/L	0,7		---	0,7
Berilio	mg/L	0,1		0,1	---
Boro	mg/L	1		5	---
Cadmio	mg/L	0,01		0,05	---
Cadmio disuelto	mg/L	---		---	0,00025
Cobre	mg/L	0,2		0,5	0,1
Cobalto	mg/L	0,05		1	---

Parámetros	Unidad	Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA)			
		Decreto Supremo N.° 004-2017-MINAM			
		Categoría 3			Categoría 4
		D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales	E1: Lagunas y lagos
		Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido	D2: Bebida de animales	
Cromo total	mg/L	0,1		1	---
Cromo VI	mg/L	---		---	0,011
Hierro	mg/L	5		1	---
Fósforo total	mg/L	---		---	0,035
Litio	mg/L	2,5		2,5	---
Magnesio	mg/L	150		250	---
Manganeso	mg/L	0,2		0,2	---
Mercurio	mg/L	0,001		0,001	0,0001
Níquel	mg/L	0,2		1	0,052
Plomo	mg/L	0,05		0,05	0,0025
Selenio	mg/L	0,05		0,05	0,005
Talio	mg/L	---		---	0,0008
Zinc	mg/L	2		24	0,12
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ML	1000	2000	1000	1000

Δ 3: Significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada
--- : No presenta valor de comparación

b) Cálculo del Índice de Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales ICARHS

El cálculo del ICARHS, se realizó utilizando la metodología propuesta por la ANA (Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales ICARHS - Resolución Jefatural N.° 084-2020-ANA). Este índice permite la elaboración de un diagnóstico de calidad de los recursos hídricos superficiales. La ANA recomienda realizar estos cálculos a partir de 4 monitoreos para un punto de muestreo, se precisa que en el presente informe el cálculo del ICARSH se realizó con los datos de un solo muestreo.

El cálculo del ICARHS, depende de 2 subíndices, S1 (materia orgánica) y S2 (físico-químico y metales), la calificación final es determinada por el menor valor y calificación critica.

$$\text{ICARHS} = \text{mín.}\ (S1, S2) \qquad \text{Ecuación 5}$$

Se debe tener en cuenta la clasificación de cuerpo de aguas superficiales aplicando el ECA para agua, para la determinación de los parámetros que se usaran para dicho cálculo.

Los parámetros para el cálculo de cada subíndice se observan en la Tabla 5.18.

Tabla 5.18. Parámetros a evaluar en el ICARHS para la Categoría 3 de agua

Parámetros	Subíndice
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)	S1
Demanda química de oxígeno (DQO)	
Oxígeno disuelto	
Coliformes termotolerantes	
Potencial de hidrógeno (pH)	S2
Arsénico	
Aluminio	

Parámetros	Subíndice
Manganeso	
Hierro	
Cadmio	
Plomo	
Boro	
Cobre	

Para la determinación de los subíndices (S1 y S2) se aplica la fórmula elaborada por el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (CCMEWQI) y modificada por los Ministerios del Ambiente de Alberta y Columbia Britanica, que comprende tres factores (alcance, frecuencia y amplitud), lo que resulta en un número matemático un valor único (entre 0 y 100) que va representar y describir el estado de calidad del agua de un punto de monitoreo, un curso de agua, río o cuenca.

$$\text{CCMEWQI} = 100 - \left(\frac{\sqrt[2]{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1{,}732}\right) \qquad \text{Ecuación 6}$$

F1 – Alcance, representa la cantidad de parámetros de calidad que no cumplen los valores establecidos en la normativa, respecto al total de parámetros a evaluar.

$$\text{F1} = \frac{\text{Número de parámetros que no cumplen los ECA–agua}}{\text{Número total de parámetros a evaluar}} \qquad \text{Ecuación 7}$$

F2 – Frecuencia, representa la cantidad de datos que no cumplen los valores establecidos en la normativa, respecto al total de datos de los parámetros a evaluar.

$$\text{F2} = \frac{\text{Número de los parámetros que no cumplen los ECA–agua de los datos evaluados}}{\text{Número total de datoss a evaluar}} \qquad \text{Ecuación 8}$$

F3 – Amplitud, es una medida de la desviación que existe en los datos, determinada por la suma normalizada de excedentes, es decir los excesos de los datos respecto al número total de datos.

$$\text{F3} = \frac{\text{Suma normalizada de excedentes}}{\text{Suma normalizada de excedentes+1}} * 100 \qquad \text{Ecuación 9}$$

La suma normalizada de excedentes (nse) se obtiene según la siguiente ecuación.

$$\text{nse} = \frac{\text{Sumatoria de excedentes}}{\text{Total de datos}} \qquad \text{Ecuación 10}$$

La Tabla 5.19 valoración del ICARS

Tabla 5.19. Interpretación de la clasificación ICARS

ICA-PE	Clasificación	Interpretación
90 - 100	Excelente	La calidad del agua está protegida con ausencia de amenazas o daños. Las condiciones son muy cercanas a niveles naturales o deseadas
75 - 89	Bueno	La calidad del agua se aleja un poco de la calidad natural del agua. Sin embargo, las condiciones deseables pueden estar con algunas amenazas o daños de poca magnitud
45 - 74	Regular	La calidad del agua natural ocasionalmente es amenazada o dañada. La calidad del agua a menudo se aleja de los valores deseables. Muchos de los usos necesitan tratamiento
30 – 44	Malo	La calidad del agua no cumple con los objetivos de calidad, frecuentemente las condiciones deseables están amenazadas o dañadas. Muchos de los usos necesitan tratamiento

ICA-PE	Clasificación	Interpretación
0 - 29	Pésimo	La calidad del agua no cumple con los objetivos de calidad, casi siempre esta amenazada o dañada. Todos los usos necesitan previo tratamiento.

5.3.7.2 Sedimento

a) Comparación con la guía canadiense

Los resultados de metales totales del muestreo de sedimento fueron comparados referencialmente con los valores de la Guía de Calidad Ambiental de Canadá – CEQG (*Canadian Environmental Quality Guidelines–Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life for Fresh Water*)[37] considerados para sedimentos de agua dulce, al no contarse con una normativa nacional para sedimento.

En la Tabla 5.20 se presenta Los valores establecidos en la guía internacional son para el arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, plomo y zinc, precisando la concentración por debajo de la cual no se esperan efectos biológicos adversos: valor ISQG (*Interim Sediment Quality Guideline)* y la concentración por encima de la cual se encuentran efectos biológicos adversos con frecuencia: valor PEL (*Probable Effect Level*).

Tabla 5.20. Concentraciones de metales en sedimentos de agua dulce, según la guía canadiense (CEQG)

Parámetro	Guía canadiense (CEQG)		
	ISQG (mg/kg)	PEL (mg/kg)	Año de publicación
Arsénico	5,9	17	1998
Cadmio	0,6	3,5	1997
Cromo	37,3	90	1998
Cobre	35,7	197	1998
Mercurio	0,17	0,486	1997
Plomo	35	91,3	1998
Zinc	123	315	1998

Fuente: *Canadian Environmental Quality Guidelines* (CEQG)

Los resultados de los parámetros evaluados fueron digitalizados y ordenados en una base de datos los que fueron comparados con los valores ISQG y PEL de la guía descrita.

b) Factor de enriquecimiento

Según Simex y Helz (1981), se empleó el factor de enriquecimiento (FE, por sus siglas en inglés de Enrichment Factor) para evaluar el grado de contaminación y para comprender la distribución de elementos de origen antrópico de sitios por elementos individuales en sedimento. El FE se considera como una herramienta eficaz para evaluar la magnitud de contaminantes en el medio ambiente (Franco-Uria *et al*., 2009). Se eligió hierro (Fe) como elemento control (Seshan *et al*., 2010).

Para identificar concentraciones inusuales de metales, se empleó la normalización geoquímica de los datos de metales pesados a un elemento conservador, como Fe (Mucha *et al*., 2003). Los valores de EF < 2 indican que el metal proviene íntegramente de materiales de la corteza o de procesos naturales; mientras que, los valores de EF > 2 sugieren que es

[37] *Canadian Environmental Quality Guidelines. Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life for Fresh water* (Guía de calidad ambiental de Canadá para sedimentos en cuerpos de agua dulce). Disponible en: http://www.ccme.ca/en/resources/canadian_environmental_quality_guidelines/.

más probable que las fuentes sean antropogénicas (Liaghati *et al*. 2003). En este estudio, el hierro también se ha utilizado como un marcador conservador para distinguir los componentes naturales de los antropogénicos.

$$\text{Enrichment Factor} = \left(\frac{\text{M}}{\text{Fe}}\right)\text{sample}/\left(\frac{\text{M}}{\text{Fe}}\right)\text{background} \qquad \text{Ecuación 11}$$

Dónde:

$\left(\frac{M}{Fe}\right) sample$: Razón entre el metal X y el Fe presente en la muestra
$\left(\frac{M}{Fe}\right) background$: Razón entre el metal X y el Fe presente en *background,* para el presente estudio se determinó el nivel de referencia, debido a que en área de estudio no es un lugar prístino, sino que se desarrolla actividad antropogénica incluso desde antes de la época colonial. Es así que el termino adecuado corresponde a nivel de referencia, cuya metodología se presenta en el ítem 5.2.5.

Se conocen 6 clases de factor de enriquecimiento (FE), a medida que aumentan sus valores, también aumentan las contribuciones de los orígenes antropogénicos (Sutherland, 2000), tal como se detalla en la Tabla 5.21.

Tabla 5.21. Relaciones entre los valores del factor de enriquecimiento (*EF*) y los niveles de contaminación

Calidad de sedimento	Factor de enriquecimiento (EF)
Concentración de fondo	EF ≤ 1
Agotamiento al enriquecimiento mínimo	1 < EF ≤ 2
Enriquecimiento moderado	2 < EF ≤ 5
Enriquecimiento significativo	5 < EF ≤ 20
Enriquecimiento muy alto	20 < EF ≤ 40
Enriquecimiento extremadamente alto	EF > 40

c) Índice de geoacumulación

En adición a la comparación de los resultados de sedimento con la guía referencial correspondiente, se emplearon los resultados del nivel de fondo geoquímico (obtenidos de los resultados de sedimento de los cuerpos de agua superficial que no tienen influencia de la actividad minera) para hallar un índice de evaluación de contaminación: el índice de geoacumulación (Igeo). Originalmente usado para la evaluación de sedimento; se ha aplicado también con éxito para la medición de la contaminación en suelos (Cabrera *et al*., 1999; Grzebisz *et al*., 2002; Yaqin *et al*., 2008). Dicho índice se calculó utilizando la siguiente ecuación (Müller, 1969):

$$I_{geo} = \log_2\left(\frac{C_n}{1{,}5B_n}\right) \qquad \text{Ecuación 12}$$

Dónde:
C_n: es la concentración del metal en la muestra (mg/kg),
B_n: es el valor de fondo geoquímico (mg/kg). La constante 1,5 permite analizar las fluctuaciones naturales en el contenido de una sustancia dada en el medio ambiente y detectar pequeñas influencias antropogénicas.

De acuerdo con Müller (1969), las relaciones correspondientes entre los valores del Igeo y los niveles de contaminación son reportados en la Tabla 5.22.

Tabla 5.22. Relaciones entre los valores del índice de geoacumulación (I_{geo}) y los niveles de contaminación

Calidad de sedimento	Índice de geoacumulación (I_{geo})
No contaminado	$I_{geo} < 0$
No contaminado a moderadamente contaminado	$0 < I_{geo} \leq 1$
Moderadamente contaminado	$1 < I_{geo} \leq 2$
Moderadamente a fuertemente contaminado	$2 < I_{geo} \leq 3$
Fuertemente contaminado	$3 < I_{geo} \leq 4$
Fuerte a extremadamente contaminado	$4 < I_{geo} \leq 5$
Extremadamente contaminado	$I_{geo} > 5$

Fuente: Müller (1969)

d) Factor de contaminación

El nivel de contaminación puede expresarse mediante el factor de contaminación (CF, por sus siglas en inglés de Contamination Factor) (Tomlinson *et al*., 1980). El CF es la relación obtenida al dividir la concentración de cada metal en el sedimento por la línea de base o el valor de fondo como la siguiente ecuación:

$$\mathrm{CF} = \frac{C_{metal\ pesado}}{C_{Fondo}} \qquad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

CF < 1, indica una contaminación baja; 1<CF≤3, una contaminación moderada; 3<CF≤6, una contaminación significativa y CF > 6 una contaminación muy alta.

e) Riesgo ecológico potencial

El índice de riesgo ecológico potencial (PER, por sus siglas en inglés de Potential Ecological Risk) se utilizó para evaluar el riesgo ecológico potencial de los metales el sedimento estudiado (Tabla 5.24). El método del índice de riesgo ecológico potencial es simple, relativo y preciso (Hakanson, 1980; Huang *et al.*, 2004), no solo refleja el imparto individual de los metales en el medio ambiente ecológico, sino que también tiene en cuenta los umbrales de fondo geoquímico (Zhang *et al.*, 2005) y combina la química con la toxicología biológica y la ecología. Según lo propuesto por (Guo *et al.*, 2010), las ecuaciones para calcular el PER son:

$$E_r^i = T_f^i C_f^i \quad ; \qquad PER = \sum_{i=1}^{n} E_r^i \qquad \text{Ecuación 14 y 15}$$

Dónde:

C_f^i : factor de contaminación del i-ésimo metal.
T_f^i : factor de respuesta para la toxicidad del i-ésimo metal. Se definen para 6 metales: Cd (30), Cu (5), Pb (5), Zn (1), Hg (40) y As (10).
E_r^i : factor de riesgo ecológico potencial de metales individuales.

PER : factor de riesgo ecológico potencial de múltiples metales; r = factor de respuesta en T_f^i y factor de riesgo en E_r^i; n = sedimentos prístinos o no contaminados; s = muestra de sedimento investigado; i = cualquiera de los 6 metales anteriores.

Tabla 5.23. Estándares de calificación de riesgo ecológico potencial (PER)

Grados de riesgo ecológico potencial	Índice de riesgo ecológico potencial (PER)
Grado bajo	PER < 150
Moderado	150 < PER ≤ 300
Severo	300 < PER ≤ 600
Grave	PER > 600

5.4 Objetivo específico 4: Identificar los sitios contaminados en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo

Este ítem proporciona las metodologías aplicadas para el muestreo de identificación y muestreo de nivel de fondo de suelos en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo, además proporciona los métodos estadísticos para el cálculo y determinación de valores de nivel de fondo de los elementos potencialmente tóxicos[38]; asimismo, se presenta la aplicación de imágenes multiespectrales e índices NDVI y NDRE empleados para la justificación en la identificación de sitios contaminados.

5.4.1 Guías utilizadas para la evaluación

Para el muestreo de identificación y muestreo de nivel de fondo en suelos, y para la justificación de la identificación de sitios contaminados, se utilizaron las guías detalladas en la Tabla 5.24.

Tabla 5.24. Guías para la el muestreo e identificación de suelo, y para el levantamiento fotogramétrico

Matriz	Autoridad emisora	País	Dispositivo legal	Referencia	Año	Sección
Suelos	Ministerio del Ambiente (Minam)	Perú	Resolución Ministerial N.° 085-2014-MINAM	Guía para muestreo de suelos	2014	Sección 1.3. Tipos de muestreo, sección 5
			Resolución Ministerial N.° 012-2017-MINAM	Criterios para la Gestión de Sitios Contaminados	2017	Artículos 4, 5,6, 7, 9 y 12
			(*)	Manual de lineamientos y procedimientos para la elaboración y evaluación de informes de identificación de sitios contaminados	2015	Parte A del manual

[38] La FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*, por sus siglas en inglés), en su informe sobre la contaminación del suelo: «*A hidden reality*», elaborado por Rodríguez-Eugenio *et al.*, 2018 y publicado en Roma el 2018; hace referencia a los elementos potencialmente contaminantes arsénico, antimonio, cadmio, cobre, bario, estaño, mercurio, selenio, plomo y zinc.

Matriz	Autoridad emisora	País	Dispositivo legal	Referencia	Año	Sección
Levantamiento aerofotogramétrico con RPAS	Ministerio de transporte y comunicaciones (MTC)	Perú	Decreto Supremo N° 050-2001-MTC	Ley Aeronáutica Civil 27261	2001	Todo
	Centro nacional de estimación, prevención y reducción del riesgo de desastres (Cenepred)	Perú	Resolución Jefatural N.° 051-2017-CENEPRED/J.	Protocolo para la operación de los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS)	2017	Todo
	Ministerio de transporte y comunicaciones (MTC)	Perú	Resolución Directoral N° 501-2015-MTC/12	Norma técnica complementaria 001-2015 - Requisitos para las operaciones de Sistemas de Aeronaves Piloteadas a Distancia	2015	Todo
	Instituto Geográfico Nacional	Perú	Resolución Jefatural N.° 0139-2015/IGN/UCCN	Norma técnica para posicionamiento geodésico estático relativo con receptores del Sistema Satelital de Navegación Global	2015	Todo
	Instituto Geográfico Nacional	Perú	Resolución Jefatural N.° 057-2016/IGN/UCCN	Norma técnica para levantamientos geodésicos verticales	2016	Todo
	Centro nacional de estimación, prevención y reducción del riesgo de desastres (Cenepred)	Perú	Resolución Jefatural N.° 051-2017 CENEPRED/J	Protocolo para la operación de los sistemas de aeronaves piloteadas a distancia (RPAS)	2017	Todo

(*): Publicado en la dirección URL: http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/07/MANUAL-DE-LINEAMIENTOS-Y-PROCEDIMIENTOS-ELABORACION-DE-IISC.pdf

5.4.2 Ubicación de puntos de muestreo

Para la ubicación de los puntos muestreo de suelo, previo a la salida de campo se elaboró mapas de cambios por degradación de vegetación, mediante el uso de de imágenes satelitales, con la finalidad de identificar las áreas de potencial interés (en adelante, API). Señalar que, se emplearon imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 8 de 1988, 1990, 1994, 1997, 1999, 2005, 2007, 2011, 2013, 2015 y 2019 correspondientes a la estacionalidad seca (julio a octubre). Para su obtención y demás procesos se usó de la plataforma Google Earth Engine y el software Arcgis y Qgis.

Se colectaron muestras de suelo en 86 puntos en API, distribuidos en 6 zonas de la siguiente manera: 6 puntos en el API PAM20, 5 puntos en el API PAM22, 8 puntos en el API PAM50, 30 puntos en el API DR, 25 puntos en el API PRS y 12 puntos compuestos en el API MF; en el muestreo de nivel de fondo se establecieron 36 puntos de muestreo compuesto distribuidos en 3 áreas aledañas a las áreas de potencial interés (12 puntos en el nivel de fondo A, 12 puntos en el nivel de fondo C y 12 puntos en el nivel de fondo D). En la Tabla 5.25 se presentan los puntos de muestreo en las API y niveles de fondo, y en el Anexo 1.3 (RC-048-2020-STEC) se visualiza la ubicación espacial de esos puntos. Asimismo, se realizaron 4 calicatas para la caracterización y muestreo del perfil del suelo (*i.e.* horizontes del suelo);

cabe precisar que, las calicatas se ubicaron en las API (DR y PRS) y en los niveles de fondo (MF-C y MF-D).

Adicionalmente, se realizó el levantamiento aerofotogramétrico con RPAS[39] sobre el sector donde se identificaron las API, con el objeto de generar índices de vegetación, ortomosaicos en RGB, modelos de elevación digital (DEM, siglas en inglés de Digital Elevation Model). En la Tabla 5.26 se muestran la ubicación de levantamiento aerofotogramétrico con RPAS, y en el Anexo 1.1 (RC-063-2020-STEC) se visualiza la ubicación espacial de ese levantamiento; y en la Tabla 5.27 se presenta la ubicación de puntos de posicionamiento geodésico, y en el Anexo 1.1 (RC-063-2020-STEC) se visualiza la ubicación espacial de esos puntos.

Tabla 5.25. Ubicación y descripción de puntos de muestreo en las API y niveles de fondo

N.°	Nombre del área	Código del punto de muestreo	Muestreo		Coordenadas UTM WGS 84 – Zona 18L		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
			Fecha	Hora	Este (m)	Norte (m)		
Área de potencial interés (API)								
1	API PAM20	CS-P20-01	17/09/2020	12:20	354698	8820958	4214	API ubicado en el distrito de Simón Bolívar, aproximadamente a 3,00 km de la comunidad campesina San Antonio de Rancas en el margen izquierdo de la carretera afirmada Comunidad campesina San Antonio de Rancas – Laguna Alcacocha, en el área donde se ubicó el relave colonial Tauro 6
2		CS-P20-02	17/09/2020	11:45	354733	8820960	4210	
3		CS-P20-03	17/09/2020	12:30	354697	8820994	4226	
4		CS-P20-04	17/09/2020	12:45	354726	8820990	4226	
5		CS-P20-05	17/09/2020	13:20	354710	8820940	4173	
6		CS-P20-06(**)	17/09/2020	13:00	354737	8820925	4202	
7		CS-P20-05A(+)	17/09/2020	13:20	354710	8820940	4173	
8		CS-P20-06A(+)	17/09/2020	13:00	354737	8820925	4202	
9	API PAM50	CS-P50-01	18/09/2020	10:15	361878	8798187	4067	API ubicado en el distrito de Vicco a 3,30 km aproximadamente noroeste de la comunidad campesina de Vicco, siguiendo la carretera afirmada hacia la laguna Chinchaycocha, en el área donde se ubicó el relave colonial Chaquiniyo
10		CS-P50-02	18/09/2020	10:30	361875	8798150	4103	
11		CS-P50-03	18/09/2020	10:40	361878	8798113	4103	
12		CS-P50-04	18/09/2020	10:55	361915	8798072	4099	
13		CS-P50-05(**)	18/09/2020	10:45	361882	8798069	4111	
14		CS-P50-06	18/09/2020	11:30	361885	8798022	4057	
15		CS-P50-07	18/09/2020	11:20	361919	8798038	4109	
16		CS-P50-08	18/09/2020	11:40	361890	8797993	4111	
17		CS-P50-08A(+)	18/09/2020	11:40	361890	8797993	4111	
18	API PAM22	CS-P22-01	19/09/2020	13:55	355153	8819262	4222	API ubicado en el distrito de Simón

[39] RPAS, sigla del inglés *Remotely Piloted Aircraft System*, que significa sistema de aeronave pilotada a distancia; conforme a la Resolución Jefatural N.° 051-2017-CENEPRED/J.

N.°	Nombre del área	Código del punto de muestreo	Muestreo		Coordenadas UTM WGS 84 – Zona 18L		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
			Fecha	Hora	Este (m)	Norte (m)		
19		CS-P22-02	19/09/2020	14:10	355130	8819298	4222	Bolívar, aproximadamente a 1,50 km de la comunidad campesina San Antonio de Rancas margen izquierdo de la carretera afirmada hacia la laguna Alcacocha en el área donde se ubicó el relave colonial canal Rancas
20		CS-P22-03	19/09/2020	13:40	355161	8819295	4220	
21		CS-P22-04	19/09/2020	14:20	355132	8819326	4221	
22		CS-P22-05(**)	19/09/2020	14:30	355148	8819337	4220	
23		CS-P22-05A(+)	19/09/2020	14:30	355148	8819337	4220	
24	API DR	CS-DR-30	19/09/2020	10:25	361897	8799527	4122	API ubicado en el distrito de Vicco a 3,00 km aproximadamente al noroeste de la comunidad campesina de Vicco, siguiendo la carreta hacia la laguna Chinchaycocha y colindante al río San Juan
25		CS-DR-28	19/09/2020	10:45	361839	8799460	4117	
26		CS-DR-29	20/09/2020	09:00	361890	8799464	4140	
27		CS-DR-27	20/09/2020	09:10	361906	8799386	4204	
28		CS-DR-24	20/09/2020	09:20	361946	8799336	4137	
29		CS-DR-20	20/09/2020	09:30	361955	8799286	4137	
30		CS-DR-16	20/09/2020	09:40	361959	8799214	4137	
31		CS-DR-12(**)	20/09/2020	09:55	361952	8799162	4136	
32		CS-DR-11	20/09/2020	10:05	361902	8799146	4138	
33		CS-DR-15	20/09/2020	10:20	361900	8799206	4139	
34		CS-DR-14	20/09/2020	10:35	361836	8799209	4139	
35		CS-DR-13	20/09/2020	10:45	361773	8799204	4139	
36		CS-DR-18	20/09/2020	10:55	361828	8799267	4140	
37		CS-DR-19	20/09/2020	11:05	361894	8799270	4140	
38		CS-DR-23	20/09/2020	11:25	361900	8799345	4146	
39		CS-DR-23A(+)	20/09/2020	11:25	361900	8799345	4146	
40		CS-DR-17	20/09/2020	11:55	361781	8799281	4095	
41		CS-DR-21(**)	20/09/2020	12:10	361771	8799335	4098	
42		CS-DR-22	20/09/2020	12:20	361847	8799338	4100	
43		CS-DR-26	20/09/2020	12:30	361829	8799392	4102	
44		CS-DR-25	20/09/2020	12:40	361781	8799396	4103	
45		CS-DR-25A(+)	20/09/2020	12:40	361781	8799396	4103	
46		CS-DR-08	20/09/2020	13:10	361917	8799067	4107	
47		CS-DR-07	20/09/2020	13:20	361838	8799082	4107	
48		CS-DR-09	20/09/2020	13:30	361769	8799143	4109	
49		CS-DR-10	20/09/2020	13:40	361832	8799141	4109	
50		CS-DR-06	20/09/2020	13:45	361776	8799085	4111	
51		CS-DR-05	20/09/2020	14:00	361725	8799085	4112	
52		CS-DR-02	20/09/2020	14:10	361708	8799027	4114	
53		CS-DR-03	20/09/2020	14:20	361772	8799019	4114	
54		CS-DR-04	20/09/2020	14:30	361831	8799022	4116	

N.°	Nombre del área	Código del punto de muestreo	Muestreo		Coordenadas UTM WGS 84 – Zona 18L		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
			Fecha	Hora	Este (m)	Norte (m)		
55		CS-DR-04A(+)	20/09/2020	14:30	361831	8799022	4116	
56		CS-DR-01(**)	20/09/2020	14:40	361845	8798959	4116	
57		CS-DR-01A(+)	20/09/2020	14:40	361845	8798959	4116	
58		CA-01(*)	24/09/2020	13:00	361829	8799392	4102	
59		CA-01A(*)	24/09/2020	13:00	361829	8799392	4102	
60	API PRS	CS-PRS-01	25/09/2020	09:00	356507	8815724	4199	API en el área donde se ubicó el pasivo ambiental minero Sedimentos del río San Juan, a 6,20 km aproximadamente de la ciudad de Cerro de Pasco ruta hacia la laguna Alcacocha
61		CS-PRS-02	25/09/2020	09:17	356537	8815759	4202	
62		CS-PRS-04	25/09/2020	09:30	356526	8815797	4200	
63		CS-PRS-09	25/09/2020	09:50	356520	8815880	4201	
64		CS-PRS-10	25/09/2020	10:33	356588	8815874	4218	
65		CS-PRS-17(**)	25/09/2020	10:52	356631	8815922	4205	
66		CS-PRS-11	25/09/2020	11:18	356640	8815867	4202	
67		CS-PRS-11A(+)	26/09/2020	11:18	356640	8815867	4202	
68		CS-PRS-12	25/09/2020	11:50	356683	8815865	4203	
69		CS-PRS-13	25/09/2020	12:05	356739	8815862	4204	
70		CS-PRS-08	25/09/2020	12:16	356734	8815819	4204	
71		CS-PRS-07	25/09/2020	12:27	356687	8815811	4205	
72		CS-PRS-03	25/09/2020	12:40	356684	8815761	4205	
73		CS-PRS-06	25/09/2020	12:54	356643	8815809	4206	
74		CS-PRS-05	25/09/2020	15:50	356578	8815816	4197	
75		CS-PRS-05A(+)	25/09/2020	15:50	356578	8815816	4197	
76		CS-PRS-16	26/09/2020	08:50	356581	8815908	4234	
77		CS-PRS-15	26/09/2020	09:07	356530	8815904	4233	
78		CS-PRS-14(**)	26/09/2020	09:21	356476	8815897	4233	
79		CS-PRS-18	26/09/2020	11:01	356474	8815946	4195	
80		CS-PRS-19	26/09/2020	12:07	356537	8815960	4204	
81		CS-PRS-19.2(*)	26/09/2020	12:07	356537	8815960	4204	
82		CS-PRS-22	26/09/2020	12:33	356536	8816006	4209	
83		CS-PRS-22.2(*)	26/09/2020	12:33	356536	8816006	4209	
84		CS-PRS-23	26/09/2020	13:03	356583	8816012	4209	
85		CS-PRS-23.2(*)	26/09/2020	13:03	356583	8816012	4209	
86		CS-PRS-20	26/09/2020	13:10	356590	8815961	4211	
87		CS-PRS-20.2(*)	26/09/2020	13:10	356590	8815961	4211	
88		CS-PRS-24(**)	26/09/2020	13:38	356638	8816005	4215	
89		CS-PRS-24.2(*)	26/09/2020	13:38	356638	8816005	4215	
90		CS-PRS-25	26/09/2020	14:01	356645	8816060	4220	
91		CS-PRS-25.2(*)	26/09/2020	14:01	356645	8816060	4220	
92		CS-PRS-21	26/09/2020	14:28	356633	8815954	4225	
93		CS-PRS-21A(+)	26/09/2020	14:28	356633	8815954	4225	
94		CS-PRS-25A(+)	26/09/2020	14:01	356645	8816060	4220	
95		CS-PRS-25.2A(+)	26/09/2020	14:01	356645	8816060	4220	

N.°	Nombre del área	Código del punto de muestreo	Muestreo		Coordenadas UTM WGS 84 – Zona 18L		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
			Fecha	Hora	Este (m)	Norte (m)		
96		CA-04A(+)(*)	28/09/2020	14:30	356526	8815797	4200	
97		CA-04B(+)(*)	28/09/2020	14:35	356526	8815797	4200	
98		CA-04C(+)(*)	28/09/2020	14:40	356526	8815797	4200	
99		CA-04D(+)(*)	28/09/2020	14:45	356526	8815797	4200	
100	API MF	MF-01	21/09/2020	09:40	354529	8821577	4393	Ubicado en el distrito de Simón Bolívar a 3,50 km aproximadamente de la comunidad campesina San Antonio de Rancas, siguiendo la carretera afirmada hacia la laguna Alcacocha, lado izquierdo
101		MF-02	21/09/2020	10:05	354552	8821534	4393	
102		MF-03	21/09/2020	10:30	354580	8821486	4396	
103		MF-04	21/09/2020	10:55	354608	8821443	4397	
104		MF-05	21/09/2020	11:20	354633	8821401	4399	
105		MF-06	21/09/2020	11:50	354659	8821357	4405	
106		MF-06-A(+)	21/09/2020	11:50	354659	8821357	4405	
107		MF-07(**)	21/09/2020	12:15	354624	8821326	4406	
108		MF-08	21/09/2020	12:55	354589	8821370	4412	
109		MF-09	21/09/2020	13:20	354575	8821417	4416	
110		MF-10	21/09/2020	13:45	354548	8821456	4420	
111		MF-11	21/09/2020	14:10	354517	8821490	4423	
112		MF-12	21/09/2020	14:45	354478	8821523	4215	
113		MF-12-A(+)	21/09/2020	14:45	354478	8821523	4215	
Nivel de fondo								
114	Nivel de fondo A	MF-01A	22/09/2020	09:20	354827	8820133	4267	Ubicado en el distrito de Simón Bolívar a 2.00 Km aproximadamente de la comunidad campesina San Antonio de Rancas, siguiendo la carretera afirmada hacia la laguna Alcacocha, margen izquierdo
115		MF-02A	22/09/2020	09:38	354838	8820089	4268	
116		MF-03A	22/09/2020	09:55	354860	8820045	4268	
117		MF-04A	22/09/2020	10:10	354876	8820000	4208	
118		MF-05A	22/09/2020	10:40	354893	8819951	4209	
119		MF-06A	22/09/2020	10:55	354912	8819903	4210	
120		MF-06A-A(+)	22/09/2020	10:55	354912	8819903	4210	
121		MF-07A	22/09/2020	11:20	354929	8819862	4209	
122		MF-08A	22/09/2020	11:40	354939	8819811	4211	
123		MF-09A	22/09/2020	11:55	354960	8819777	4215	
124		MF-10A(**)	22/09/2020	12:15	354979	8819732	4217	
125		MF-11A	22/09/2020	12:35	354998	8819685	4220	
126		MF-12A	22/09/2020	13:05	355018	8819639	4226	
127		MF-12A-A(+)	22/09/2020	13:05	355018	8819639	4226	
128	Nivel de fondo C	MF-01C	23/09/2020	14:10	362123	8798698	4067	Ubicado en el distrito de Vicco a 3,10 km aproximadamente noroeste de la comunidad campesina de Vicco, siguiendo la carretera afirmada hacia el lago Chinchaycocha,
129		MF-02C	23/09/2020	14:35	362087	8798728	4077	
130		MF-03C	23/09/2020	14:56	362046	8798758	4080	
131		MF-04C	24/09/2020	09:20	362146	8798804	4052	
132		MF-05C	24/09/2020	09:36	362106	8798825	4052	
133		MF-06C	24/09/2020	09:56	362064	8798847	4048	
134		MF-07C	24/09/2020	10:20	362160	8798939	4049	
135		MF-08C	24/09/2020	10:36	362119	8798959	4051	

N.°	Nombre del área	Código del punto de muestreo	Muestreo		Coordenadas UTM WGS 84 – Zona 18L		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
			Fecha	Hora	Este (m)	Norte (m)		
136		MF-09C	24/09/2020	10:55	362074	8798985	4054	aproximadamente a 500 metros al suroeste del API_CS-DR
137		MF-10C	24/09/2020	11:20	362194	8799032	4057	
138		MF-11C	24/09/2020	11:40	362156	8799064	4058	
139		MF-12C(**)	24/09/2020	12:00	362119	8799094	4062	
140		MF-12C-A(+)	24/09/2020	12:00	362119	8799094	4062	
141		CA-02(*)	24/09/2020	14:15	362169	8798940	4153	
142	Nivel de fondo D	MF-01D	27/09/2020	10:55	356822	8815399	4213	Ubicado en el distrito de Simón Bolívar, 1,00 km aproximadamente sureste de la comunidad campesina de Yurajhuanca, siguiendo la carretera afirmada hacia el distrito de Tiyahuarco, margen derecho
143		MF-02D(**)	27/09/2020	13:17	356878	8815410	4211	
144		MF-03D	27/09/2020	13:46	356930	8815423	4211	
145		MF-04D	27/09/2020	14:15	356836	8815341	4212	
146		MF-05D(**)	27/09/2020	15:05	356883	8815344	4208	
147		MF-06D	28/09/2020	08:20	356926	8815347	4236	
148		MF-07D	28/09/2020	09:19	356849	8815286	4232	
149		MF-08D	28/09/2020	09:48	356897	8815288	4233	
150		MF-09D(**)	28/09/2020	10:25	356849	8815234	4235	
151		MF-10D	28/09/2020	10:53	356896	8815245	4213	
152		MF-11D	28/09/2020	11:22	356855	8815198	4215	
153		MF-12D	28/09/2020	11:55	356903	8815189	4219	
154		MF-12D-A(+)	28/09/2020	11:55	356903	8815189	4219	
155		CA-03	28/09/2020	12:50	356850	8815284	4209	
156		CA-03A(**)	28/09/2020	12:50	356850	8815284	4209	

Notas: La precisión de la medición de las coordenadas fue de ± 3 m
(*) Muestra del perfil de suelo en calicata o sondeo manual con barreno.
(**) Adicionalmente se tomó una muestra duplicada, la codificación es similar a la muestra principal con la adición de «.1»
(+) Muestra compuesta donde se desestimó la necesidad del parámetro caracterización de suelos.

Tabla 5.26. Ubicación áreas de levantamiento aerofotogramétrico con RPAS

Código	Fecha	Hora	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18 M		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
			Este (m)	Norte (m)		
SJ-01	15/09/2020	12:27	361934	8797995	4108	Margen izquierdo aproximadamente a 100 m del río San Juan correspondiente al API-PAM 50 en Cruz Pata, en el área donde se ubicaba el pasivo minero relave colonial Chaquiniyo.
SJ-05	20/09/2020	11:00	354728	8820946	4226	Margen izquierdo del río San Juan dentro del área donde se ubicó el pasivo ambiental minero relave colonial Tauro 6, corresponde al API-PAM 20
SJ-06	19/09/2020	12:35	355370	8819516	4224	Evaluación de la cobertura vegetal, punto de despegue ubicado aproximadamente a 500 m al margen izquierdo del río San Juan
SJ-07	19/09/2020	12:20	355157	8819322	4220	Margen izquierdo del río San Juan, al norte del área donde se ubicaba el pasivo minero relave colonial Baldeon.
SJ-02-0	20/09/2020	13:18	361835	8799017	4114	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 430 m en el margen izquierdo del río San Juan correspondiente al API-PAM 50 en Cruz Pata, en el área donde se ubicaba el

Código	Fecha	Hora	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18 M		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
			Este (m)	Norte (m)		
						pasivo minero relave colonial Chaquiniyo
SJ-02-1	20/09/2020	13:37	361835	8799017	4114	Margen izquierdo aproximadamente a 53 m del rio San Juan, área donde se ubicó remanentes del pasivo minero relave colonial puente San Juan
SJ-02-2	21/09/2020	13:03	361801	8799210	4130	
SJ-02-3	21/09/2020	12:48	361801	8799210	4130	
SJ-02-4	21/09/2020	12:00	361865	8799392	4130	
SJ-02-5	21/09/2020	11:39	361865	8799392	4130	

La precisión de las coordenadas en todos los puntos de muestreo fue de ±3 m.
En el acta de supervisión de fecha de 30 de setiembre del 2020 (en adelante, acta de supervisión), solo se indicó de forma general la realización del levantamiento fotogramétrico con cámara multiespectral y se marcó puntos de control geodésico del 14 al 25 de setiembre del 2020. Cabe indicar que, en este periodo se ejecutó esta actividad en el ámbito de los Pasivos Ambientales de Origen Minero en el rio San Juan y Delta Upamayo y Pasivo Ambiental Minero Depósito de Relaves Quiulacocha.

Tabla 5.27. Ubicación de los puntos de posicionamiento geodésico

Código	Fecha	Hora	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18 L		Altitud (m s. n. m.)	Altura medición** (m)	Descripción
			Este (m)	Norte (m)			
R-SJ-13	16/09/2020	14:23	362007	8798129	4124	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 300 m del margen izquierdo del río San Juan en el API-PAM 50 en Cruz Pata, en el área donde se ubicaba el pasivo minero Relave Colonial Chaquiniyo.
B-SJ-01	15/09/2020	13:56	362276	8793734	4118	1,64	Punto de estación base geodésico tomado aproximadamente a 650 m del margen izquierdo del río San Juan, ubicado en la garita de control del delta Upamayo. En el distrito de Vicco.
R-SJ-14	16/09/2020	13:59	361927	8798041	4123	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 200 m en el margen izquierdo del río San Juan correspondiente al API-PAM 50 en Cruz Pata, en el área donde se ubicaba el pasivo minero relave colonial Chaquiniyo.
R-SJ-16	16/09/2020	12:34	361949	8799103	4129	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 450 m en el margen izquierdo del río San Juan correspondiente al API-PAM 50 en Cruz Pata, en el área donde se ubicaba el pasivo minero relave colonial Chaquiniyo.
R-SJ-17	16/09/2020	13:00	361892	8799052	4127	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 430 m en el margen izquierdo del río San Juan correspondiente al API-PAM

Código	Fecha	Hora	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18 L		Altitud (m s. n. m.)	Altura medición** (m)	Descripción
			Este (m)	Norte (m)			
							50 en Cruz Pata, en el área donde se ubicaba el pasivo minero relave colonial Chaquiniyo
B-SJ-02	17/09/2020	15:44	355329	8819888	4248	1,56	Punto de estación base geodésico tomado aproximadamente a 710 m al margen izquierdo del rio San Juan.
R-SJ-24	17/09/2020	16:57	355282	8819515	4222	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 560 al margen izquierdo del río San Juan.
R-SJ-25	17/09/2020	16:29	355370	8819516	4224	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 560 m al margen izquierdo del río San Juan.
R-SJ-26	17/09/2020	17:15	355189	8819373	4221	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 260 m al margen izquierdo del río San Juan correspondiente al API-DR, al norte del área donde se ubicaba el pasivo minero relave colonial Baldeon
R-SJ-27	17/09/2020	17:31	355157	8819322	4220	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 141 m al margen izquierdo del río San Juan correspondiente al API-DR, al norte del área donde se ubicaba el pasivo minero relave colonial Baldeon
R-SJ-28	17/09/2020	17:48	355093	8819243	4218	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 141 m al margen izquierdo del río San Juan correspondiente al API-DR, al norte del área donde se ubicaba el pasivo minero relave colonial Baldeon
B-SJ-03	18/09/2020	10:09	355328	8819888	4250	1,55	Punto de estación base geodésico tomado aproximadamente a 710 m al margen izquierdo del rio San Juan.
R-SJ-22	18/09/2020	13:07	354782	8821010	4237	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 330 m en el margen izquierdo del río San Juan dentro del área donde se ubicó el pasivo ambiental minero relave colonial Tauro 6.
R-SJ-23	18/09/2020	13:25	354728	8820946	4226	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 263 m en el margen izquierdo del río San Juan dentro del área donde se ubicó el pasivo ambiental minero relave colonial Tauro 6.
B-SJ-04	20/09/2020	18:25	362276	8793733	4114	1,57	Punto de estación base geodésico tomado

Código	Fecha	Hora	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18 L		Altitud (m s. n. m.)	Altura medición** (m)	Descripción
			Este (m)	Norte (m)			
							aproximadamente a 650 m del margen izquierdo del río San Juan en la garita de control del delta Upamayo en el distrito de Vicco.
R-SJ-29	20/09/2020	16:32	361796	8799079	4128	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 300 m al margen izquierdo del río San Juan correspondiente al API-PAM 50 en Cruz Pata, en el área donde se ubicaba el pasivo minero relave colonial Chaquiniyo.
R-SJ-30	20/09/2020	16:46	361945	8799031	4129	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 470 m al margen izquierdo del río San Juan correspondiente al API-PAM 50 en Cruz Pata, en el área donde se ubicaba el pasivo minero relave colonial Chaquiniyo.
R-SJ-31	20/09/2020	16:58	361928	8799210	4129	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 320 m al margen izquierdo del río San Juan correspondiente al API-PAM 50 en Cruz Pata, en el área donde se ubicaba el pasivo minero relave colonial Chaquiniyo.
SJ-32	20/09/2020	17:11	361801	8799210	4130	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 192 m al margen izquierdo del río San Juan correspondiente al API-PAM 50 en Cruz Pata, en el área donde se ubicaba el pasivo minero relave colonial Chaquiniyo.
R-SJ-33	20/09/2020	17:26	361798	8799339	4129	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 155 m al margen izquierdo del río San Juan correspondiente al API-PAM 50 en Cruz Pata, en el área donde se ubicaba el pasivo minero relave colonial Chaquiniyo.
R-SJ-34	20/09/2020	17:40	361945	8799377	4129	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 302 m al margen izquierdo del río San Juan correspondiente al API-PAM 50 en Cruz Pata, en el área donde se ubicaba el pasivo minero relave colonial Chaquiniyo.
R-SJ-35	20/09/2020	17:53	361867	8799478	4129	2	Punto de control geodésico tomado aproximadamente a 35 m al margen izquierdo del río San Juan correspondiente al API-PAM 50 en Cruz Pata, en el área donde se ubicaba el pasivo minero relave colonial Chaquiniyo.

La precisión de la medición de las coordenadas fue de ± 1 m
** Altura desde la base hasta el centro del tope protector

En el acta de supervisión de fecha de 30 de setiembre del 2020 (en adelante, acta de supervisión), solo se indicó de forma general la realización del levantamiento fotogramétrico con cámara multiespectral y se marcó puntos de control geodésico del 14 al 25 de setiembre del 2020. Cabe indicar que, en este periodo se ejecutó esta actividad en el ámbito de los pasivos ambientales de origen minero en el rio San Juan y delta Upamayo y pasivo ambiental minero depósito de relaves Quiulacocha

5.4.3 Parámetros y métodos de análisis

Los parámetros para el muestreo de identificación fueron planteados de acuerdo a la influencia de los pasivos ambientales de origen minero evaluados. El nivel de fondo del suelo contempló el análisis de metales y metaloides. Los parámetros y sus métodos de análisis para la evaluación de suelos son detallados en la Tabla 5.28.

Tabla 5.28. Parámetros y métodos de análisis considerados para la evaluación de suelo

Parámetro	Método de análisis	Laboratorio de ensayo acreditado	Observaciones
Metales totales + Hg(1)	EPA Method 3050B Rev.2 (1996) / EPA Method 6020B Rev.2 (2014) VAL	AGQ PERU S.A.C.	Se realizó en todas las muestras (151)
Cianuro Libre	EPA Method 9013A Rev.2-2014/SMEWW 4500 CN F. 23rd Ed. 2017		Se realizó en 23 muestras
Cromo Hexavalente	PP-205 Rev.6 2018		
Metales totales + Hg(2)	EPA Method 200.8 Rev. 5.4 (1994)		Se realizó 1 blanco viajero y 2 blancos de equipos
Balance acido-base modificado (ABA)	Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials - MEND Report 1.20.1, Chapter 13, Item 13.3.3, December 2009	ALS LS PERU S.A.C.	Se realizó en 7 muestras
Análisis granulométrico	ASTM D422-63 (Reapproved 2007)		Se realizó en 5 muestras
Extracción secuencial de Metales pesados por la metodología de Tessier	Metal por ICP-MS		Se realizó en 14 muestras
Análisis mineralógico por difracción de rayos X	Difracción de rayos x: Identificación: Base de datos del Centro Internacional de Datos para Difracción (ICDD) Cuantificación: Método Refinamiento Rietveld (TOPAS Structure Database y Fiz Karlsruhe ICSD)	BIZALAB S.A.C.	Se realizó en 5 muestras
Análisis mineralógico por microscopia de barrido electrónico (MEB)	Microscopia electrónica de barrido		Se realizó en 2 muestras

Fuente: Reportes de resultados N.° RRE-035-2020-STEC y N.° RRE-043-2020-STEC (Anexo 2)
(1) Muestra analizada en matriz suelo
(2) Muestra analizada en agua ultrapura

5.4.4 Equipos utilizados

Los equipos utilizados para el muestreo de identificación y nivel de fondo, se detallan en el Anexo 1.3, reporte de campo N.° RC-048-2020-STEC (ítem 4.1.1). Asimismo, los equipos utilizados para el levantamiento con RPAS con la finalidad de obtener un ortomosaico RGB se detallan en el Anexo 1.5, reporte de campo N.° RC-063-2020-STEC (ítems 5.1.2 y 5.2.2).

5.4.5 Tipo de muestreo

El muestreo de identificación en áreas de potencial interés se realizó de manera sistemática en cuadricula regular con grillas que variaron de acuerdo a la dimensión del área de muestreo; cabe precisar que, en las API se tomaron muestras simples y compuestas[40].

La colecta de las muestras de suelo se realizó teniendo en cuenta los lineamientos establecidos en la «Guía para el Muestreo de Suelos», aprobada por el Ministerio del Ambiente mediante Resolución Ministerial N.° 085-2014-MINAM, mientras que los procedimientos para la conservación y preservación de muestras cumplieron lo establecido por el laboratorio acreditado ante el Inacal.

En un sitio potencialmente contaminado puede existir una distribución espacial en profundidad de las sustancias contaminantes, por ello se realizó el muestreo en profundidad según el tipo de suelo, como lo establece la guía mencionada. Para la evaluación se determinó una profundidad de muestreo de 0 cm a 30 cm, teniendo en cuenta que de 0 cm a 10 cm se encuentra la capa de contacto oral o dermal de los contaminantes y de 10 cm a 30 cm, la profundidad máxima alcanzable por los niños. Por último, todas las muestras fueron almacenadas en *coolers* y conservadas con *ice-packs* (*i.e.* hielo gel), durante el muestreo y traslado al laboratorio respectivo.

Para el muestreo de nivel de fondo, se estableció una parcela de muestreo a partir de la ubicación del punto de referencia de la red de submuestras, utilizando un modelo de distribución en rejilla de 20 m x 20 m. Algunos de los puntos de la red de muestreo propuestos fueron reubicados, debido a la presencia de afloramientos rocosos o por presentar condiciones de inaccesibilidad que dificultó la colecta de la muestra.

Se colectaron muestras compuestas conformado cada una por 5 submuestras (sustento desde el punto de vista estadístico), distribuidas en un área (sustento desde el punto de vista localización) para la determinación del nivel de fondo. Para ambos tipos de muestreo, se utilizó una bandeja para el pretamizado, la mezcla y la homogenización mediante la técnica del cuarteo para la obtención de muestras representativas.

5.4.6 Aseguramiento de la calidad

Se ha considerado un 10 % del número de muestras como duplicado, de acuerdo con el apartado 1.3.1., de la guía de muestreo de suelos[41]. Se colectaron 14 muestras duplicadas, además se colectó otras muestras para aseguramiento de calidad como un blanco de viaje y 2 blancos de equipo; sus resultados se detallan en el Anexo 2.2 (reporte de resultados

---

40 En la «Guía para el Muestreo de Suelos», aprobada por el Ministerio del Ambiese nte mediante Resolución Ministerial N.° 085-2014-MINAM, se define:
Muestra simple: Las muestras colectadas en un tiempo y en un lugar particular son llamadas muestras simples. Este tipo de muestras representa las condiciones puntuales de una muestra de la población en el tiempo que fue colectado. Estas muestras siempre se aplicarán para compuestos orgánicos volátiles (COV's), Hidrocarburos y Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xilenos (BTEX).
Muestra compuesta: Es aquella constituida por un conjunto de muestras simples (sub muestras), convenientemente mezcladas, y llevadas al laboratorio para su correspondiente análisis, siendo el resultado un valor analítico medio de la propiedad o compuesto analizado. El número de sub muestras dependerá de la variabilidad de la sustancia o propiedad a analizar en el área de estudio y tiene la ventaja de permitir un muestreo mayor sin aumentar el número de muestras a analizar.

41 Para el control de calidad analítica se debe duplicar el 10 % de las muestras a ser analizados para sitios con superficies menores o igual a 20 ha, y 5 % para superficies mayores a 20 ha, que deben ser analizados en otro laboratorio acreditado

N.° RRE-043-2020-STEC). Asimismo, los contorles de calidad de los frascos usados en los muestreos se presentan en el Anexo 6.

5.4.7 Procesamiento de datos

5.4.7.1 Análisis multitemporal utilizando sensor LANDSAT

Para la elaboración del mapa de cambios por degradación de vegetación, se empleó imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 8 de 1988, 1990, 1994, 1997, 1999, 2005, 2007, 2011, 2013, 2015 y 2019 correspondientes a la estacionalidad seca (julio a octubre). Para su obtención y demás procesos se usó de la plataforma Google Earth Engine y el software Arcgis y Qgis.

a. Ubicación del área de estudio

Se generó el polígono del área en formato *shapefile* de la subcuenca San Juan.

b. Recopilación de información y obtención de imágenes satelitales

Se generó la información utilizando la plataforma Google Earth Engine, la cual combina un catálogo multi-petabyte de imágenes de satélite y datos geoespaciales con capacidades de análisis a escala planetaria y se encuentra de libre acceso para diferentes estudios como es el caso de detectar cambios en la tendencia y cuantificar las diferencias en la superficie de la de la tierra (Figura 5.7).

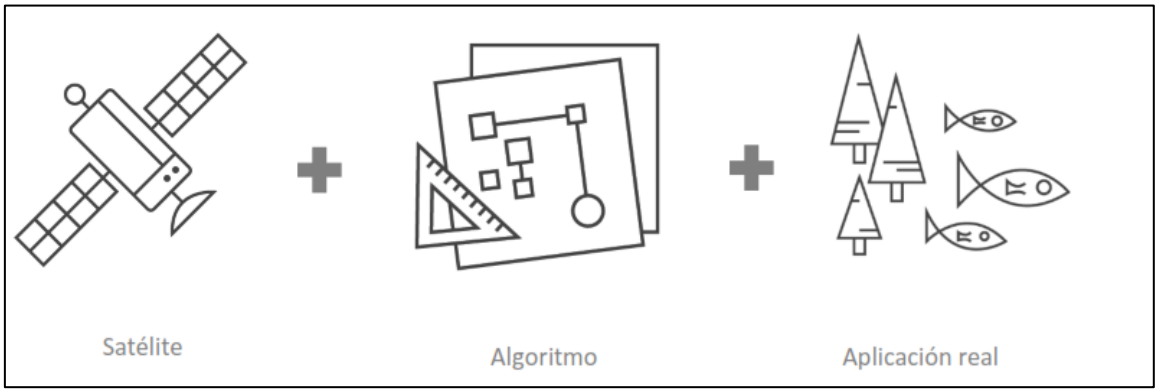


Figura 5.7. Secuencia de pasos para obtención de imágenes satelitales

c. Conformación de mosaicos

Los mosaicos de 1988, 1990, 1994, 1997, 1999, 2005, 2007, 2011, 2013, 2015 y 2019 fueron generados en la plataforma de Google Earth Engine (GEE). GEE permitió conformar el mosaico libre de nubes a través de un algoritmo especializado (ee. Algorithms. Landsat.simpleComposite) el cual a su vez es filtrado en un rango de fecha establecido. En la conformación del mosaico y dentro de la lógica del algoritmo, este calcula un compuesto Landsat al tope de la atmósfera (TOA) de una colección de escenas del sensor Landsat. Se aplica la calibración TOA estándar y luego asigna una puntuación a cada pixel con nube utilizando el algoritmo SimpleLandsatCloudScore. Se selecciona el rango más bajo de las valoraciones disponibles para cada punto y luego calcula los valores de percentiles por la banda de los píxeles aceptados. Este también utiliza el algoritmo LandsatPathRowLimit para seleccionar solo las escenas con menos nubes dentro de las regiones (GEE, 2016).

d. Alerta de cambios con NDVI

Mediante la comparación de los Índices de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés) de imágenes de 2 temporalidades es posible tener una idea bastante acertada de donde se encuentran los cambios de cobertura. Para imágenes Landsat 5 el índice se obtiene de la Banda 4 y 3, para la Landsat 8 se obtiene en las bandas 5 y 4 que corresponden al infrarrojo cercano y rojo respectivamente y se utiliza la siguiente ecuación.

$$NDVI = \frac{(\mathrm{NIR}-\mathrm{Red})}{(\mathrm{NIR}+\mathrm{Red})} \qquad \text{Ecuación 16}$$

Con los NDVI de cada imagen de diferente año se realiza una resta y se clasifican los cambios de acuerdo a que tan significativos son; esto nos indica donde es probable que haya un cambio el cual es verificado y editado de forma manual. Cabe aclarar que, estos cambios no son tan precisos, pero si nos orientan para identificar cambios reales mediante edición manual o en otras palabras nos alertan para verificar los cambios en una zona sobre la imagen.

e. Generación de mapa de cambios cada 3 años

Además de conocer los resultados de cobertura calculados mediante los índices de vegetación entre cada año, se generó mapas de cambios comparando cada 3 años, con el objetivo de conocer los cambios más significativos.

La finalidad de obtener estos mapas multitemporales es definir el comportamiento del suelo al pasar de los años, sufriendo cambios o permaneciendo en su estado natural, se elaboró el mapa para definir posibles áreas de potencial interés (API) en los sectores donde se apreció mayor predominancia de cambios de cobertura vegetal, se realizó la verificación en campo con la finalidad de corroborar los API *in situ*. En la Figura 5.8 se presenta los mapas multitemporales de acuerdo a las imágenes satelitales obtenidas desde 1988 hasta 2019, para su interpretación.

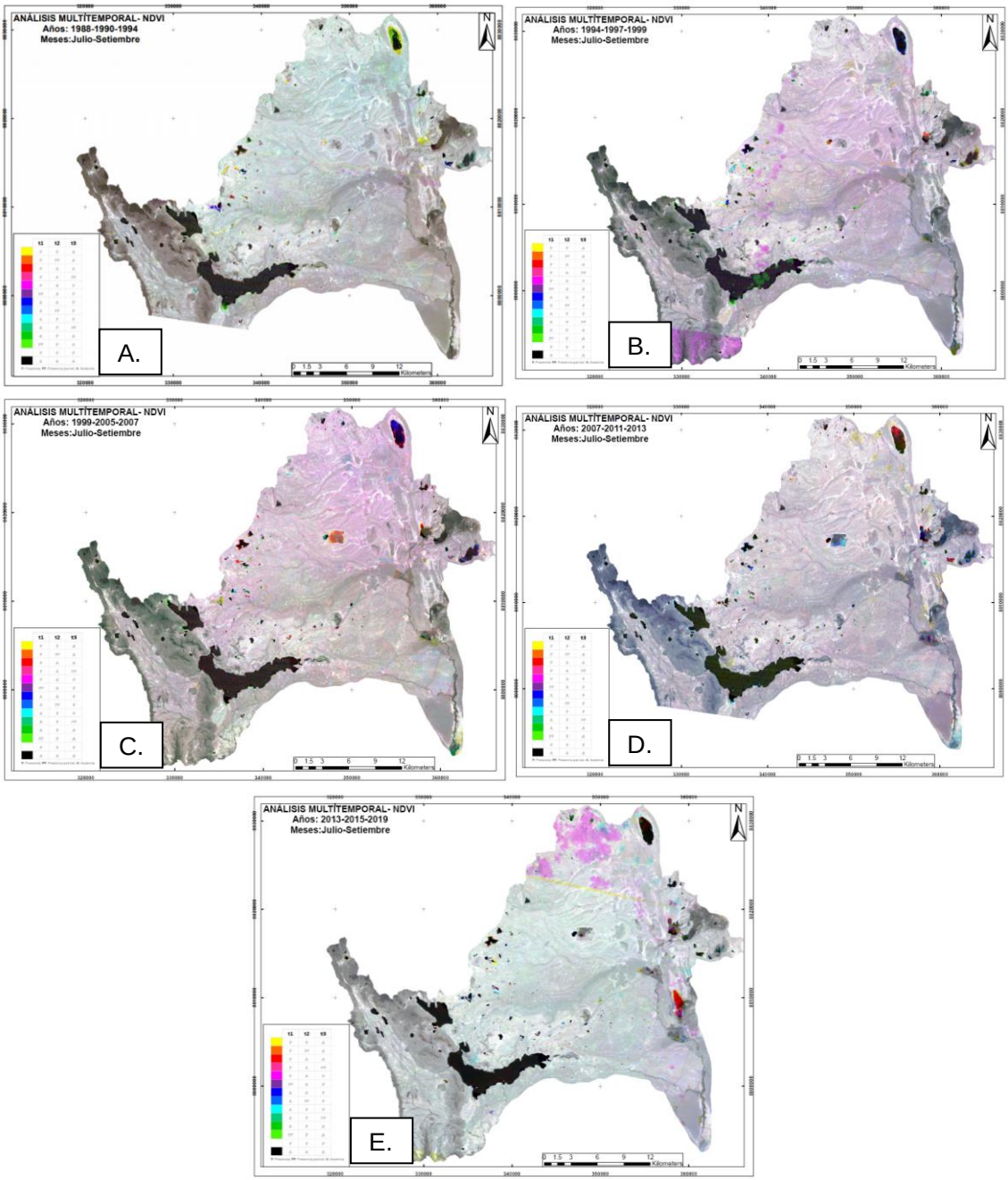


Figura 5.8. Imagen multitemporal de A) 1988-1990-1994, B) 1994-1997-1999, C) 1999-2005-2007, D) 2007-2011-2013 y E) 2013-2015-2019

5.4.7.2 Análisis para la determinación del nivel de fondo

La obtención de las concentraciones de los niveles de fondo se hizo a través del tratamiento estadístico de los resultados de laboratorio obtenidos de las muestras de suelo colectadas en campo. Tales valores se determinaron considerando la cota o límite superior con un 95 % de confianza de la media de las muestras mediante el software ProUCL 5.0 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA). Esta metodología permitió la identificación y eliminación de valores anómalos que puedan influir negativamente en la robustez de los niveles de fondo determinados. Los datos fueron

sometidos a las pruebas de bondad y ajuste o *goodness of fit test* (GOF, por sus iniciales en inglés) con la finalidad de evaluar e identificar el tipo de distribución de cada variable; al observar el gráfico Q-Q y considerando los cuantiles hipotéticos mostrados a lo largo del eje x, ajustados para los cuantiles asociados con valores no detectados, permitió una mejor visualización del tipo de distribución que presentó.

Una vez realizada y evaluada las pruebas de bondad de ajuste para cada variable, se calculó el nivel de fondo (*upper confidence limit*, UCL) y de referencia (*upper tolerance limit*, UTL).

El límite superior de confianza (*upper confidence limit*-UCL 95 %) es la cota superior del intervalo de confianza para la media poblacional, el cual comúnmente se considera a un 95 % de confianza. Este valor frecuentemente se usa como un umbral fijo para comparar con los datos muestreados de un sitio y determinar que este se encuentre limpio.

El límite superior de tolerancia (*upper tolerance limit*-UTL 95-95 %) es la cota superior del intervalo de confianza para el percentil 95, el cual comúnmente se considera a un 95 % de confianza. Un UTL está diseñado para contener, un porcentaje de la población (95 %) de las posibles concentraciones de fondo; se utiliza para comparar con los datos muestreados de un sitio y establecer que este se encuentre contaminado.

5.4.7.3 Fotogrametría multiespectral y posicionamiento geodésico

Para el presente estudio, se utilizaron imágenes satelitales Sentinel 2 de setiembre de 2015 y los índices de vegetación derivados de la imagen multiespectral resultante del sobre vuelo con el sensor Parrot Sequoia.

Los datos espaciales se obtuvieron mediante la captura de información digital multiespectral con precisión milimétrica. El tratamiento de los datos se realizó mediante el Sistema de Información Arcgis 10.7, el software SAGA (*System for Automated Geoscientific*), el software ENVI 5.3, el software pix4Di mapper y la plataforma web Google Earth Engine.

Esta metodología se dividió en secciones, las cuales describen el área de estudio, las fuentes y formas de recopilación de la información necesaria para el análisis, la estandarización y remuestreo de datos raster y la correlación de datos raster. En la Figura 5.9 se muestra la secuencia de pasos para el análisis de la información.



Figura 5.9. Secuencia de pasos para el análisis de la información

5.4.7.4 Captura de imágenes e información digital

Para el estudio se preprocesaron las imágenes del sensor Parrot Sequoia de alta resolución espacial capturadas mediante el dron, imagen satelital de mediana resolución espacial Sentinel 2A.

- La imagen de alta resolución espacial (0,13 metros) corresponde a un Ortomosaico multiespectral de 4 bandas (GREEN, RED, RED_EDGE y NIR) capturados en campo, del 15 al 21 de setiembre de 2020, con el que se generaron índices de vegetación NDRE y NDVI.
- La imagen multiespectral de resolución espacial de 10 metros corresponde al Sentinel 2A de setiembre de 2020 (fecha del mismo mes a la ejecución del vuelo). Esta imagen y los índices de vegetación NDRE y NDVI se han extraído de la plataforma de Google Earth Engine.

5.4.7.5 Imagen multiespectral del Sensor Parrot Sequoia a precisión geodésica

El área aproximada por API fue API-PAM 20 (0,50 ha), API-PAM 50 (8,18 ha), API-DR (10,93 ha) y API-04 (22,23 ha) a una altura de vuelo sobre el terreno de 80 m (condiciones del equipo por la altitud y peso de la cámara multiespectral acoplada), el cual cubrió toda el área del sitio y zonas aledañas. El horario fue diurno entre las 10:00 horas a 13:00 horas considerando la actividad fotosintética de la planta, incidencia solar, velocidad de vientos, nubosidad, altitud, etc.

Se posicionaron puntos de control geodésico previos a la ejecución del vuelo, teniendo en consideración la norma técnica para el procesamiento global estático con receptores GNSS[42] y el levantamiento geodésico vertical[43].

5.4.7.6 Ejecución del vuelo fotogramétrico

a. Planificación de vuelo

El plan de vuelo se realizó tomando en cuenta la superficie a volar, teniendo en consideración el magnetismo terrestre, previsión meteorológica, revisión de índice Kp, comprobación del espacio aéreo, velocidad del viento, relieve del terreno, altura de la vegetación promedio y obstáculos presentes en la zona.

b. Medición de puntos DGPS por método estático

Se realizó la medición de puntos a partir de la utilización del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), aplicando el método estático con un equipo diferencial.

La medición de los puntos se realizó con el método estático, el cual se utilizó para obtener coordenadas de un punto de manera precisa y confiable (Pachas, 2009). El procedimiento consistió en ubicar cuatro estaciones de recepción simultáneamente, Base y Rover. Se permaneció en el punto por aproximadamente una hora para el proceso de grabación de los datos en campo trasmitido desde los satélites (el tiempo de medición dependió de la distancia entre receptores, la configuración geométrica de los satélites y las condiciones de obstrucción que se presenten en la zona), este proceso se repitió para los demás puntos de medición.

[42] Resolución Jefatural N.° 139-2015/IGN/UCCN, que aprueba la «Norma Técnica para Posicionamiento Geodésico Estático Relativo con receptores del Sistema Satelital de Navegación global»

[43] Resolución Jefatural N.° 057-2016/IGN/UCCN, que aprueba la «Norma Técnica para Levantamientos Geodésicos Verticales», 10 de julio de 2016.

La captura de datos se hizo cada cinco segundos, el ángulo de medición fue de 15º sobre el horizonte y el tiempo de medición fue de aproximadamente una hora en cada estación.

Se determinó el punto donde se colocó el equipo base o estación de referencia, y posteriormente, se precisó el sitio más idóneo para colocar el nuevo punto a medir, es decir, la estación donde se colocó el equipo Rover. Para este trabajo se tomó 4 puntos de estación base y 18 puntos de control, tal como se describe en la Tabla 5.29.

Los puntos a los cuales se les determinó sus coordenadas, quedaron materializados según se describe en la Tabla 5.30, teniendo en cuenta que para la selección del sitio se consideró un área despejada, geoespacialmente identificable y que no existieran instalaciones de gran altura en las adyacencias.

Se posicionó y niveló el trípode y se colocó el equipo DGPS sobre su base nivelante, haciendo coincidencia del punto a través de la plomada óptica. Este paso se realizó para preparar el equipo antes de iniciar la medición tanto en la estación base como en las estaciones Rover; este procedimiento se realizó una vez en la estación base y en los tres puntos a determinar sus coordenadas (estaciones Rover).

Después del encendido de los equipos, que por lo general tardan unos minutos en rastrear los satélites, una vez que capten los satélites se verificaron los parámetros de medición, se midió la altura de la antena (estos datos fueron anotados en una libreta de campo) y se programaron para que comiencen a grabar, es indispensable que haya simultaneidad en las mediciones, es decir, que ambos equipos estén midiendo al mismo tiempo.

El apagado de los equipos una vez culminado el tiempo de medición; se realizó al finalizar el día, puesto que para la medición de los otros puntos no se necesita apagar el equipo y continuar con la medición vinculando a la estación base.

Posteriormente se descarga la información del DGPS Base, en los formatos por defecto (job y T02) para su posterior posprocesamiento.

Como resultados se obtuvieron coordenadas de 18 puntos tomados, medidos en el Datum WGS84, a través de la aplicación del software de posproceso Trimble Business Center (TBC); estos puntos GPS servirán de apoyo para la ejecución del Ortomosaico en RGB y multiespectral.

Posteriormente se colocaron las dianas y estacas para la identificación en el vuelo.

c. Lista de chequeo

La lista de chequeo es una herramienta fundamental para el control de los procesos de campo, prevuelo y posvuelo; donde:

- Se verificó que las baterías estuvieran con la carga adecuada.
- Se verificó que los *powerbank* estuvieran con la carga adecuada.
- Se verificó que las baterías del control remoto del dron estuvieran con la carga adecuada.
- Se aseguró que el dispositivo para el seguimiento de vuelo estuviera cargado y con todos los aplicativos necesarios instalados.
- Se verificó que el dron tuviera la tarjeta SD vacía.

- Se verificó que se cuente con un juego de hélices de repuesto.
- Se realizó la inspección de prevuelo para determinar que el dron se encontrase en condiciones seguras para operar.

d. Reconocimiento de sitios de interés y establecimiento de áreas de despegue y aterrizaje.

Se realizó el vuelo previo, atendiendo primordialmente a las alturas de los árboles con respecto al punto de despegue, con la finalidad de programar la altura de la maniobra *Return to Home* (RTH) con mejor criterio.

Se realizó algunos ajustes del plan de vuelo previsto, principalmente en los tiempos y altura de vuelo establecidos en gabinete, debido a los obstáculos presentes y considerando la altitud de la zona en respuesta al funcionamiento del dron.

e. Vuelo del sistema de aeronave piloteada remotamente

Para iniciar con la ejecución del vuelo se procedió con el armado del dron teniendo en consideración todos los pasos previos de seguridad, verificando la configuración de todo el sistema mediante el DJI GO 4, realizando las correcciones y pruebas necesarias.

Posteriormente se instaló la cámara multiespectral Parrot Sequoia, la cual se programó para capturar imágenes en intervalos de un segundo y medio, esta se instaló usando un adaptador correspondiente al modelo del dron. Finalmente, se instaló todos los demás accesorios propios del dron, realizando la configuración y encendido de la cámara.

El tamaño del área estimado para el sobrevuelo fue de 4 ha en un tiempo aproximado entre 6 a 7 minutos entre el ascenso y descenso del dron, teniendo en cuenta una altura de 80 m sobre el terreno.

Se tomó información en campo de la hora de vuelo, cobertura de nubes y velocidad del viento.

f. Validación de información obtenida de misiones de vuelo

Una vez finalizado la misión de vuelo, se procedió a la verificación de la información fotográfica de las cámaras en los equipos, donde se verificaron la calidad de las imágenes RGB y multiespectral para posteriormente descargarlas y procesarlas.

g. Lista de chequeo posvuelo

Finalizada la misión de vuelo programada de todas las áreas de interés, se procedió a verificar todo el equipamiento del dron utilizado, observando que estuviera completo y en buenas condiciones, para su posterior guardado y traslado.

5.4.7.7 Procesamiento de puntos de control geodésico

Luego de descargar la información de los georreceptores, los archivos son convertidos a formato Rinex (acrónimo de *receiver independent exchange*), el posproceso se realizó con el software Trimble Business Center (TBC), que es un sistema de posproceso diferencial

GPS (DGPS) que permite la solución de puntos individuales GPS o de redes geodésicas complejas, observados por receptores de datos Rinex que provienen de otros equipos.

Como lo muestra la Tabla 5.29, que es el reporte resultante del procesamiento de las mediciones GPS utilizando el software TBC, se describen los parámetros establecidos para el posproceso, esto es: las precisiones horizontal y vertical, el sistema de coordenadas, archivos de salida, sistema de alturas, unidades de medidas y la fecha.

Adicionalmente, la Tabla 5.29, muestra las coordenadas definitivas de los puntos medidos con sus respectivos errores. Destacar que, la coordenada más débil cuando se trata de medición GPS es la coordenada referida a la altura y, en ese sentido, esto se evidencia en el reporte, en el que las desviaciones estándar en las coordenadas de posición norte y este estuvieron en el orden de ±5 mm a ±8 mm; mientras que, en la coordenada altura se obtuvo una desviación estándar entre ±6 mm a ±1,9 cm, confirmando así una excelente calidad en general de las mediciones y coordenadas obtenidas.

Tabla 5.29. Preprocesamiento de imágenes del sensor Parrot Sequoia

Datos del archivo del proyecto		**Sistema de coordenadas**	
Nombre:	C:\Users\Desktop\PHD\PROCESAMIENTOS TBC\OEFA Py 02 Pasco - \Archivos de Proyecto\ Procesamiento 02 Zona SJ.vce	Nombre:	UTM
		Datum:	WGS 1984
Tamaño:	553 KB	Zona:	18 South (75W)
Modificado/a:		Geoide:	EGM08-PERU
Zona horaria:		Datum vertical:	
Número de referencia:			
Descripción:			

Informe de procesamiento de líneas base

Procesando resumen

Observación	De	A	Tipo de solución	Prec. H. (Metro)	Prec. V. (Metro)	Aci. geod.	Dist. elip (Metro)	ΔAltura (Metro)
PA01 --- BSJ-01-04 (B1)	PA01	BSJ-01-04	Fija	0.003	0.011	181°52'42"	27015.382	-276.079
PA01 --- BSJ-02-03 (B2)	PA01	BSJ-02-03	Fija	0.004	0.017	263°59'12"	7769.699	-145.157
PA01 --- SJ-16 (B60)	PA01	SJ-16	Fija	0.011	0.026	183°08'41"	21662.299	-263.788
PA01 --- SJ-17 (B62)	PA01	SJ-17	Fija	0.011	0.022	183°17'17"	21716.249	-264.460
PA01 --- SJ-15 (B64)	PA01	SJ-15	Fija	0.011	0.019	183°14'50"	22824.242	-268.728

PA01 --- SJ-14 (B66)	PA01	SJ-14	Fija	0.011	0.017	183°03'59"	22723.383	-268.397
PA01 --- SJ-13 (B68)	PA01	SJ-13	Fija	0.011	0.020	182°52'42"	22631.323	-268.287
PA01 --- SJ-25 (B70)	PA01	SJ-25	Fija	0.014	0.019	261°13'52"	7778.638	-166.956
PA01 --- SJ-24_1 (B72)	PA01	SJ-24_1	Fija	0.012	0.020	261°19'43"	7865.448	-168.406
PA01 --- SJ-26 (B74)	PA01	SJ-26	Fija	0.011	0.017	260°25'27"	7979.572	-169.196
PA01 --- SJ-27 (B76)	PA01	SJ-27	Fija	0.010	0.020	260°05'56"	8020.935	-170.170
PA01 --- SJ-28 (B78)	PA01	SJ-28	Fija	0.010	0.023	259°37'37"	8097.816	-170.724
BSJ-01-04 --- SJ-14 (B65)	BSJ-01-04	SJ-14	Fija	0.008	0.013	355°37'24"	4322.631	7.656
SJ-29 (B81)	BSJ-01-04	SJ-29	Fija	0.010	0.014	355°06'41"	5368.537	11.447
SJ-31 (B83)	BSJ-01-04	SJ-31	Fija	0.009	0.014	356°36'28"	5488.206	11.634
SJ-34 (B85)	BSJ-01-04	SJ-34	Fija	0.009	0.017	356°51'51"	5624.136	12.265
BSJ-02-03 --- SJ-27 (B75)	BSJ-02-03	SJ-27	Fija	0.003	0.007	197°10'17"	591.571	-24.999
BSJ-01-04 --- SJ-30 (B82)	BSJ-01-04	SJ-30	Fija	0.009	0.013	356°42'22"	5358.311	11.164
BSJ-01-04 --- SJ-33 (B84)	BSJ-01-04	SJ-33	Fija	0.009	0.016	355°21'58"	5626.440	12.584
BSJ-01-04 --- SJ-35 (B86)	BSJ-01-04	SJ-35	Fija	0.008	0.017	356°09'46"	5759.448	13.251
BSJ-01-04 --- SJ-16 (B59)	BSJ-01-04	SJ-16	Fija	0.009	0.020	356°46'29"	5379.710	12.286
BSJ-01-04 --- SJ-17 (B61)	BSJ-01-04	SJ-17	Fija	0.009	0.017	356°07'52"	5332.519	11.570
BSJ-01-04 --- SJ-15 (B63)	BSJ-01-04	SJ-15	Fija	0.008	0.013	354°28'47"	4232.900	7.326
BSJ-01-04 --- SJ-13 (B67)	BSJ-01-04	SJ-13	Fija	0.008	0.015	356°44'11"	4405.239	7.713
BSJ-02-03 --- SJ-22 (B79)	BSJ-02-03	SJ-22	Fija	0.004	0.008	334°18'34"	1247.790	-10.839
BSJ-02-03 --- SJ-23 (B80)	BSJ-02-03	SJ-23	Fija	0.004	0.007	330°43'18"	1216.648	-21.178
BSJ-02-03 --- SJ-25 (B69)	BSJ-02-03	SJ-25	Fija	0.003	0.004	173°59'28"	373.942	-21.751
BSJ-02-03 --- SJ-24_1 (B71)	BSJ-02-03	SJ-24_1	Fija	0.003	0.005	187°27'24"	375.044	-23.236
BSJ-02-03 --- SJ-26 (B73)	BSJ-02-03	SJ-26	Fija	0.003	0.005	195°24'53"	532.578	-24.015
BSJ-02-03 --- SJ-28 (B77)	BSJ-02-03	SJ-28	Fija	0.003	0.008	200°19'58"	686.858	-25.550

El proceso comenzó con la depuración de las fotografías espectrales obtenidas en campo, que consistió en hacer una selección estratégica, con el fin de eliminar las que están fuera

del área de estudio o que no cumplan con las características mínimas para el posprocesamiento, con el objetivo de reducir el tiempo de procesamiento.

Tener en cuenta que, el sensor Sequoia es un accesorio independiente al funcionamiento del dron, por lo que este empieza a capturar imágenes mucho antes de iniciar el plan de vuelo del dron, sin embargo, las imágenes capturadas antes del plan no corresponden al área de estudio y además perjudican el procesamiento.

Por lo tanto, se depuraron fotos fuera del área de interés de vuelo que captó el sensor Sequoia, debido a que este sensor tuvo una programación de vuelo por intervalo de tiempo de una toma cada segundo y medio; como dicho sensor es independiente fue acoplado al dron, empezando a capturar información antes de iniciar el plan de vuelo establecido, dando como resultado una serie de imágenes que no aportan al procesamiento.

Terminada la depuración, se procedió a importar las imágenes seleccionadas al software Pix4D, para lo cual se utilizó la plantilla «Ag Multiespectral».

El «Ag Multiespectral» ejecuta los siguientes pasos:

- Como paso inicial el algoritmo de la plantilla define puntos clave, los cuales fueron utilizados para realizar comparación y emparejamiento entre las imágenes del proyecto.
- El emparejamiento de imágenes se realizó mediante la comparación de los puntos clave. En este proceso se reconstruye la geometría mediante la solución de Pix4D Mapper para la metodología de *structure from motion* (Referencia).
- Después de reconstruir la geometría, se realizó la calibración de las imágenes multiespectrales mediante la importación de imágenes de calibración de irradiación solar tomadas en campo antes de la ejecución del plan de vuelo.
- Una vez calibradas las imágenes se realizó la georreferenciación mediante la identificación de los puntos de control en las imágenes.
- Por segunda vez se realiza el emparejamiento, pero utilizando las imágenes calibradas georreferenciadas.
- Terminado el emparejamiento se construyó la nube de puntos densa y posteriormente el Modelo de Elevación a Superficie (DSM) con el cual se ortorectificaran las imágenes para finalmente construir el ortomosaico multiespectral, producto sobre el cual se puede realizar el cálculo de índices radiométricos.

Como resultado se obtuvieron ortomosaicos separados de las bandas espectrales green, red, red_edge, nir de resolución espacial de 0,12 metros. En la Figura 5.10 se presentan los ortomosaicos del API PAM 20.

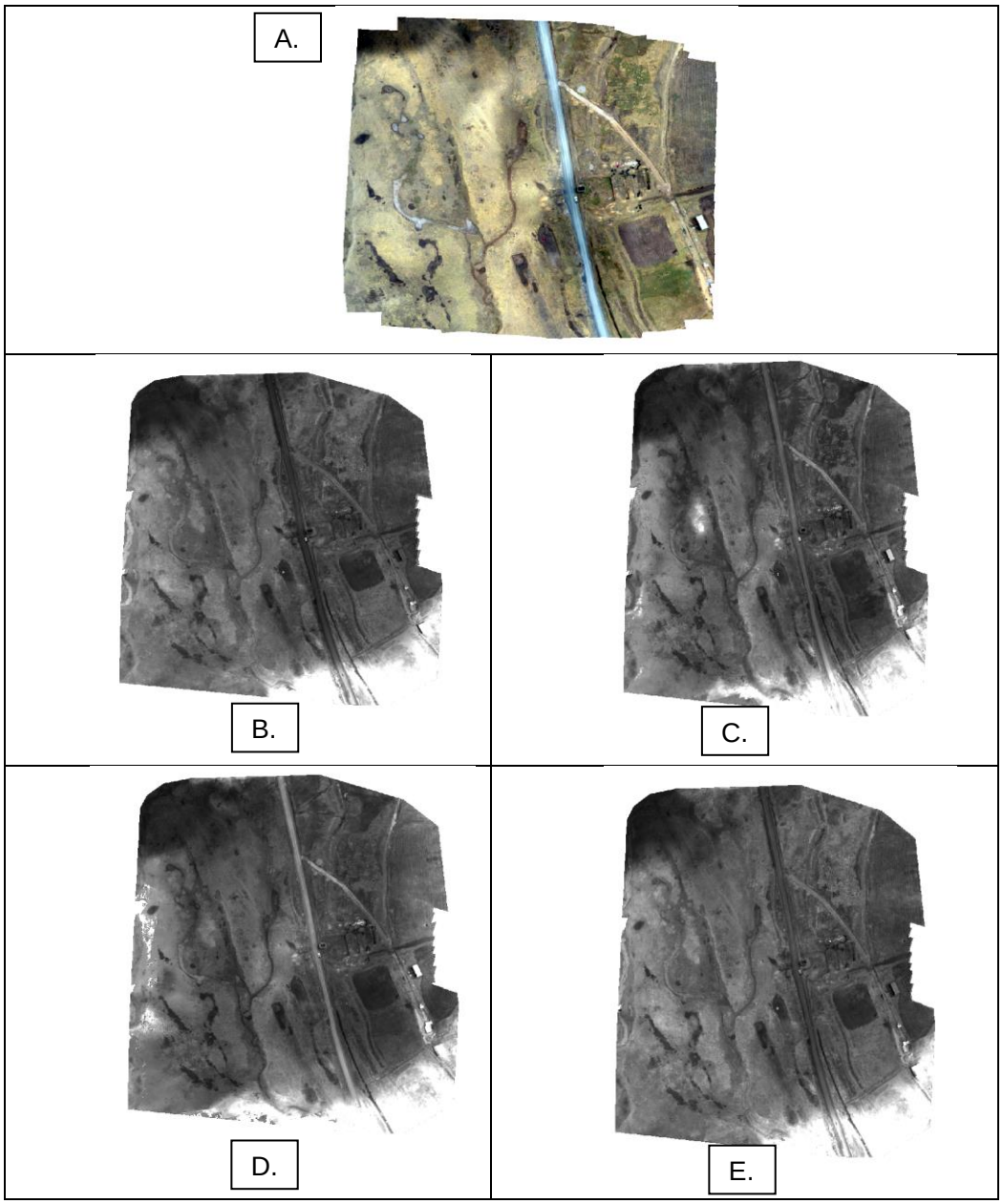


Figura 5.10. Ortofoto A) RGB, B) NIR C) Red, D) Green y E) Red Edge del API PAM 20

5.4.7.8 Generación de índices de vegetación

Se ha optado por seleccionar 2 índices de vegetación para el análisis teniendo en consideración las bandas espectrales en las que trabajan los sensores Parrot Sequoia y Sentinel 2A. Los índices de vegetación seleccionados para el presente estudio han sido el NDVI y NDRE (Figura 5.11); para ello, se ha basado en estudios y trabajos analizados en revisiones bibliográficas.

Los índices de vegetación son valores digitales, que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente, el índice de vegetación es producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un número que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel. Los valores de índices de

vegetación más cercanos a uno identifican píxeles cubiertos por proporciones substanciales de vegetación saludable, mientras que valores próximos a cero corresponden a zonas de pasto seco o suelo.

NDRE (Índice Normalizado Diferencial de Borde Rojo): Este índice por otra parte, difiere con respecto al NDVI ya que se utilizan bandas a lo largo del borde rojo en lugar de los principales picos de absorción y reflectancia utilizados para el cálculo del NDVI, permitiendo así discriminar las unidades de observación sin que el indicador alcance niveles de saturación.

$$NDRE = (NIR-RED\ EDGE) / NIR+RED\ EDGE) \qquad \text{Ecuación 17}$$

Dónde:

NDRE = Índice Normalizado Diferencial de Borde Rojo
NIR = Infrarrojo cercano RED
RED EDGE= Borde rojo

NDVI (Índice Normalizado Diferencial de Vegetación): Es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición, por medio de sensores remotos instalados comúnmente desde una plataforma espacial y de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja

Se calcula a partir de mediciones de reflectancia de la siguiente manera:

$$NDVI = (NIR-RED) / NIR+RED) \qquad \text{Ecuación 18}$$

Dónde:

NDVI = Índice Normalizado de Vegetación
NIR = Infrarrojo cercano
RED = Rojo

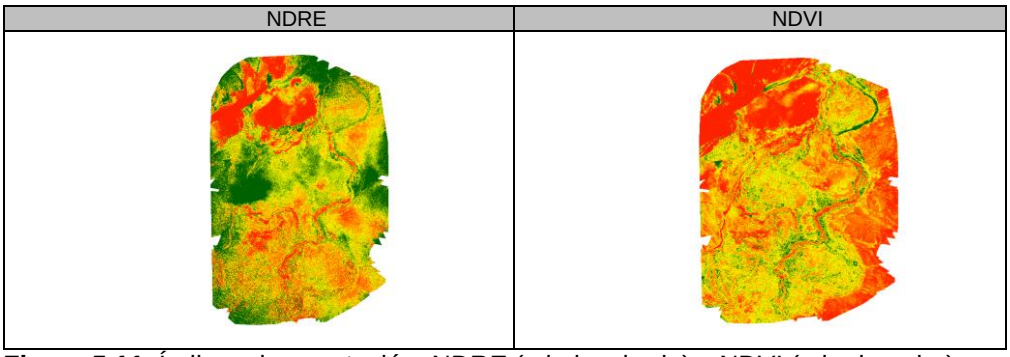


Figura 5.11. Índices de vegetación: NDRE (a la izquierda) y NDVI (a la derecha)

5.4.8 Criterios de evaluación

Los resultados obtenidos del muestreo de identificación en áreas de potencial interés fueron comparados con los Estándares de Calidad Ambiental para Suelo (en adelante, ECA para suelo) de uso agrícola[44]. Mientras que, para aquellos elementos que no cuentan con valores establecidos dentro del documento antes mencionado, los resultados fueron comparados referencialmente con los valores establecidos para calidad de suelos por «Normas Canadienses de la Calidad del Suelo para la Protección de la Salud del Medio Ambiente y los Humanos» *(Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health, 2007)* para Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), uso agrícola. Las concentraciones de los niveles de fondo obtenidas a través del tratamiento estadístico fueron comparadas con las concentraciones de los metales reportadas en las áreas de potencial interés junto a los ECA para suelo y a la *Canadian Soil Quality Guidelines* (CSQG). Los estándares de estas normas se detallan en la Tabla 5.30.

Tabla 5.30. Estándares de comparación nacional e internacional en calidad de suelos

Parámetros	Estándares de Calidad Ambiental para Suelos (ECA para Suelos) Decreto Supremo N.° 011-2017-MINAM (mg/kg MS)			Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) Canadian Soil Quality Guidelines CCME, 2007 (mg/kg)		
	Suelo de uso agrícola	Suelo de uso residencial / parques	Suelo Comercial / Industrial / Extractivo	Suelo de uso agrícola	Suelo de uso residencial / parques	Año revisado / aprobado
Mercurio (Hg)	6,6	6,6	24	6,6	6,6	1999[(a)]
Antimonio (Sb)	-----	-----	-----	20	20	1991[(b)]
Arsénico (As)	50	50	140	12	12	1997[(a)]
Bario (Ba)	750	500	2 000	750	500	2003[(a)]
Berilio (Be)	-----	-----	-----	4	4	1991[(b)]
Cadmio (Cd)	1,4	10	22	1,4	10	1999[(a)]
Cobalto (Co)	-----	-----	-----	40	50	1991[(b)]
Cobre (Cu)	-----	-----	-----	63	63	1999[(a)]
Cromo (Cr)	-----	-----	-----	64	64	1997[(a)]
Estaño (Sn)	-----	-----	-----	5	50	1991[(b)]
Molibdeno (Mo)	-----	-----	-----	5	10	1991[(b)]
Níquel (Ni)	-----	-----	-----	50	50	1999[(a)]
Plata (Ag)	-----	-----	-----	20	20	1991[(b)]
Plomo (Pb)	70	140	800	70	140	1999[(a)]
Selenio (Se)	-----	-----	-----	1	1	2007[(a)]
Talio (Tl)	-----	-----	-----	1	1	1999[(a)]
Vanadio (V)	-----	-----	-----	130	130	1997[(a)]
Zinc (Zn)	-----	-----	-----	250	250	2018[(a)]
Cianuro libre	0,9	0,9	8	0,9	0,9	1997[(a)]

[44] Aprobado mediante Decreto Supremo N.° 011-2017-MINAM.

Parámetros	Estándares de Calidad Ambiental para Suelos (ECA para Suelos) Decreto Supremo N.° 011-2017-MINAM (mg/kg MS)			Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) Canadian Soil Quality Guidelines CCME, 2007 (mg/kg)		
	Suelo de uso agrícola	Suelo de uso residencial / parques	Suelo Comercial / Industrial / Extractivo	Suelo de uso agrícola	Suelo de uso residencial / parques	Año revisado / aprobado
Cromo VI	0,4	0,4	1,4	0,4	0,4	1999[(a)]

[(b)] Canadian Council of Ministers of the Environment. 2007. Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health (Summary Tables)
[(b)] Canadian Council of Ministers of the Environment. 1991. Interim Canadian environmental quality criteria for contaminated sites. CCME, Winnipeg.

5.5 Objetivo específico 5: Determinar la influencia de los elementos de interés provenientes de los PAM sobre la flora y fauna silvestre (anfibios) en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo

5.5.1 Guías utilizadas para la evaluación

Para el muestreo de flora (tejido vegetal) y fauna (anfíbios), se utilizaron las guías y protocolos detallados en la Tabla 5.31.

Tabla 5.31. Guías de referencia para la evaluación de flora y fauna silvestre

Matriz	Autoridad emisora/autor	País	Dispositivo legal	Referencia	Año	Sección
Flora	Ministerio del Ambiente (Minam)	Perú	Resolución Ministerial N.° 059-2015-MINAM	Guía de inventario de la flora y vegetación del Ministerio del Ambiente	2015	Todas
	Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (Bolfor)	Bolivia	Mostacedo y Fredericksen	Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal	2000	Todas (87 p.)
	Comisión de la Comunidad Europea	España	Reglamento (CE) N.° 333/2007 - DOL 88 de 29.3.2007	Establecen los métodos de muestreo y análisis para el control oficial de los niveles de plomo, cadmio, mercurio estaño inorgánico, 3-MCPD y benzo(a)pireno en los productos alimenticios	2007	Sección B.2 del Anexo Parte B
	Ministerio de Agricultura y Riego	Perú	Resolución Ministerial N.° 0007-2019-MINAGRI	Protocolo de muestreo para la determinación de niveles de cadmio en suelos, hojas, agua, y granos de cacao	2019	Anexo: Protocolo para muestreo de hojas de cacao Secciones: 7 y 8 Transporte y Conservación de muestras
Fauna	Ministerio del Ambiente (Minam)	Perú	Resolución Ministerial N.° 057-2015-MINAM	Guía de inventario de la fauna silvestre	2015	Capítulo 5
	Oxford University Press	Reino Unido	C. Kenneth Dodd Jr	*Amphibian Ecology and Conservation: A Handbook of Techniques*	2010	Parte 2 Parte 3 Parte 7

Matriz	Autoridad emisora/autor	País	Dispositivo legal	Referencia	Año	Sección
	Oxford University Press	Reino Unido	C. Kenneth Dodd Jr	*Reptile Ecology and Conservation: A Handbook of Techniques*	2016	Parte 4
	USGS (siglas en inglés de Servicio Geológico de Estados Unidos)	Estados Unidos	Hoffman Gerald L.	*Methods of analysis by the U.S. Geological Survey National Water Quality Laboratory; preparation procedure for aquatic biological material determined for trace metals*	1996	Todas

A continuación, se describe las metodologías para la evaluación de anfibios.

- **Transectos lineales en hábitats acuáticos**

Son unidades de muestreo de 50 m establecidos en el curso de los cuerpos de agua, donde se realizan búsquedas intensivas bajo piedras, huecos, acumulaciones de algas, etc., cubriendo el curso de agua, cauce o 5 m de las orillas de ríos y quebradas. Cada transecto fue evaluado por una persona durante 45 minutos a 90 minutos. Se tomaron datos de georreferenciación, hora de inicio y finalización de búsqueda efectiva, característica del hábitat y condiciones meteorológicas, además de identificar posibles fuentes de perturbación antrópica como ganadería, o pastero y la presencia de algún componente minero. Según Dodd (2010), los datos de característica de aguas superficiales que influyen en el desarrollo y distribución de especies de anfibios, tales como la temperatura (°C), conductividad (µS/m), oxígeno disuelto (mg/L) y potencial de hidrógeno (unidades de pH).

- **Toma de datos de individuos capturados**

Todos los individuos fueron capturados a mano y manipulados con guantes de nitrilo. Cada uno fue pesado con una balanza electrónica portátil de 0,1 gr de precisión, con vernier electrónico de 0,1 mm se midió la longitud hocico-cloaca (LHC). Posteriormente, se realizó la identificación taxonómica hasta el nivel de especie y se determinó el sexo y estado de madurez (juvenil, subadulto o adulto).

- **Colecta de tejido para el análisis de metales pesados**

Para la detección de metales pesados, algunos individuos de anfibios fueron sacrificados con una solución de lidocaína al 10 %, en individuos grandes (>10 gr) se extrajo el hígado y músculo de la parte anterior del muslo. Respecto a las especies pequeñas (<10 gr), se envió todo el cuerpo, similar a lo realizado por Jofré *et al*. (2012). Las muestras fueron conservadas a una temperatura de 4 °C (Williams *et al*. (2010), hasta su envío al laboratorio para el análisis.

También se colectaron individuos para la identificación taxonómica, estos fueron fijados en formol al 10 % y preservados en etanol al 70 %, para su posterior entrega a una institución depositaria.

5.5.2 Ubicación de los puntos de muestreo

Para el muestreo de tejido vegetal, se establecieron 26 puntos de muestreo, obteniéndose un total de 46 muestras, las cuales se detallan en la Tabla 5.32, y en el Anexo 1.4 (RC-053-2020-STEC) se visualiza la ubicación espacial de esos puntos.

Además, para la evaluación de fauna (anfibios), se establecieron 30 transectos en hábitats acuáticos en el ámbito del río Ragra, río San Juan y algunos de sus tributarios (Tabla 5.33), ubicados en los mismos puntos de evaluación de aguas superficiales y sedimento; los cuales se pueden visualizar en el Anexo 1.2 (RC-036-2020-STEC).

Tabla 5.32. Ubicación de puntos de colecta de tejido evaluados en el área de estudio

Zona/API	Código de Tejido Vegetal	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18 L		Altitud (m s. n. m.)	Especie	Número de muestras*	Descripción
		Este (m)	Norte (m)				
API 3	SJTV01	361878	8798187	4067	*Festuca* rigescens	2	Margen izquierdo del río San Juan en Cruz Pata, en el área donde se ubicaba el pasivo minero Relave Colonial Chaquiniyo
	SJTV02	361885	8798022	4067	*Festuca* rigescens	2	
API 4	SJTV04	361906	8799386	4104	*Azorella* diapensioides	1	Margen izquierdo del río San Juan, al norte del área donde se ubicaba el pasivo minero Relave Colonial Baldeon
	SJTV05	361902	8799344	4108	*Festuca* rigescens	2	
	SJTV06	361917	8799103	4082	*Azorella* diapensioides	1	
	SJTV13	361946	8799336	4137	*Azorella* diapensioides	1	
	SJTV14	361952	8799162	4136	*Azorella* diapensioides	1	
	SJTV15	361900	8799206	4139	*Festuca* rigescens	2	
Zona 1	SJTV07	361545	8801192	3983	*Festuca* rigescens	2	Margen derecho del río San Juan en el área donde se ubicó remanentes del pasivo minero Relave Colonial Puente San Juan
	SJTV08	361511	8801187	4057	*Azorella* diapensioides	1	
	SJTV09	361557	8801241	4106	*Festuca* rigescens	2	
API 2	SJTV10	355130	8819298	4202	*Festuca* rigescens	2	Margen izquierdo del río San Juan antes de la confluencia con el río Ragra en el área donde se ubicó el pasivo minero Relave Colonial Canal Rancas, aproximadamente a 1,5 km de la comunidad de Rancas.
	SJTV11	355148	8819337	4205	*Plantago* tubulosa	2	
	SJTV12	355153	8819262	4222	*Plantago* tubulosa	2	
Zona control 2	SJTV16	362066	8798606	4114	*Azorella* diapensioides	1	Ubicado en el distrito de Vicco aproximadamente a 3,10 km aproximadamente al noroeste de la comunidad campesina de Vicco, siguiendo la carretera afirmada hacia el
	SJTV17	362124	8798698	4113	*Festuca* rigescens	2	

Zona/API	Código de Tejido Vegetal	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18 L		Altitud (m s. n. m.)	Especie	Número de muestras*	Descripción
		Este (m)	Norte (m)				
							lago Chinchaycocha, aproximadamente a 500 m suroeste del API_CS-DR
API 1	SJTV18	354698	8820958	4219	*Festuca* rigescens	2	Margen izquierdo del río San Juan dentro del área donde se ubicó el pasivo ambiental minero relave Colonial Tauro 6
	SJTV19	354737	8820927	4217	*Festuca* rigescens	2	
Zona control 1	SJTV20	354825	8820116	4213	*Festuca* rigescens	2	Césped de puna, en el margen izquierdo del rio San Juan, aproximadamente a 850 m. al norte del área donde se ubicó el pasivo minero Relave Colonial Canal Rancas
	SJTV21	354817	8820091	4212	*Plantago* tubulosa	2	
Zona control 3	TV-01	356536	8816006	4209	Dactylis glomerata	2	Área donde se ubicó el pasivo ambiental minero Sedimentos del río San Juan, a 6,20 km aproximadamente de la ciudad de Cerro de Pasco ruta hacia la laguna Alcacocha
	TV-02	356645	8816060	4220	Dactylis glomerata	2	
	TV-03	356520	8815880	4201	Dactylis glomerata	2	
	TV-04	356476	8815897	4233	Dactylis glomerata	2	
	TV-05	356903	8815189	4219	Dactylis glomerata	2	Ubicado en el distrito de Simón Bolívar, 1,00 km aproximadamente sureste de la comunidad campesina de Yurajhuanca, siguiendo la carretera afirmada hacia el distrito de Tiyahuarco, margen derecho
	TV-06	356850	8815284	4209	Dactylis glomerata	2	

*: Los puntos en donde se indican 2 muestras fueron aquellos en donde se realizó la división entre raíz y parte aérea de la misma especie, en cambio los puntos en donde se obtuvo 1 muestra hace referencia solo a la parte aérea.

Tabla 5.33. Transectos en hábitats acuáticos evaluados en el área de estudio

Código Transecto	Código Agua superficial	Fecha	Coordenada Inicial UTM WGS 84 Zona 18 M		Altitud m s. n. m.	Coordenada final UTM WGS 84 Zona 18 M		Altitud m s. n. m.	Hora inicio	Hora fin	Descripción
			Este (m)	Norte (m)		Este (m)	Norte (m)				
AM-He-T1	RSJua-08A	20/08/2020	356293	8814482	4206	356302	8814533	4208	10:35	11:20	Río San Juan, aguas arriba del pasivo minero Relave Colonial San Pablo
AM-He-T2	RSjua-08	20/08/2020	356622	8815061	4215	356574	8815073	4215	11:50	12:40	Río San Juan, aguas abajo del pasivo minero Relave Colonial San Pablo
AM-He-T3	SJ-11	20/08/2020	356859	8815495	4224	356912	8815542	4225	13:00	13:50	Río Ragra, aguas debajo de la planta Andes de Aurex
AM-He-T4	SJ-12	20/08/2020	356520	8815813	4212	356500	8815859	4214	14:10	14:40	Río San Juan aguas abajo de los sedimentos del río San Juan
AM-He-T5	RSjua-07	20/08/2020	356417	8815923	4219	356344	8815929	4221	15:05	15:45	Río San Juan aguas abajo de la comunidad de Yurajhuanca
AM-He-T6	SJ-10	20/08/2020	357399	8816543	4197	357443	8816571	4197	16:40	17:10	Río Ragra aguas abajo del depósito de relaves Ocroyoc
AM-He-T7	QSnom-02	22/08/2020	358435	8814997	4196	358477	8814967	4197	09:50	10:30	Quebrada S/N, afluente al río Culcalhuain aguas abajo Laguna Quiulacocha
AM-He-T8	Rquic 1	22/08/2020	355793	8816492	4175	355737	8816506	4176	12:20	13:00	Río Quicay, antes del confluencia con el rio San Juan
AM-He-T9	RSjua-04	22/08/2020	354947	8819362	4201	354901	8819401	4201	14:50	15:30	Quebrada S/N, afluente al río Culcalhuain aguas abajo del pasivo minero relave Colonial Laguna Quiulacocha
AM-He-T10	RSjua-03	24/08/2020	354785	8820406	4226	354760	8820339	4225	10:10	10:50	Río San Juan aguas abajo del pasivo minero relave Colonial Tauro 6
AM-He-T11	RSjua-02	24/08/2020	354466	8821028	4233	354468	8821085	4235	11:10	12:00	Río San Juan aguas arriba del pasivo minero relave Colonial Tauro 6
AM-He-T12	RSnom-02	24/08/2020	353677	8822171	4264	353699	8822233	4251	12:55	13:35	Río S/N afluente al río San Juan
AM-He-T13	RSjua-01	24/08/2020	353898	8822721	4212	353918	8822775	4266	14:00	14:40	Río San Juan parte alta de la cuenca
AM-He-T14	RPari-02	24/08/2020	354341	8823317	4278	354443	8823323	4284	15:00	15:40	Río Paria aguas abajo del pasivo minero Colonial Paria
AM-He-T15	SJ-35	19/09/2020	361589	8792595	4108	361615	8792650	4105	10:05	10:50	Margen izquierda del río San Juan, aguas abajo del Delta Upamayo.
AM-He-T16	RSjua-20	19/09/2020	362045	8793338	4098	362087	8793379	4100	11:10	12:00	Margen izquierda del río San Juan que bordea el Delta Upamayo y que se une con el brazo izquierdo de este río
AM-He-T17	RSjua-19	19/09/2020	360514	8793062	4098	360495	8793134	4103	12:15	12:45	Margen izquierda del brazo derecho del río San Juan, aguas abajo del Delta Upamavo
AM-He-T18	SJ-33*	19/09/2020	361811	8798436	4109	361792	8798369	4102	13:15	14:15	Margen izquierda del río San Juan en Cruz Pata, aguas abajo del Relave

Código Transecto	Código Agua superficial	Fecha	Coordenada Inicial UTM WGS 84 Zona 18 M		Altitud m s. n. m.	Coordenada final UTM WGS 84 Zona 18 M		Altitud m s. n. m.	Hora inicio	Hora fin	Descripción
			Este (m)	Norte (m)		Este (m)	Norte (m)				
											Colonial Chaquneoc y aguas arriba del Relave Colonial Chaquiniyo.
AM-He-T19	SJ-34	19/09/2020	361725	8796445	4103	361724	8796516	4101	15:30	15:50	Margen derecha del río San Juan, aguas abajo del Relave Cashajircan, aguas arriba del Relave Colonial Cochamarca
AM-He-T20	SJ-20	20/09/2020	356327	8808592	4173	356277	8808602	4170	09:55	10:20	Río Tinragra, 140 m aguas arriba de su confluencia con el río San Juan.
AM-He-T21	-	20/09/2020	355948	8808714	4186	355957	8808752	4195	10:40	11:40	Bofedal ubicado a 340 hacia el oeste del transecto AM-He-T20, en la margen derecha del río Tinragra
AM-He-T22	RSjua-09A	20/09/2020	356524	8808648	4177	356537	8808714	4174	12:00	12:45	Margen derecha del río San Juan, 100 m aguas arriba de la confluencia con el río Tinragra
AM-He-T23	SJ-18	20/09/2020	356278	8810958	4179	356355	8811036	4183	13:40	14:20	Margen derecha del rio San Juan, a 200 m aproximadamente aguas arriba de la descarga de las aguas municipales tratadas de la población de Sacrafamilia
AM-He-T24	RSjua-08B	20/09/2020	356696	8813668	4195	356517	8813794	4195	15:00	16:00	Bofedal margen izquierda río San Juan, altura del centro poblado Los Ángeles .
AM-He-T25	-	21/09/2020	354055	8822115	4219	354026	8822161	4219	10:00	11:00	Canal de agua en bofedal, ubicado en el sector Patacancha.
AM-He-T26	RPari-01	21/09/2020	355311	8823152	4243	355356	8823129	4240	12:00	13:00	Río Paria aguas arriba del pasivo minero Colonial Paria.
AM-He-T27	LAlca-02	21/09/2020	355714	8826952	4332	355740	8827001	4335	14:30	15:30	Quebrada ubicada al sur de la laguna Alcacocha.
AM-He-T28	LAlca-01	21/09/2020	356120	8828519	4348	356220	8828482	4355	16:00	16:30	Bofedal ubicado al noreste de la laguna Alcacocha.
AM-He-T29	Rhuar-01	22/09/2020	351355	8813814	4226	351296	8813847	4228	10:40	11:30	Río Huaraupampa, altura de piscigranjas de la cooperativa Quiulacocha.
AM-He-T30	-	22/09/2020	348897	8813570	4250	348891	8813494	4253	14:10	15:00	Río Huaraupampa, sector Tambillo.

-: No hay un punto de agua superficial y sedimento relacionado
*: Se empleó el punto RSjua-16 por ser el más cercano.

5.5.3 Parámetros y métodos de análisis

Se colectaron muestras de tejido vegetal para el análisis de metales totales. Los resultados (expresados en mg/kg) fueron obtenidos mediante la técnica de espectrometría ICP-MS (PE-324), a cargo del laboratorio AGQ Perú S.A.C. Además, se consideró la riqueza de especies presente en el área de estudio.

Por otro lado, los parámetros que se evaluaron en las comunidades de fauna (anfibios) silvestre fueron: composición especies, riqueza de especies, abundancia (número de individuos), diversidad alfa y diversidad beta. Estos parámetros se obtendrán de la evaluación cuantitativa y cualitativa (Figura 5.34).

Tabla 5.34. Transectos a evaluar en los grupos de fauna silvestre (anfibios)

Parámetros		Fauna silvestre	Laboratorio
		Anfibios	
Composición de especies		x	Especialista OEFA
Riqueza de especies		x	
Abundancia		x	
Índices de diversidad alfa	Números de Hill	x	
Esfuerzo de muestreo	Curva de acumulación de especies	x	
Metales en tejido animal		x	Laboratorio Typsa S.A.C

5.5.4 Equipos y materiales utilizados

Los equipos y materiales utilizados para la evaluación de flora y fauna silvestre se muestran en el Anexo 1.4 (reporte de campo N.° RC-053-2020-STEC).

5.5.5 Tipo de muestreo

A continuación, se describe el tipo de muestreo para flora silvestre.

- **Búsqueda intensiva**

La evaluación cualitativa o búsqueda intensiva se realizó a través de caminatas dentro del área de estudio, con la finalidad de evidenciar las especies de flora silvestre presente en el tiempo de la evaluación. Además, se realizó la recolecta de especímenes que no fueron identificados en campo para su posterior identificación en el laboratorio, estos procedimientos de recolecta y prensado se realizaron empleando las metodologías recomendadas por Cerrate (1969). Se recolectaron solo especímenes en estadios de floración y fructificación, aquellas en vegetativo solo fueron registrados.

Las colecciones botánicas «*voucher*» se realizaron en el caso de que una especie no haya sido identificada y cuando existió cualquier incertidumbre para su identificación en campo. Todo individuo colectado tuvo un duplicado además del original, por otro lado, las colecciones repetidas de plantas estériles fueron usadas para distinguir confiablemente las morfoespecies.

- **Colecta de tejido vegetal**

Para la colecta de tejido vegetal, se realizó una selección de las especies en las que se obtuvo las muestras, tomando en cuenta 2 criterios: especie más dominante y especie más significativa de la formación vegetal presente en el área de estudio.

Se seleccionaron 4 especies vegetales, para el muestreo de tejido vegetal, *Festuca rigescens* (J.Presl) Kunth (Poaceae), *Dactylis glomerata* L. (Poaceae), *Plantago tubulosa* Decne. (Plantaginaceae) y *Azorella diapensioides* A.Gray (Apiaceae), las cuales se colectaron de la siguiente manera:

Festuca rigescens: cada muestra colectada de esta especie fue divida en raíz y parte área.
Dactylis glomerata: cada muestra colectada de esta especie fue divida en raíz y parte área.
Plantago tubulosa: cada muestra colectada de esta especie fue divida en raíz y parte área, realizando la separación en el límite superior con presencia de raíces.
Azorella diapensioides: para la colecta de esta especie se tomó en consideración las ramas distales de la planta, realizando el corte en el último centímetro. Para esta especie solo se consideró la parte aérea.

Las muestras fueron depositadas en sobres de manila y guardadas en *coolers*, para su traslado hacia el laboratorio.

5.5.6 Procesamiento de datos

a. Flora silvestre

a.1. Determinación de formaciones vegetales

Para la identificación de las formaciones vegetales en el área de estudio, se tomó en cuenta la fisionomía de las plantas, que toma en cuenta las formas de vida que predominan o que son más conspicuas en las comunidades (Weberbauer, 1945).

a.2 Composición de especies

Las muestras colectadas fueron analizadas en el Laboratorio de Florística del Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), mediante el uso claves especializadas como las de Macbride *et al.* (1936 y siguientes); Ferreyra (1946); Molau (1990); Sagástegui y Leiva (1993); Tovar (1993); entre otros. Además, las determinaciones fueron corroboradas cuando fue necesario por consulta a especialistas o comparación con muestras del Herbario San Marcos (USM) y base de datos de herbarios virtuales como las del Missouri Botanical Garden (MO) y Field Museum Herbarium (F).

Para el ordenamiento de especies de angiospermas se utilizó el Sistema de Clasificación del Angiosperm Phylogeny Group IV (APG IV) y para los pteridofitos y afines el Sistema de Clasificación propuesto por Smith *et al.* (2006).

a.3 Correlación bivariada

Existen diversos coeficientes que miden el grado de correlación entre 2 variables. No obstante, estos han sido adaptaciones a los distintos niveles de medición de la fórmula fundamental de Karl Pearson. El coeficiente de Pearson (introducido en realidad por Francis Galton), sintetiza de forma magistral la idea fundamental de la correlación. La misma define una razón entre la cantidad de covarianza de 2 variables y el producto de sus desviaciones estándar.

Se analizó la correlación existente entre los metales presentes en el tejido vegetal de 4 especies y los metales presentes en el suelo donde se desarrollan.

a.4. Prueba de hipótesis

Una prueba de hipótesis es una regla que especifica si se puede aceptar o rechazar una afirmación acerca de una población dependiendo de la evidencia proporcionada por una muestra de datos.

Esa prueba examina 2 hipótesis opuestas sobre una población: la hipótesis nula y la hipótesis alternativa. La hipótesis nula es el enunciado que se probará. Por lo general, la hipótesis nula es un enunciado de que "no hay efecto" o "no hay diferencia". La hipótesis alternativa es el enunciado que se desea poder concluir que es verdadero de acuerdo con la evidencia proporcionada por los datos de la muestra.

Para el desarrollo de la evaluación de flora silvestre se definen las siguientes hipótesis:

Hipótesis alternativa:
Hi: la concentración de metales totales presente en las muestras colectadas en el sitio control son diferentes a las colectadas en el API.

Hipótesis nula:
Ho: la concentración de metales totales presente en las muestras colectadas en el sitio control no son diferentes a las colectadas en el API.

b. Fauna silvestre

b.1. Composición y riqueza de especies

Se realizó la clasificación taxonómica de las especies de anfibios registrados durante las evaluaciones, se utilizaron claves especializadas, descripciones científicas de Aguilar *et al*. (2017), Boulenger (1901), Duellman *et al.* (2015) y Gutiérrez *et al.* (2018), bases de datos internacionales, así como colecciones científicas de referencia, la Colección de Herpetología del Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco y el Departamento de Herpetología del Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Para la clasificación taxonómica, respecto a los anfibios se siguió la taxonomía utilizada por Frost (2020) y en cuanto a los reptiles la utilizada por Uetz (2020).

b.2. Diversidad de especies

Se realizó el análisis de diversidad debido a que en estudios previos no se registraron especies de anfibios o reptiles, siendo necesaria la caracterización de la diversidad de especies para el área de evaluación, para lo cual se realizaron los siguientes análisis:

- **Diversidad alfa**

Número efectivo de especies o números de Hill es una medida estandarizada de los índices de diversidad clásicos, los cuales tienen propiedades únicas para aplicaciones específicas. De manera que los índices netos de diversidad (Riqueza S, Shannon H’ y Simpson 1- ʎ.) pueden ser expresados en valores de una diversidad real o verdadera de una comunidad virtual en la que todas las especies tuvieran la misma abundancia relativa (Hill, 1973; Jost, 2007). Este índice de diversidad (qD) muestra una medida del número de especies efectivas cuando cada especie es ponderada por su abundancia relativa (Hill, 1973; Jost, 2007). Valores diferentes del exponente *q* en cada cálculo da un peso diferencial a la abundancia

relativa de especies (Jost *et al*., 2011). El valor de ^{0}D corresponde a la riqueza de especies, ^{1}D muestra el número de especies comunes y ^{2}D representa el número de las especies dominantes y más abundantes (Chao et al., 2014).

Se calcula a partir de la siguiente fórmula (Jost, 2006):

$$qD = \left(\sum_{i=1}^{S} p_i^q\right)^{\frac{1}{(1-q)}} \qquad \text{Ecuación 19}$$

Dónde:

qD: Diversidad verdadera
pi: Abundancia de la especie i dividida entre la suma total de abundancias de las S especies que integran la comunidad
q: Exponente de la diversidad

Estos análisis se realizaron en el paquete estadístico INext 2.0.12 (Hsieh *et al*., 2016) con un boostrap de 1000 repeticiones y un intervalo de confianza del 95 %, en el programa R (R Core Team, 2018).

b.3. Curva de acumulación de especies

Se realizó una curva de acumulación en base al número de transectos evaluados, calculando el modelo que mejor se ajusta a los datos para determinar la eficiencia del muestreo, por lo que se midió comparando el número de especies observadas versus el número de especies esperadas. Los modelos predicen el número esperado de especies, si se incrementa el esfuerzo de muestreo, los cuales se calcularon mediante procesos estocásticos de nacimientos puros en el programa «Species Accumulation» (Días-Fránces y Soberón, 2005). En la Tabla 5.35, se detallan las fórmulas de cálculo de los modelos de clench, exponencial y logarítmico.

Tabla 5.35. Fórmulas de los modelos para las curvas de acumulación de especies

Modelo	Fórmula	Formula de Asíntota (Especies esperadas)
Exponencial	$(a/b)\ (1 - e^{-bt})$	a/b
Clench	$at/(1+bt)$	a/b
Logarítmico	$(1 - e^{-b})^{-1} \log\ (1 + (1 - e^{-b})\ at)$	-

Dónde: t representa el esfuerzo de muestreo, y a y b los parámetros de ajuste de la curva

b.4. Determinación de especies endémicas y amenazadas de fauna silvestre

La lista de especies endémicas se determinó mediante la revisión de bibliografía, así como las descripciones de las especies o aquellas que indiquen la distribución o ampliación de rango. Adicionalmente se consultaron bases de datos en línea como «Reptile Database» (Uetz *et. al*., 2019), «Amphibian species of the world» (Frost, 2019), Amphibiaweb (2018) y la base de datos de distribución de especies de la «The IUCN Red List of Threatened species» (UICN, 2019).

Para determinar las especies amenazadas de fauna anfibios se consultó la lista de clasificación y categorización de las especies amenazadas de fauna silvestre protegidas por el estado peruano según el Decreto Supremo N.° 004-2014-MINAGRI; complementadas con el Libro Rojo de Fauna Silvestre Amenazada del Perú (Serfor, 2018). También, se listaron las especies incluidas en «The IUCN Red List of Threatened species»[45] (UICN, 2020) y los

[45] Traducido al español como Lista Roja de especies amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.

apéndices «The Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora»[46] (Cites, 2017).

b.5. Determinación de la contaminación de metales pesados en los tejidos de anfibios y reptiles

Relación concentración de metales pesados detectados en el medio físico y los tejidos
Para determinar si existe relación entre la concentración de metales pesados hallados en el medio físico (agua o suelo) y los hallados en el tejido de los anfibios y reptiles colectados, se realizará una comparación entre los patrones de covarianza de la matriz de metales pesados mediante un análisis de Likekihood ratio test.

Índice de bioacumulación (IB)
Representa la acumulación neta de un metal en un organismo como resultado de absorción del medio ambiente circundante. El IB se calculó mediante la ecuación (Stolyar *et al*. 2008; Simon *et al*. 2017):

$$IB = C_{org} / C_m \qquad \text{Ecuación 20}$$

C_{org} = concentración de metales en organismos basados en peso húmedo.
C_m = concentración del metal en el agua o suelo

5.5.7 Criterios de evaluación

a. Flora silvestre

En vista que los pastos naturales que son objeto de la evaluación de flora silvestre fueron usados como alimento para ganado, y en el marco de la Resolución Directoral N.° 0027-2017-MINAGRI-SENASA-DIAIA[47], para el periodo abril a diciembre de 2017; en el cual se indica que se pueda usar los límites máximos de residuos establecidos por la Unión Europea. Los resultados de los metales totales obtenidos fueron comparados referencialmente con los valores establecidos por la última modificación del Real Decreto 465/2003, sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal. Se utilizó esta norma debido a que procede de España y recoge las disposiciones legales establecidas en la Unión Europea.

Los parámetros de metales totales: arsénico, plomo, mercurio y cadmio; contenidos en la norma española mencionada líneas arriba, sirvieron de comparación referencial, se presentan a continuación en la Tabla 5.36.

Tabla 5.36. Valores de comparación para la calidad de tejidos vegetales

Normativa de referencia	Parámetro	Unidad	Contenido Máximo
Real Decreto 465/2003	Arsénico	mg/kg*	2
	Plomo		30
	Mercurio		0,1
	Cadmio		1

*Referido a un contenido de humedad del 12 %

b. Fauna silvestre

[46] Traducido al español como Convención sobre el comercio internacional de especies amenazadas de fauna y flora silvestres.
[47] Resolución que aprueba el Plan Anual de Monitoreo de residuos químicos y otros contaminantes en Alimentos Agropecuarios Primarios y Piensos.

La evaluación de la fauna silvestre se realizó comparando los resultados de la evaluación con los estudios previos realizados en ecosistemas similares o con los Instrumentos de Gestión Ambiental (IGA) del administrado.

Las especies de anfibios y reptiles endémicas[48] de Perú se determinaron mediante la revisión de bibliografía especializada como las descripciones originales de las especies o aquellas que indiquen la ampliación de rango. Adicionalmente, se consultarán bases de datos en línea como «Reptile Database», «*Amphibian species of the world*», «*Amphibiaweb*» y la página de la Lista Roja de especies amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.

Las especies capturadas serán clasificadas según su estado de conservación. A nivel nacional se seguirá la última actualización de la lista de clasificación y categorización de especies amenazadas de fauna silvestre legalmente protegidas (Decreto Supremo N.º 004-2014-MINAGRI) y el Libro Rojo de Perú; mientras que, a nivel internacional, se seguirá las categorías determinadas por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), siendo estas: extinto (EX), extinto en estado silvestre (EW), en peligro crítico (CR), en peligro (EN), vulnerable (VU), casi amenazado (NT), preocupación menor (LC), menor riesgo o casi amenazado (LR), datos insuficientes (DD) y no evaluado (NE). Las especies listadas en las categorías CR, EN y VU se consideran «amenazadas».

Actualmente, no existe un marco normativo que permita comparar los resultados obtenidos de las muestras de tejidos para la cuantificación de metales pesados en mamíferos menores, anfibios, reptiles, y plumas extraídas de aves capturadas. Sin embargo, las muestras obtenidas servieron como indicadores de la presencia de estos metales.

6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este ítem se presenta el análisis y los resultados obtenidos durante la evaluación ambiental en el área de influencia de los Pasivos del río San juan y Delta Upamayo (en adelante, EAC PRSJDU), los cuales se detallan a continuación en función a los objetivos específicos para cada uno de los componentes evaluados.

6.1 Objetivo específico 1: Identificar fuentes de contaminación en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo

6.1.1 Caracterización geoquímica de los residuos mineros

Dentro del área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo se consideraron un total de 9 emplazamientos, cuyas descripciones de campo se detallan en la Tabla 6.1.

[48] El término *endemismo* es utilizado en biología para indicar que la distribución de un taxón está limitada a un ámbito geográfico reducido y que no se encuentra de forma natural en ninguna otra parte del mundo. Por ello, cuando se indica que una especie es endémica de cierta región, significa que sólo es posible encontrarla de forma natural en ese lugar.

Tabla 6.1. Descripciones de campo de residuos mineros en el área de influencia del área de estudio

N.°	Código	Descripción
1	PAM-54	Pasivo ambiental minero Cashajircan, ubicado en la margen izquierda del río San Juan. El lugar muestra evidencia de haber sido utilizado como depósito de cantera de gravas.
2	PAM-49	Pasivo ambiental minero Colonial Chaqueneoc, ubicado a la margen izquierda del río San Juan. En su mayoría el material de relave ha sido removido, aunque se hallan zonas puntuales con costras de 20cm de espesor de aparente material de relave. Además, el sitio muestra evidencia de haber sido utilizado como depósito de cantera de gravas.
3	PAM-53	Pasivo ambiental minero Relave Colonial Marcapunta A, ubicado en la margen izquierda del río San Juan, sin embargo, la capa de remediación está siendo erosionada y arrastrada a la parte baja, en dirección a donde indica la coordenada de este relave colonial.
4	PAM-32	Residuo minero del PAM Planta Santa Rita Y Lucero, ubicado en la margen izquierda del río Huaraupampa. Se encontró restos de aparente material de relave mezclado con suelo en una capa de 10 cm en una “poza” de concreto en la parte alta, la cual se encuentra fracturada y por donde discurre el material hacia una depresión ubicada hacía en la parte baja de este PAM
5	PAM-33	Pasivo ambiental minero que corresponde a restos de infraestructura de operaciones mineras coloniales Planta Santa Rita y Lucero, sin embargo, en las depresiones aledañas se observa acumulación de material de relave proveniente del PAM-32. Actualmente se encuentra revegetado y muestra aparente uso como corrales para ganado ovino.
6	PAM-26	Pasivo ambiental minero sedimentos del río San Juan, localizado en la margen izquierda del río San Juan. En el lugar se observan residuos mineros en costras de 4 cm de espesor, las cuales muestran aparente lixiviación y oxidación, sin embargo, las costras son puntuales ya que gran parte del área ha sido revegetado.
7	PAM-20	Pasivo ambiental minero Relave Colonial Tauro 6, ubicado en la margen izquierda del río San Juan. Aparentemente el material de relave fue removido. Los residuos de este PAM están mezclados con material que usaron para afirmar la carretera (roca caliza chancada).
8	PAM-16	Residuo minero del PAM Relave colonial puente San Juan ubicado en la margen derecha del río San Juan. La zona fue revegetada para su uso en pastoreo.
9	PAM-23	Material de la base de la carretera en el área donde se ubica el residuo minero del pasivo ambiental minero Relave Colonial Laguna Quiulacocha.

En la Figura 6.1 se presenta los resultados de concentraciones de metales totales en residuos mineros (PAM-16, PAM-54, PAM-49, PAM-53, PAM-32, PAM-33, PAM-26, PAM-20 y PAM-23), donde los valores de mercurio, plata, cadmio, selenio, antimonio, talio, molibdeno, estroncio, arsénico, plomo, cobre, zinc, bario, manganeso, calcio y hierro fueron superiores a la media de la corteza terrestre, conforme a Rudnick (2014); a excepción del resto que muestran valores por debajo de la concentración media de la corteza.

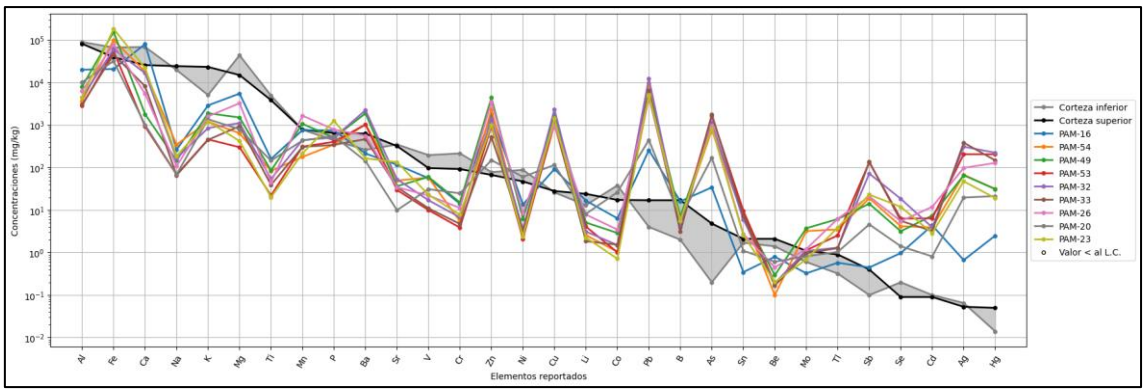


Figura 6.1. Concentraciones de metales totales en muestras de los residuos mineros, en comparación con el rango de concentraciones de la corteza, según Rudnick (2014)

En cuanto a la generación de acidez de las muestras de residuos mineros, mediante la prueba estática de balance ácido-base (ABA), de acuerdo al criterio 1[49] y 2[50] se observa que las muestras PAM-54 y PAM-23 son generadoras de ácido y la muestra PAM-16 es no generadora de ácido, tal y como se muestra en la Figura 6.2. De igual manera, los resultados de potencial de hidrógeno en pasta de 7,82; 3,08 y 6,15 unidades de pH para los residuos mineros PAM-16, PAM-54 y PAM-23 respectivamente, concuerdan con ambos criterios.

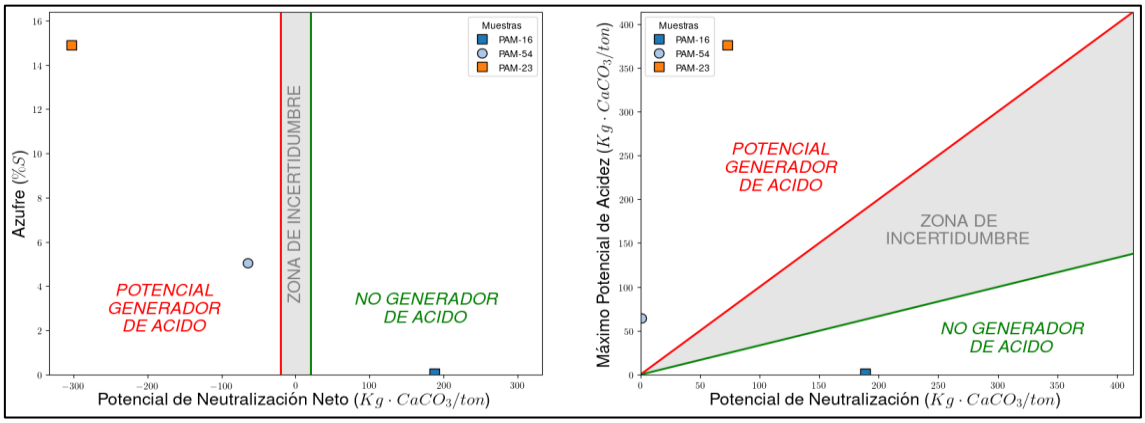


Figura 6.2. Prueba ABA de muestras de residuos mineros (PAM-16, PAM-23 y PAM-54) analizadas con a) criterio 1 y b) criterio 2

Según los resultados de análisis mineralógico por microscopia óptica, de manera general se tiene que, el residuo minero PAM-23 presenta un alto porcentaje de cuarzo y pirita. En cuanto a las alteraciones, se describe óxidos de hierro, minerales secundarios producto de la alteración por oxidación de la pirita. La muestra de este residuo minero ha sido clasificada como roca silicificada, debido a la presencia abundante de cuarzo secundario, tal y como se detalla en la Tabla 6.2 y se muestra en la Figura 6.3.

Tabla 6.2. Resultado de análisis mineralógico por microscopia óptica que detalla las alteraciones presentes y la clasificación de la muestra de residuo minero PAM-23

Código Muestra	PAM-23
Alteraciones	
Silicificación	Cuarzo II y Cuarzo III (Intensa)
Alunitización	Alunita (Muy Débil)
Argilización	Arcillas (Débil)
Oxidación	Óxidos de hierro (Débil)
Probable secuencia paragenética	Rutilo, Pirita I, Pirita II, Óxidos de Hierro
Textura	De reemplazamiento
Clasificación de la roca	Roca silicificada

[49] **Criterio 1:** Para un potencial neto de neutralización: < a 0, la muestra es «generadora neta de ácido» [entre -20 y +20 kg CaCO3/Ton] la muestra corresponde a un rango de «incertidumbre»; > a +20 kg CaCO3/Ton, se considera a la muestra es «potencial no generador de ácido» < a -20 kg CaCO3/Ton se considera «potencial generador de ácido»

[50] **Criterio 2:** Ratio potencial de neto (RNP), para un PN/PA < 1:1 es probable que se genere acidez, mientras que para el rango de PN/PA entre 1:1 y 3:1 corresponde a una zona de «incertidumbre». Cuando el PN/PA >3:1, la muestra es «potencial no generador de acidez».

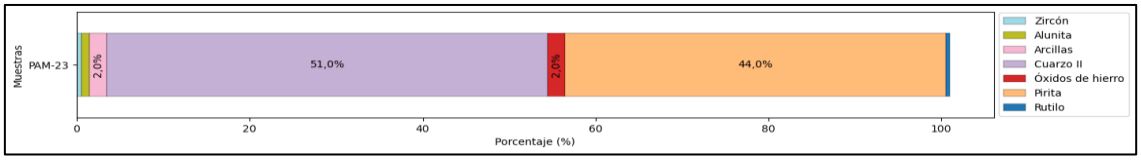


Figura 6.3. Resultado de análisis mineralógico por microscopia óptica, que muestra la distribución de los minerales reportados en PAM-23

De acuerdo a los resultados del análisis mineralógico por difracción de rayos X, de manera general se observa que la muestra PAM-23 presenta alto porcentaje de cuarzo, pirita y presencia de minerales de plomo, la muestra PAM-54 presenta sulfatos de hierro, oxi-hidróxidos de hierro, arcillas y calcita; en cuanto a, los sulfatos de hierro son un indicador de pirita preexistente (en la muestra, la pirita se presenta como traza) y condiciones ácidas, ya que la formación de jarosita es incompatible con ambientes alcalinos; por último, la muestra PAM-16 presenta calcita, cuarzo, plagioclasas, feldespatos y arcillas (Figura 6.4).

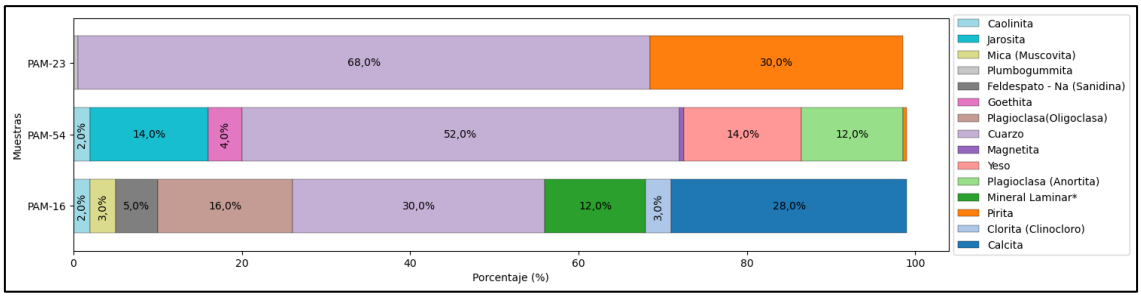


Figura 6.4. Minerales reportados en el análisis mineralógico por difracción de rayos X en muestras de residuos mineros

Se empleó la prueba lixiviación *shake flask* metales para caracterizar y medir la interacción del material de los residuos mineros con agua proveniente de fenómenos meteorológicos (agua meteórica), como resultado se tuvo la corrida de 33 metales, detallados en el RRE-035-2020-STEC (Anexo 2.1). De acuerdo a la Figura 6.5 se puede observar la ocurrencia de lixiviados de cadmio, antimonio, plomo, cobre, zinc, estroncio, calcio y hierro.

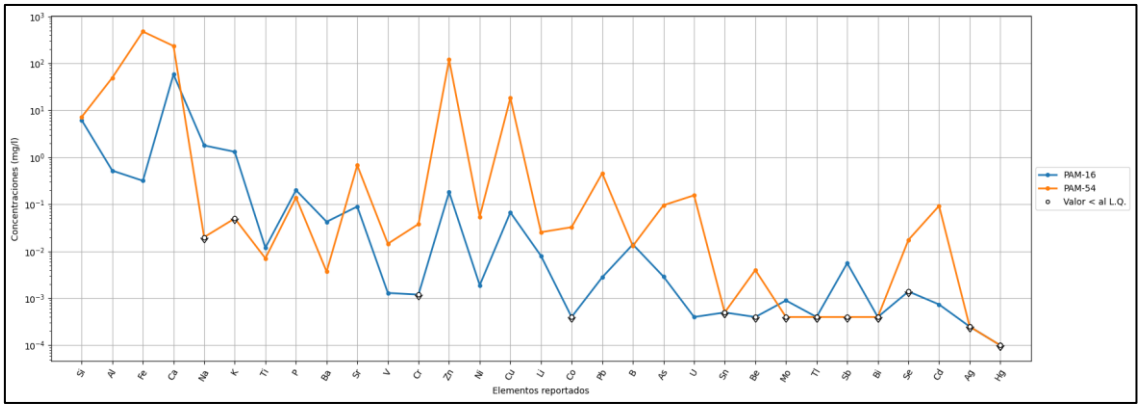


Figura 6.5. Concentraciones de metales en la prueba de lixiviación *shake flask* metales en muestras de residuos mineros

Complementando el anterior ensayo, se empleó la prueba lixiviación *shake flask* aniones, cuyos resultados muestran que los aniones predominantes en los residuos mineros son los sulfatos seguido por los nitratos y los cloruros, tal y como se muestra en la Figura 6.6.

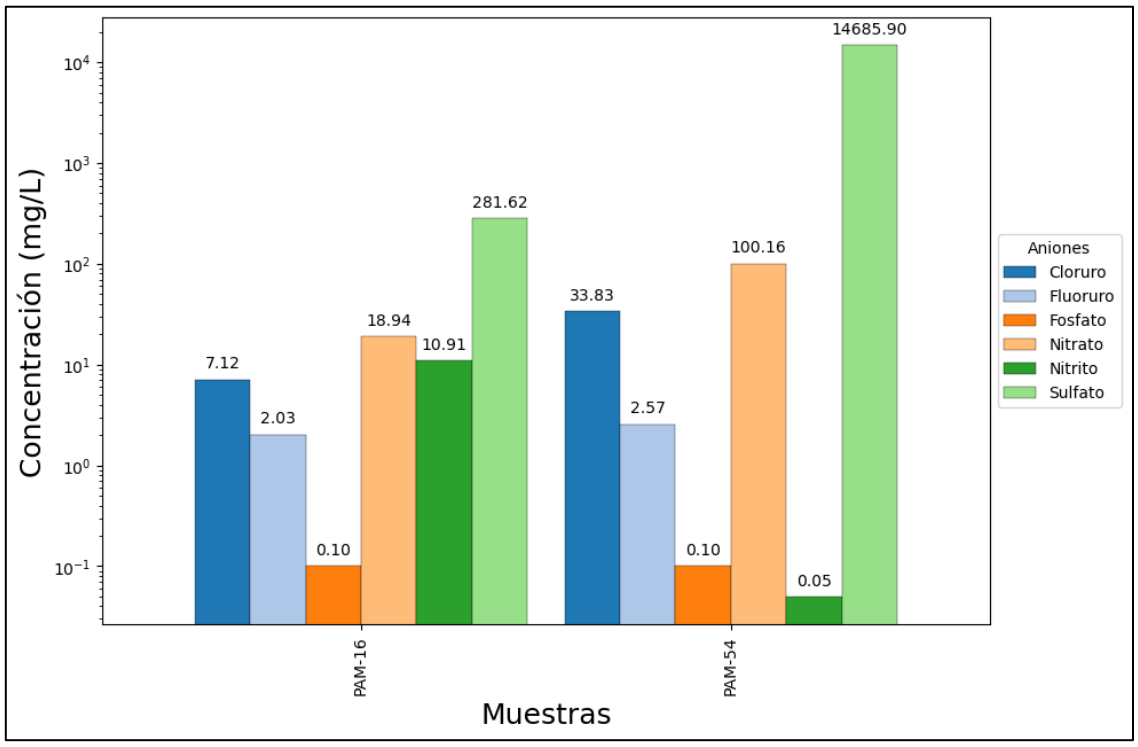


Figura 6.6. Concentraciones de aniones en la prueba de lixiviación *shake flask* aniones en muestras de residuos mineros

En la Figura 6.7. se detalla los resultados de las fracciones de la extracción secuencial de Dold, que corresponden a las fracciones soluble en agua (FSA), intercambiable (FI), oxihidróxidos de hierro (III) (FOHH3), óxidos de hierro (III) (FOH3), orgánicos y sulfuros de cobre secundarios (FO&SCS), sulfuros primarios (FSP) y residual (FR). De las cuales las dos primeras (FSA y FI) son las fracciones más susceptibles a liberar sus lixiviados a condiciones ambientales y cuyos resultados muestran altas concentraciones para el azufre, calcio, y hierro.

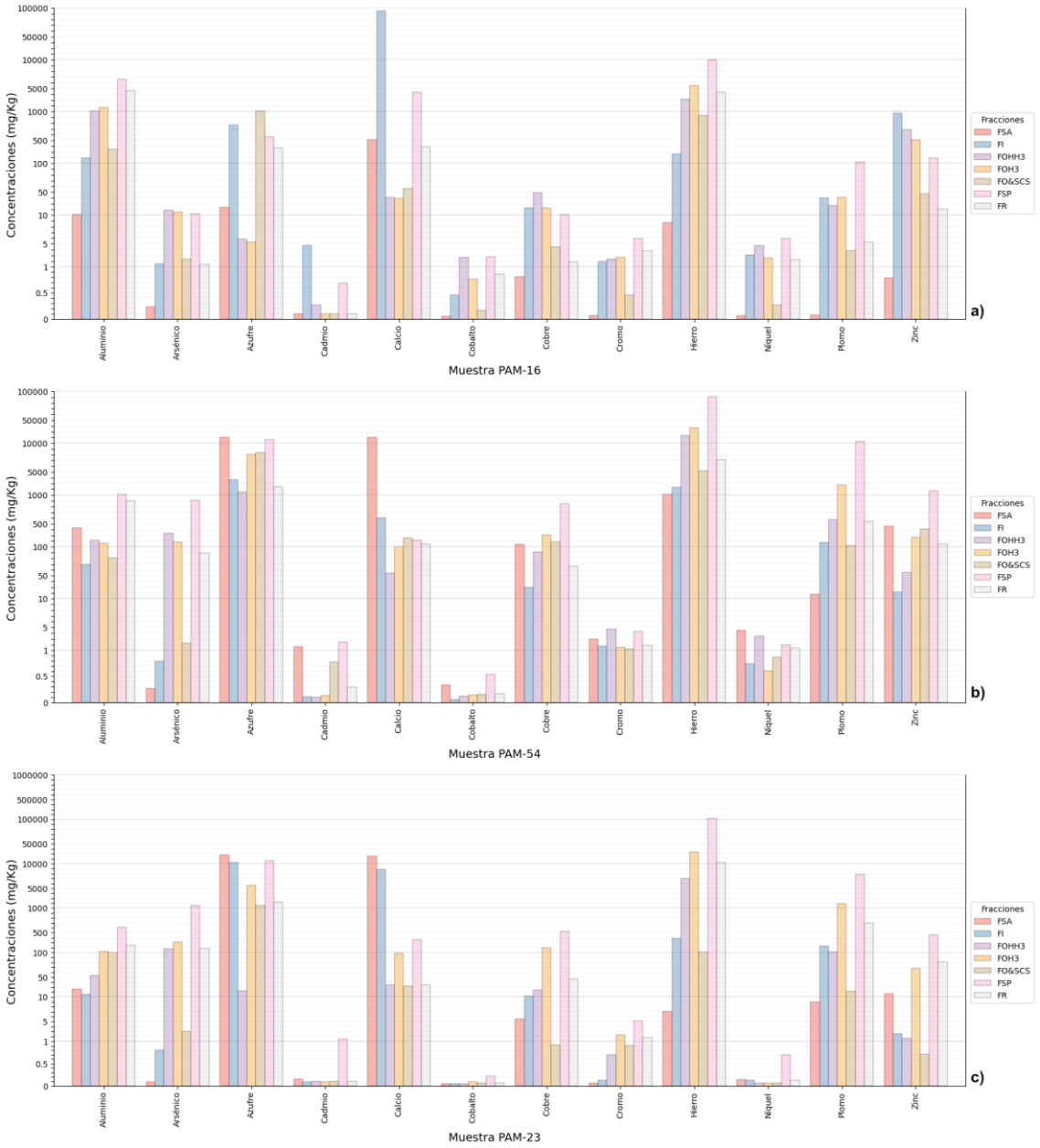


Figura 6.7. Resultados de la extracción secuencial de Dold para las muestras de residuos mineros a) PAM-16, b) PAM-54 y c) PAM-23

6.1.2 Agua residual y turbinada

6.1.2.1 Valores que superaron la normativa vigente

Los puntos de muestreo de agua residual doméstica (AR-01, DSF-01, DRSjua-07 y DYura-01), así como el punto DRSjua-07B (el cual no se pudo identificar su procedencia); fueron comparados con los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, aprobados mediante Decreto Supremo N.° 003-2010-MINAM (en adelante, LMP 003-2010). La Tabla 6.3 muestra los resultados de parámetros de los puntos de muestreo de aguas residuales.

Tabla 6.3. Resultados de parámetros muestreados en los puntos de agua residual domésticas, comparados con los LMP 003-2010

Parámetro	Unidad	AR-01	DSF-01	DRSjua-07	DRSjua-07B	DYura-01	LMP 003-2010
pH	Uds. de pH	9,12	8,16	7,28	7,72	7,69	**6,5 – 9,5**
Conductividad eléctrica	µS/cm	372	402	514	1298	298	**---**
Oxígeno disuelto	mg/L	8,7	3,37	1,03	2,81	3,03	**---**
Sólidos totales en suspensión	mg/L	19,3	34	28	14	19,3	**150**
Aceites y grasas	mg/L	0,917	5.787	11,96	0,44	5.724	**20**
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)	mg/L	59	38	16	32	17	**100**
Demanda química de oxígeno	mg O2/L	73	66	66	127	40	**200**
Sulfatos	mg/L	20	22	19	528	20	**---**
Cromo hexavalente	mg/L	-	-	< 0,008	< 0,008	--	**0,1**
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	70	70000	170000	< 1,8	--	**10000**
Cobre Total	mg/L	< 0,0003	0,0011	< 0,0003	17,07	< 0,0003	**---**
Hierro Total	mg/L	< 0,03	< 0,03	1,7	< 0,03	< 0,03	**---**
Manganeso Total	mg/L	0,05259	0,02229	0,31587	3,2293	0,11072	**---**
Plomo Total	mg/L	0,00143	0,00352	0,00213	0,0018	0,00466	**---**
Zinc Total	mg/L	0,009	0,021	0,018	0,098	0,064	**---**

Fuente: Reporte de resultados N.° RRE-035-2020-STEC (Anexo 2.1).
«--»: Parámetro no analizado
«---»: No existe valor en los LMP 003-2010
: Resultado que superó el valor establecido en los LMP 003-2010

En la Tabla 6.3 se muestra que los valores de coliformes termotolerantes en los puntos DSF-01 (7000 NMP/100 mL) y DRSjua-07 (170000 NMP/ 100 mL), excedieron el valor de los LMP 003-2010; siendo el único parámetro que se encuentra fuera de lo establecido en la norma mencionada.

El punto de muestreo en aguas turbinadas (DCLT50Kv) fue comparado con los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero-Metalúrgicas, aprobados mediante Decreto Supremo N.° 010-2010-MINAM (en adelante,

LMP 010-2010); el punto RSJua-07B también fue comparado con esta normativa porque durante la etapa de campo no se pudo determinar su procedencia, y además en el análisis estadístico presentó concentraciones altas en conductividad, sulfatos, cobre y manganeso, lo cual lo diferencia de los otros puntos de agua residual doméstica (AR-01, DSF-01, DRSjua-07 y DYura-01). La Tabla 6.4 muestran los resultados de parámetros de los puntos de muestreo de agua residual doméstica y agua turbinada. Los resultados de todos los parámetros se encuentran a detalle en el Anexo 2.1, correspondiente al reporte de resultados N.° RRE-035-2020-STEC.

Tabla 6.4. Resultados de parámetros muestreados en los puntos de agua turbinada y agua residual con los LMP 010-2010

Parámetro	Unidad	DCLT50Kv	DRSjua-07B	LMP 010-2010
pH	Uds. de pH	8,02	7,72	**6,0 – 9,0**
Conductividad eléctrica	µS/cm	217,6	1298	**--**
Oxígeno disuelto	mg/L	6,23	2,81	**--**
Sólidos totales en suspensión	mg/L	6	14	**50**
Aceites y grasas	mg/L	< 0,100	0,44	**20**
Sulfatos	mg/L	13	526	**--**
Arsénico Total	mg/L	0,01024	0,0071	**0,1**
Cadmio Total	mg/L	0,00004	0,00064	**0,05**
Cobre Total	mg/L	< 0,0003	17,07	**0,5**
Manganeso Total	mg/L	0,0373	3,2293	**--**
Mercurio Total	mg/L	0,000142	0,000655	**0,002**
Plomo Total	mg/L	0,00502	0,0018	**0,2**
Zinc Total	mg/L	0,027	0,098	**1,5**
Hierro Disuelto	mg/L	< 0,03	< 0.03	**2**

Fuente: Reporte de resultados N.° RRE-035-2020-STEC (Anexo 2.1).
«--»: No existe valor en los LMP 003-2010
: Resultado que superó el valor establecido en los LMP 003-2010

Los resultados del agua turbinada y agua residual doméstica (Tabla 6.4) se encontraron dentro de lo establecido en los LMP 010-2010; mientras que, la concentración de cobre en el punto DRSjua-07B fue superior al valor (0,5 mg/L) establecido en la norma en mención.

6.1.2.2 Hidroquímica del agua residual y turbinada

Las aguas residuales y turbinadas se dividen en 2 facies, los puntos AR-01, DSF-01, DRSjua-07, Dyura-01 y DCLT50Kv tienen facies bicarbonatada cálcica, y solamente el punto DRSjua-07B presenta facies sulfatada cálcica-magnésica (Figura 6.8).

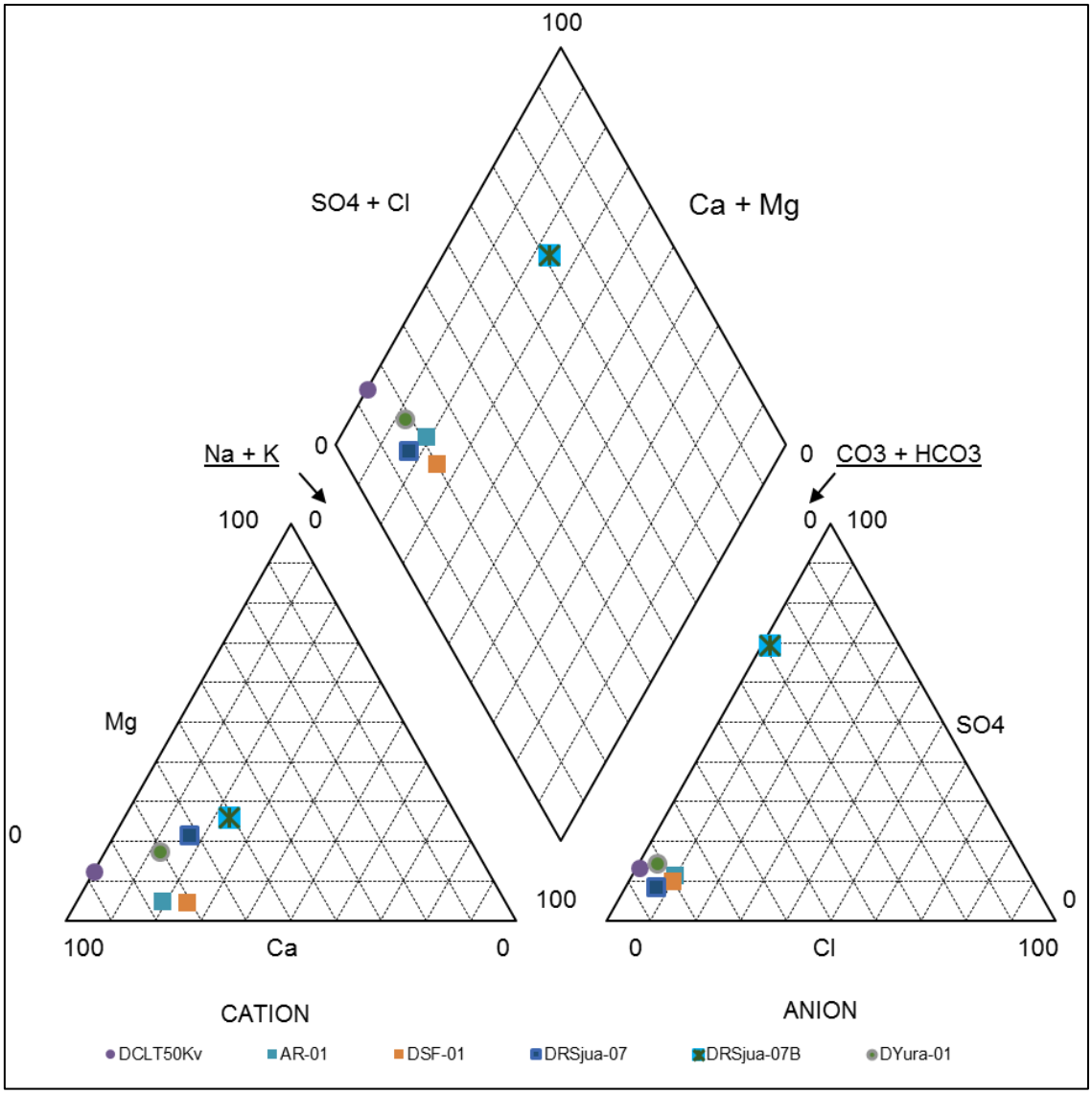


Figura 6.8. Diagrama de Piper que muestra la composición de iones mayoritarios en las muestras de agua residual y turbinada

Las aguas residuales y turbinadas se dividen en 2 facies, los puntos AR-01, DSF-01, DRSjua-07, Dyura-01 y DCLT50Kv tienen facies bicarbonatada cálcica, y solamente el punto DRSjua-07B presenta facies sulfatada cálcica-magnésica (Figura 6.8).

6.1.2.3 Análisis estadístico multivariado

Para la presentación de los resultados de agua residual y turbinada, primero se realizó un análisis multivariado, el cual consistió en el análisis de componentes principales y análisis de cluster.

En el análisis de componentes principales (ACP) para agua residual y turbinada se utilizaron los resultados de los 26 parámetros (potencial de hidrógeno, conductividad, oxígeno disuelto, sólidos totales suspendidos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, y arsénico, bario, bismuto, cadmio, calcio, cerio, cobre, estroncio, fósforo, hierro, magnesio, manganeso, molibdeno, plomo, potasio, sodio, uranio y zinc, como metales totales).

En la Tabla 6.5 se muestra los parámetros que se agruparon en 2 componentes principales (PC1 y PC2), los cuales explicaron el 81,107 % de la varianza total en el conjunto de datos. El PC1 presentó una fuerte correlación positiva (>0,8) con el manganeso, estroncio, sulfatos, cobre, cadmio, magnesio, conductividad, calcio, molibdeno, sodio, uranio, zinc, cloruros; moderada correlación positiva (>0,5 a 0,8) con el bario; y débilmente correlacionado negativamente (<0,5) con el oxígeno disuelto y potencial de hidrógeno. Mientras que, el PC2 presentó fuerte correlación con el potasio, cerio, fósforo, sólidos totales suspendidos, antimonio; y moderada correlación con el bismuto, bicarbonatos, plomo, arsénico y hierro, (para los cálculos estadísticos ver el Anexo 4.1).

Tabla 6.5. Cargas de los componentes principales para los parámetros (variables) del agua residual y turbinada

Parámetros (variables)	PC1	PC2
Manganeso Total	0,996	-0,055
Estroncio Total	0,995	0,019
Sulfatos	0,994	-0,080
Cobre Total	0,993	-0,090
Cadmio Total	0,990	-0,117
Magnesio Total	0,988	-0,017
Conductividad eléctrica	0,986	0,149
Calcio Total	0,978	0,140
Molibdeno Total	0,963	-0,170
Sodio Total	0,956	0,222
Uranio Total	0,942	-0,198
Zinc Total	0,831	-0,383
Cloruros	0,824	-0,463
Bario Total	0,636	0,430
Oxígeno disuelto	-0,342	-0,294
Potencial de hidrógeno	-0,284	0,034
Potasio Total	-0,092	0,966
Cerio Total	-0,212	0,909
Fósforo Total	-0,406	0,889
Sólidos totales en suspensión	-0,200	0,873
Antimonio Total	0,458	-0,841
Bismuto Total	-0,517	-0,794
Bicarbonatos	0,694	0,704
Plomo Total	-0,447	-0,674
Arsénico Total	-0,202	-0,607
Hierro Total	-0,119	0,533
Porcentaje de la varianza explicada (%)	53,890	27,217
Varianza % acumulado	53,890	81,107

Con los mismos parámetros usados para el ACP se realizó el análisis de cluster, donde a los 6 puntos de muestreo de agua residual y turbinada se les agrupó en 3 clúster (Figura 6.9).

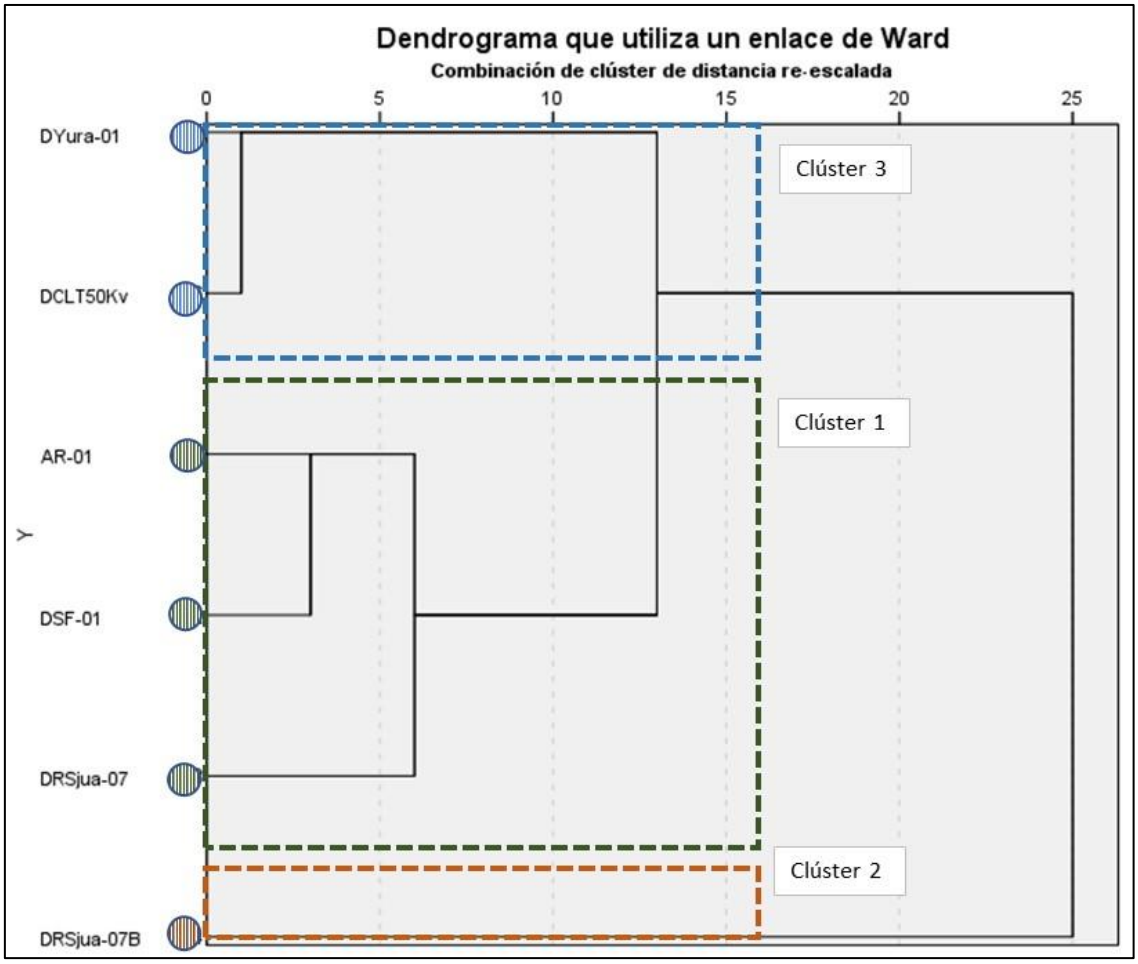


Figura 6.9. Dendrograma que muestra los grupos jerárquicos entre los puntos de muestreo de agua residual y turbinada (método «Ward»)

Los puntos de muestreo de agua residual doméstica (DRSjua-07, DSF-01 y AR-01) que conforman el clúster 1A, tienen como característica que, los parámetros que conforman el PC1 presentaron valores bajos y los parámetros que conforman el PC2 presentaron las mayores concentraciones; los puntos de muestreo de efluente y agua turbinada (DYura-01 y DCLT50Kv) que conforman el clúster 3A, tienen como característica que, los parámetros que conforman el PC1 y PC2 presentaron valores bajos. El punto de agua residual DRSjua-07B (clúster 2A), presentó por lo general las mayores concentraciones de los parámetros que conforman el PC1 (Figura 6.10).

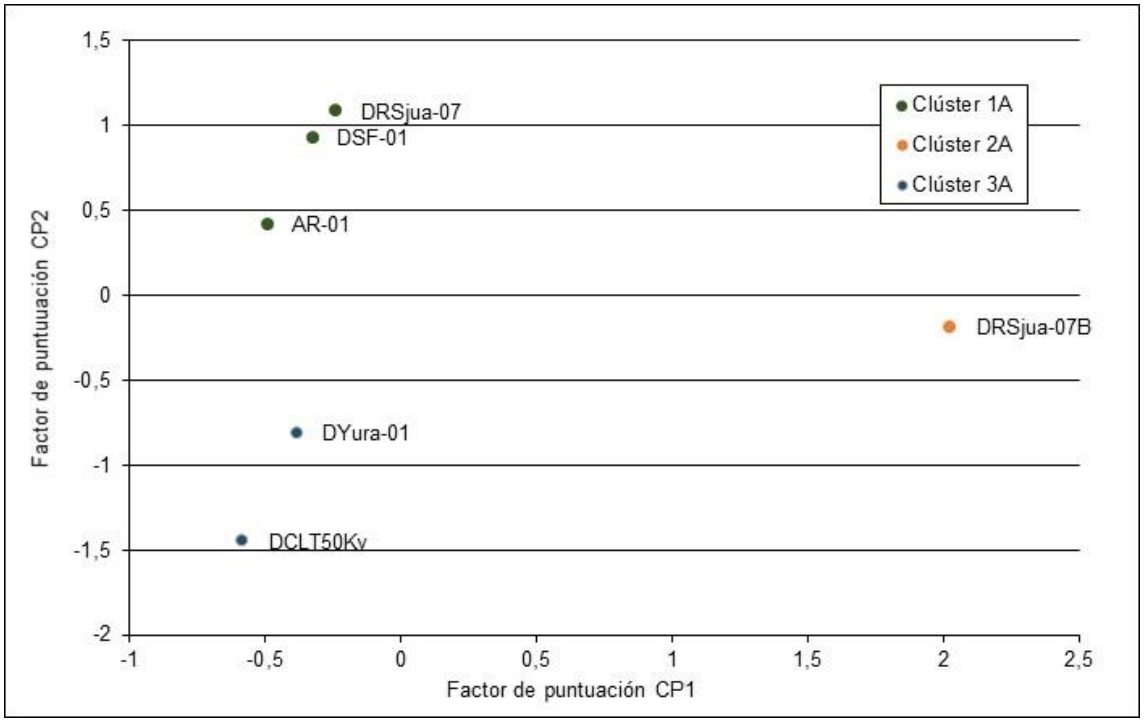


Figura 6.10. Puntuaciones de los componentes principales, con ubicación de los puntos de muestreo de agua residual y agua turbinada separados por clústers

En la Tabla 6.6, se muestra las medias de las concentraciones de los parámetros que conforman los PC1 y PC2, donde se aprecia que el clúster 2 presenta el mayor valor de medias de los parámetros (manganeso, cobre, magnesio, calcio) que conforman el PC1.

Tabla 6.6. Tabla de medias de los parámetros que componen los clústers y del total de puntos de agua residual y turbinada

Parámetros	Clúster 1A	Clúster 2A	Clúster 3A	Total
Potencial de hidrógeno	8,187	7,720	7,855	7,998
Conductividad eléctrica	429,333	1298	257,800	516,933
Oxígeno disuelto	4,367	2,810	4,630	4,195
Sólidos totales en suspensión	27,100	14,000	12,650	20,100
Bicarbonatos	216,667	279,000	126,000	196,833
Cloruros	0,073	0,450	0,205	0,180
Sulfatos	20,333	528,000	16,500	103,667
Antimonio Total	0,001	0,002	0,002	0,001
Arsénico Total	0,007	0,007	0,011	0,008
Bario Total	0,043	0,071	0,028	0,043
Bismuto Total	0,00011	0,00002	0,00048	0,00022
Cadmio Total	0,00005	0,00064	0,00008	0,00016
Calcio Total	60	157,000	39,000	69,167
Cerio Total	0,00010	0,00002	0,00001	0,00005
Cobre Total	0,00038	17,07000	0,00002	2,84519
Estroncio Total	0,126	0,700	0,073	0,204
Fósforo Total	2,460	0,064	0,273	1,332
Hierro Total	0,577	0,015	0,015	0,296

Parámetros	Clúster 1A	Clúster 2A	Clúster 3A	Total
Magnesio Total	5,820	47,400	4,800	12,410
Manganeso Total	0,130	3,229	0,074	0,628
Molibdeno Total	0,001	0,005	0,001	0,001
Plomo Total	0,002	0,002	0,005	0,003
Potasio Total	7,3	3,6	1,270	4,673
Sodio Total	21,667	82	4,203	25,901
Uranio Total	0,00019	0,00080	0,00024	0,00031
Zinc Total	0,016	0,098	0,046	0,040

6.2 Objetivo específico 2: Determinar la litogeoquímica de las zonas de emplazamiento de los PAM y de los depósitos cuaternarios fluviales, en las zonas de confluencia, de los principales afluentes con el río San Juanen el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el San Juan y delta Upamayo

6.2.1 Caracterización litogeoquímica y mineralógica

En el presente ítem se presentan los resultados de la caracterización litogeoquímica y mineralógica de los diferentes afloramientos rocosos y depósitos cuaternarios fluviales; sin embargo, de acuerdo a los criterios de análisis es necesario entender el contexto geológico en el que se encuentra el área de estudio, por lo que primero se ha de describir de manera regional la configuración geológica.

6.2.1.1 Geología regional

De acuerdo al análisis del informe técnico CSL-137800-0-CT-IT-01 de CESEL INGENIEROS proporcionado por el administrado y la información geológica a escala regional proporcionada por el INGEMMET de la Geología del Cuadrángulo de Cerro de Pasco Hoja 22-k, el área de estudio presenta la siguiente configuración geológica; hacia el basamento, las rocas más antiguas se componen de filitas negras y lutitas pizarrosas intercaladas con areniscas que corresponden al Devónico, rocas que presentan metamorfismo (Grupo Cabanillas o formación Excélsior).

Sobre el Devónico, yacen en discordancia erosional las rocas volcanosedimentarias del Pérmico superior-Triásico inferior (Grupo Mitu) que constan hacia la base de cluster de clastos subredondeados y areniscas rojas con algunas intercalaciones de lutitas, hacia el tope en los alrededores de Cerro de Pasco presenta secuencias volcánicas con ocurrencias de evaporitas.

Seguido sobreyacen secuencias sedimentarias de rocas calcáreas del Triásico-Jurásico (Grupo Pucará), que a su vez en algunos sectores sobreyacen directamente sobre el Devónico en discordancia erosional, estas rocas corresponden a calizas masivas, gris azulinas, nódulos de *chert* paralelos a la estratificación, intercalada con margas y areniscas calcáreas, seguido sobre estas se presentan capas delgadas bien estratificadas de calizas dolomíticas, rocas que afloran en los alrededores del delta Upamayo.

En el Cretácico inferior, se presenta una secuencia sedimentaria de areniscas de grano medio a grueso con intercalaciones esporádicas de lutitas grises y algunos horizontes de

carbón, hacia el medio presencia de cuarcitas con intercalaciones de lutitas y areniscas rojizas (Grupo Goyllarisquizga).

Hacia el Cretácico superior – Paleógeno Eocéno inferior (Formación Pocobamba - Casapalca), se encuentra una secuencia sedimentaria de lutitas y areniscas rojizas a la base, seguido de cluster con clastos subangulosos a subredondeados con presencia de lentes de calizas; los cluster a su vez están intercalados con areniscas rojas cuarzosas y niveles de calizas blanquesinas con presencia de *silex* y *chert* del medio hacia el tope. Sobre estos cluster en los alrededores de Cerro de Pasco, se hallan brechas sedimentarias y cluster con lentes de limolitas y areniscas. Esta secuencia de rocas en el algún sector se encuentra en discordancia angular sobre el Grupo Mitu y el Grupo Pucara.

En el Paleógeno Eoceno superior, se encuentra una secuencia volcanosedimentaria (Formación Calera), que hacia la base está compuesta de cluster intercalados con limos, lutitas y delgados niveles de tobas riolíticas cerca de la localidad de la calera, hacia la laguna Punrun los cluster presentan clastos de rocas volcánicas intercalados con areniscas de grano medio a grueso. Hacia el medio presenta niveles calcáreos con presencia de fósiles intercalados con arenas, margas y lutitas gris verdosas.

Sobreyaciendo al Eoceno, en la cercano al delta Upamayo se halla una secuencia de ignimbritas de color blanco (Formación Huayllay) en posición subhorizontal rellenando paleorelieves, que constan de tufos porfiríticos con presencia de vidrio, plagioclasas, cuarzos, biotitas, pómez y líticos.

Hacia el Cuaternario Plioceno-Pleistoceno se encuentra una secuencia de abanicos aluviales poco consolidados provenientes del oeste, los cuales constan de gravas y cluster de matriz arenosa y clastos subredondeados de calizas y rocas volcánicas (Formación Jeroc).

En el Cuaternario Holoceno, se presentan depósitos morrénicos producto de la última glaciación constituidos de bloques y gravas. Depósitos aluviales no consolidados producto de procesos fluviales y aluviales constituidos de gravas, arenas y limos. Depósitos lacustres, en las orillas de las lagunas compuestos por limos y materia orgánica intercalado con gravas.

Con respecto a las rocas intrusivas, dentro de la subcuenca del río San Juan, encontramos afloramientos de rocas hipoabisales de composición general andesítica-dacítica que corresponden a eventos Eocenos y Miocenos a la margen derecha e izquierda respectivamente, los cuales guardan relación con las zonas de explotación minera de Cerro de Pasco, Colquijirca y Quicay.

Dentro de los afloramientos de rocas intrusivas del Eoceno tenemos el complejo Volcánico Quicay el cual consta de lavas andesíticas con intercalaciones de brechas, flujos piroclásticos, domos de lavas y brechas hidrotermales, los cuales pueden ser favorables para la acumulación de Au-Ag. El *stock* de Racco, es un domo de andesita basáltica que resalta en el relieve de la pampa Bombón. El stock Huangoc que consta de cuarzo monzonita o cuarzo riodacitas con flujos de andesitas. El stock Cauguish que es un pórfido de andesita basáltica con cristales de plagioclasa y hornblenda, por sectores puede estar enriquecido con magnetita. Los otros cuerpos intrusivos pequeños alrededor de Quicay pueden corresponder a domos de dacita-andesita.

En cuanto a, los afloramientos de cuerpos intrusivos del Mioceno en la subcuenca del río San Juan tenemos el complejo volcánico de domos-diatrema Cerro de Pasco, que es el más grande de la región, de 2,5 km de diámetro y emplazado a lo largo de la falla Cerro de Pasco;

conformado por el aglomerado Rumillana, en la mitad oriental, de bloques angulosos y subangulosos de filitas, calizas, *chert* y rocas ígneas porfiríticas fuertemente alteradas envueltos en una matriz volcánica; tobas dacíticas y lapilli en el lado occidental; domos de dacita y riolita al suroeste y al norte finalmente la diatrema de Cerro de Pasco está cortada por diques de cuarzo-latita. El complejo volcánico Marcapunta es semejante al complejo de Cerro de Pasco, consiste en varios eventos de domos de lavas dacitas porfiríticas, diques de dacítas porfiríticas y pórfidos de feldespato que intruyen a los piroclastos y brechas de la diatrema volcánica.

Respecto a la geología estructural, las fallas en la zona de estudio tienen una orientación Norte-Sur, en general son estructuras originadas en el Paleozoico y han controlado la evolución geodinámica de las cuencas sedimentarias, el emplazamiento de magmatismo y la mineralización, entre estas destacan la falla Cerro de Pasco es una falla inversa de componente dextral, cuyo rumbo varia de Norte-Sur a N 120°; la falla San Juan que aflora entre Sacra Familia y Huaraucaca donde se muestra como falla inversa y la falla Huallay que fue el principal control estructural de mineralización donde a la altura de Quicay presenta, un rumbo de N 15° y más hacia el sur cambia a N 155°, el buzamiento de esta falla es de 70° hacia el este.

De acuerdo al mapa de franjas metalogenéticas del Ingemmet, de manera general el área de estudio se encuentra dentro de dos franjas metalogenéticas; la franja XVII de epitermales de Au/Ag del Eocéno y depósitos polimetálicos del Eoceno-Oligoceno-Mioceno, y la franja XXI-C de Depósitos polimetálicos de Pb-Zn-Cu con superposición epitermal de Au y Ag. De acuerdo a, esto es congruente, que se encuentren las operaciones mineras de Cerro de Pasco que es un yacimiento polimetálico con superposición epitermal con contenido de Ag, Au, Cu, Pb y Zn; Colquijirca distrito minero que es un yacimiento polimetálico con superposición epitermal con contenido de Ag, Au y Cu; Marcapunta que es un yacimiento epitermal indiferenciado con contenido de Au y Quicay que es un yacimiento epitermal de alta sulfuración con contenido de Ag y Au (Figura 6.11).

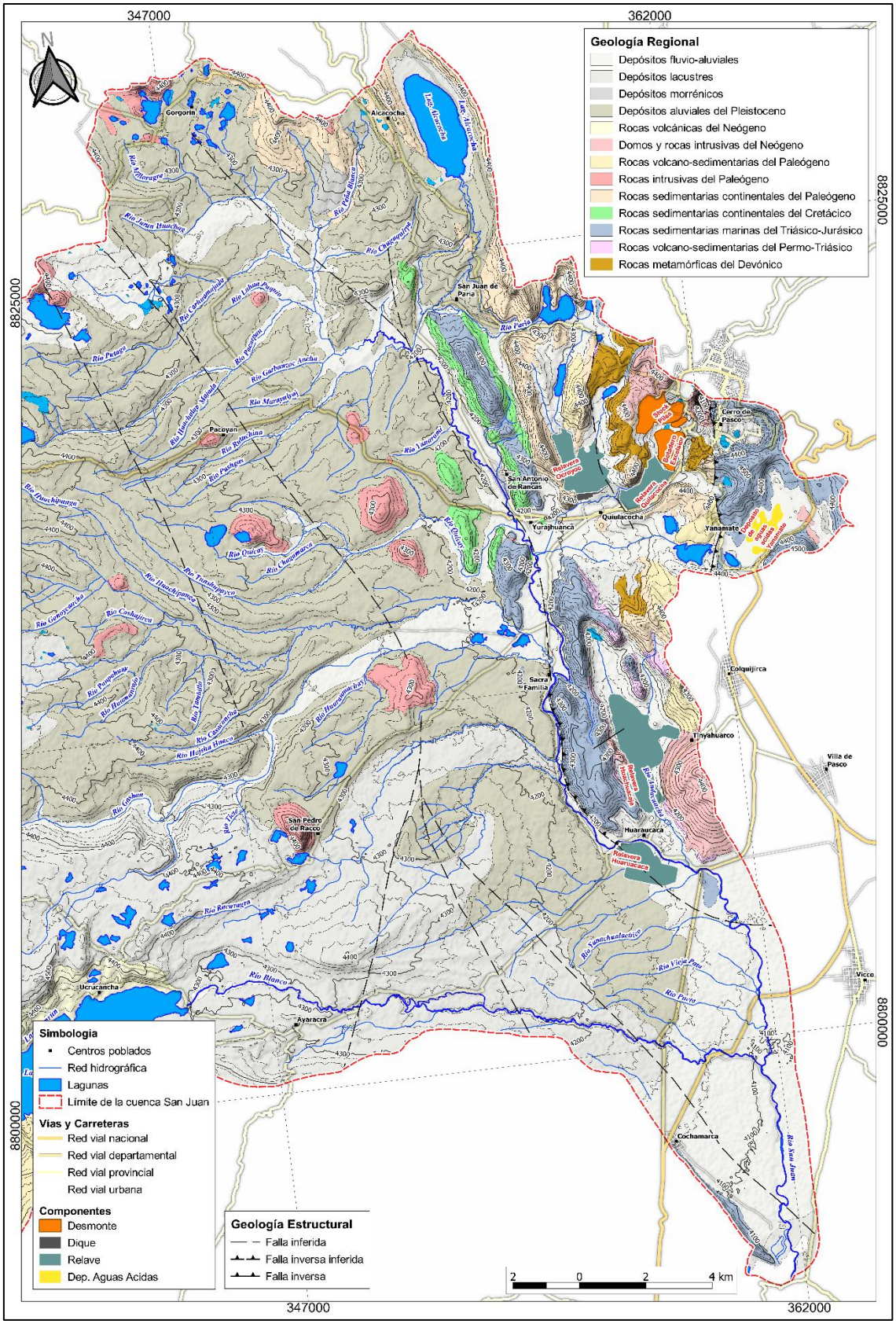


Figura 6.11. Configuración geológica a lo largo del río San Juan, consolidado a partir del cuadrángulo de Cerro de Pasco Hoja 22-k del Ingemmet

6.2.1.2 Afloramientos rocosos (basamento pre-Cuaternario)

Dentro del área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo se consideraron un total de 10 emplazamientos, cuyas descripciones de campo se detallan en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7. Descripciones de campo de los afloramientos rocosos en el área de influencia del área de estudio

N.°	Código	Descripción
1	CGR-SJ-09	Afloramiento de rocas carbonatadas (calizas) y areniscas con matriz calcárea, se encuentra fracturada, algunas fracturas se encuentran rellenadas con calcita, presenta lapiaces por erosión química del agua.
2	CGR-SJ-06	Afloramiento de roca volcánica, alterada, oxidada y con disyunción columnar y fracturamiento intenso. La roca se presenta leucocrata en muestra fresca, matriz afanítica, presencia de cristales de cuarzo, coloración rojiza en muestras alteradas y oxidadas.
3	CGR-SJ-01	Depósito aluvial, consta de gravas matriz soportado, matriz arenosa (media a gruesa) color gris oscuro, intercalado con capas de arenas (gruesa a media) limosas color marrón.
4	CGR-SJ-11	Afloramiento de areniscas cuarzosas con matriz calcárea, erosión superficial kárstica (lapiaces). Las areniscas presentan laminación paralela, son de color rosado en muestra fresca y color beige en roca expuesta.
5	CGR-SJ-12	Afloramiento de areniscas, presenta posible oxidación de minerales férricos. La matriz es calcárea y presenta restos de otras rocas.
6	CGR-SJ-13	Afloramiento de areniscas con matriz calcárea, erosión superficial kárstica (lapiaces). La roca se presenta de color gris en muestra fresca, presenta una pátina de color amarillo. Contiene fósiles.
7	CGR-SJ-15	Afloramiento de areniscas cuarzosas con presencia de óxidos.
8	CGR-SJ-17	Afloramiento de arenisca cuarzosa de grano medio a fino con cemento calcáreo, intercalado con delgados niveles de lutitas rojas, presenta laminación paralela.
9	CGR-SJ-18	Afloramiento de rocas calcáreas, muestran lapiaces y rasgos kársticos poco pronunciados, además de laminación paralela y ondulada en niveles de areniscas de grano fino con cemento calcáreo.
10	CGR-SJ-19	Afloramiento de rocas calcáreas intercalada con areniscas de grano fino con cemento calcáreo, muestran lapiaces y paisaje kárstico, de color beige y patina de color amarillo mate.

En la Figura 6.12 se presenta los resultados de concentraciones de metales totales en roca (CGR-01, CGR-09, CGR-11, CGR-12, CGR-13, CGR-15, CGR-17, CGR-18 Y CGR-19), donde se observa en general concentraciones de metales inferiores a la media de la corteza terrestre, conforme a Rudnick (2014); a excepción de las concentraciones de Ag, Cd, Se, As, Pb, Ba, Mg y Ca que muestran valores por encima de la concentración media de la corteza.

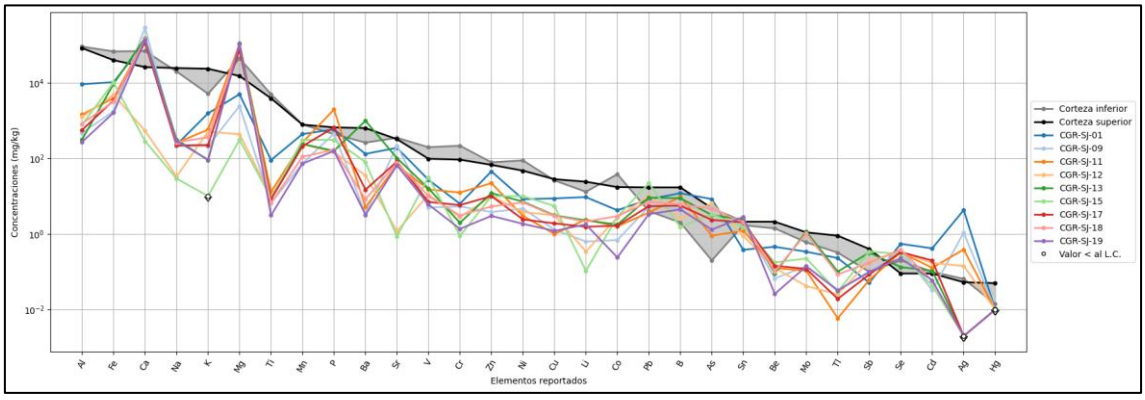


Figura 6.12. Concentraciones de metales totales en muestras de roca, en comparación con el rango de concentraciones de la corteza, según Rudnick (2014)

En cuanto a la generación de acidez de las muestras de roca, mediante la prueba estática de balance ácido-base (ABA), conforme al criterio 1[51] indica que las muestras CGR-SJ-09 y CGR- SJ-13 son no generadoras de ácido, mientras que la muestra CGR-12 se encuentra en la zona de incertidumbre; de acuerdo al criterio 2[52] se observa que las 3 muestras (CGR-SJ-09, CGR- SJ-12 y CGR- SJ-13) son no generadoras de ácido, tal y como se muestra en la Figura 6.13.

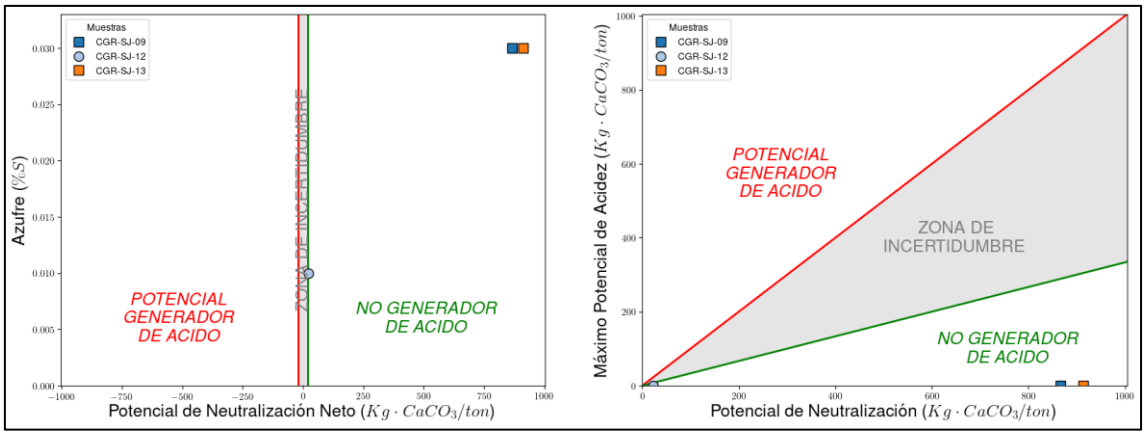


Figura 6.13. Prueba ABA de muestras de roca (CGR-SJ-09, CGR-SJ-12 y CGR-SJ-13) analizadas con a) criterio 1 y b) criterio 2

Según los resultados de análisis mineralógico por microscopia óptica, de manera general se tiene que, los afloramientos rocosos CGR-SJ-09, CGR-SJ-13, CGR-SJ-17, CGR-SJ-18 y CGR-SJ-19 son rocas calizas con presencia de cuarzo, carbonatos, goethita, óxidos de hierro, pirita, pirrotita y rutilo; las muestras CGR-SJ-12 y CGR-SJ-15 corresponden a arenisca con presencia de líticos y cuarzoarenisca respectivamente, las cuales contienen cuarzo, arcillas, clorita, goethita, hematita, muscovita, óxidos de hierro, pirita y rutilo; en cuanto a la muestra CGR-SJ-06 corresponde a una roca porfirítica alterada por cuarzo y alunita con presencia de alunita, arcillas, cuarzo secundario, goethita, óxidos de hierro, pirita y rutilo, tal y como se detalla en la Tabla 6.8 y se muestra en la Figura 6.14.

Tabla 6.8. Resultado de análisis mineralógico por microscopia óptica que detalla las alteraciones presentes y la clasificación de las muestras de roca

Código Muestra	CGR-SJ-06	CGR-SJ-09	CGR-SJ-12	CGR-SJ-13	CGR-SJ-15	CGR-SJ-17	CGR-SJ-18	CGR-SJ-19
Alteraciones								
Silicificación	Cuarzo II (Intensa)	-	-	Sílice y cuarzo II (Débil)	-	Sílice (Débil)	-	-
Alunitización	Alunita (Moderada)	-	-	-	-	-	-	-
Carbonatación	-	Carbonatos IV (Moderada)	-	Carbonatos IV (Débil)	-	Carbonatos IV (Muy débil)	Carbonatos IV (Débil)	-
Argilización	Arcillas (Débil)	-	Arcillas (Débil)	Arcillas (Muy débil)	Arcillas (Muy débil)	Arcillas (Incipiente)	Arcillas (Muy débil)	Arcillas (Débil)

[51] **Criterio 1:** Para un potencial neto de neutralización: < a 0, la muestra es «generadora neta de ácido» [entre -20 y +20 kg CaCO3/Ton] la muestra corresponde a un rango de «incertidumbre»; > a +20 kg CaCO3/Ton, se considera a la muestra es «potencial no generador de ácido» < a -20 kg CaCO3/Ton se considera «potencial generador de ácido».

[52] **Criterio 2:** Ratio potencial de neto (RNP), para un PN/PA < 1:1 es probable que se genere acidez, mientras que para el rango de PN/PA entre 1:1 y 3:1 corresponde a una zona de «incertidumbre». Cuando el PN/PA >3:1, la muestra es «potencial no generador de acidez».

Código Muestra	CGR-SJ-06	CGR-SJ-09	CGR-SJ-12	CGR-SJ-13	CGR-SJ-15	CGR-SJ-17	CGR-SJ-18	CGR-SJ-19
Alteraciones								
Oxidación	Goethita y óxidos de hierro (Débil)	Óxidos de hierro y goethita (Débil)	Óxidos de hierro y goethita (Débil)	Óxidos de hierro y goethita (Incipiente)	Óxidos de hierro y goethita (Débil)	Óxidos de hierro y goethita (Muy débil)	Goethita (Incipiente)	Goethita y óxidos de hierro (Muy débil)
Cloritización	-	-	Cloritas (Incipiente)	-	Cloritas (Incipiente)	-	-	-
Probable secuencia paragenética	Rutilo, Pirita, Goethita	Pirita I, Rutilo, Pirita II, Goethita	Rutilo, Magnetita, Pirita, Hematita, Goethita	Rutilo, Pirita, Pirrotita, Goethita	Pirita, Hematita, Goethita	Rutilo, Goethita	Rutilo, Pirita, Marcasita, Goethita	Pirita, Goethita
Textura	Porfirítica	Microesparítica, matriz soportada	Clástica	Microesparítica, matriz soportada	Clástica	Micrítica, matriz soportada	Micrítica, matriz soportada	Microesparítica, grano-soportada
Clasificación de la roca	Roca porfirítica alterada por cuarzo y alunita	Caliza microesparítica	Arenisca con presencia de líticos	Caliza Microesparítica	Cuarzoarenisca	Caliza Micrítica	Caliza Micrítica	Caliza oolítica

(-): No aplica

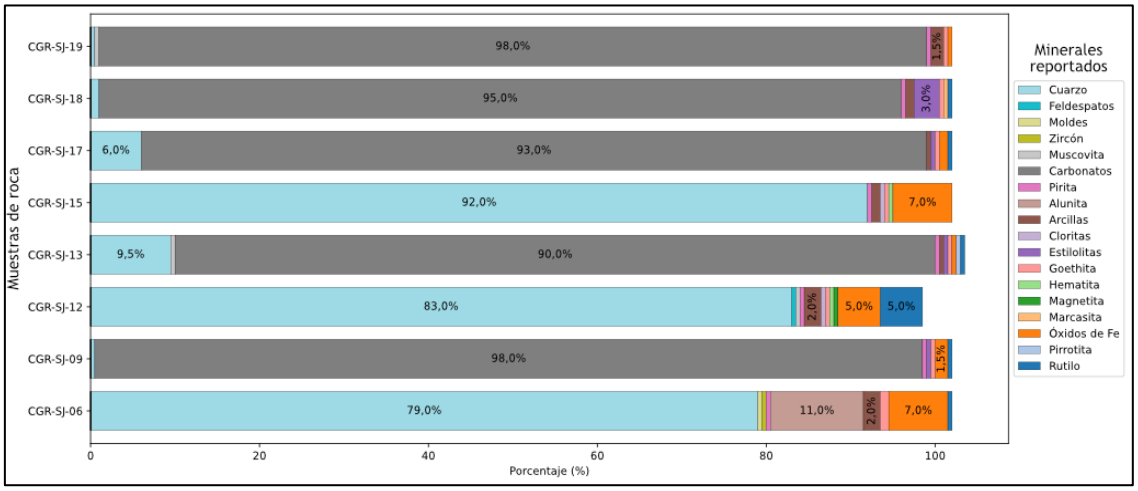


Figura 6.14. Resultado de análisis mineralógico por microscopia óptica, que muestra la distribución de los minerales reportados en muestras de roca

6.2.1.3 Depósitos cuaternarios (sedimentos de quebrada)

Dentro del área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo se consideraron un total de 43 puntos de muestreo en depósitos cuaternarios a lo largo del río San Juan y sus tributarios, cuyas descripciones de campo se detallan en la Tabla 6.9

Tabla 6.9. Descripciones de campo de los depósitos cuaternarios

N.°	Código	Descripción
Depósitos cuaternarios fluviales		
1	CGS-SJ-01	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, alto contenido de limos y arcillas, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita), areniscas y calizas negras. Muestra compuesta del cono aluvial.
2	CGS-SJ-02	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena media a gruesa, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita porfirítica), areniscas (areniscas cuarzosas y arcosas), chert y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.

N.°	Código	Descripción
3	CGS-SJ-03	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas, areniscas, chert y calizas. Muestra compuesta del centro del canal, descubierto debido a la temporada de estiaje.
4	CGS-SJ-04	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas, areniscas y calizas. Las arenas se muestras de color gris amarillento. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
5	CGS-SJ-05	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita porfirítica), areniscas (areniscas cuarzosas y arcosas), chert y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
6	CGS-SJ-07	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita), areniscas cuarzosas y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
7	CGS-SJ-06	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita porfirítica), areniscas (areniscas cuarzosas y arcosas), chert y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
8	CGS-SJ-08	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita), areniscas y calizas. Las arenas presentan coloración marrón amarillenta. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
9	CGS-SJ-10	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla abundante, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita porfirítica), areniscas (areniscas cuarzosas y arcosas), y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
10	CGS-SJ-09	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita porfirítica), areniscas (areniscas cuarzosas y arcosas), chert y calizas, ser observa además que el nivel más reciente se encuentra concrecionado con posibles oxidos de hierro (color rojo intenso). Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
11	CGS-SJ-15	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible dacita), areniscas arcosas, chert y calizas con venillas de calcitas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
12	CGS-SJ-17	Depósito fluvial, gravilla con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla. Muestra compuesta del centro del canal. Canal invadido por vegetación.
13	CGS-SJ-16	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible basalto), areniscas y calizas con fracturas rellenas de calcita. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
14	CGS-SJ-11	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible basalto), areniscas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
15	CGS-SJ-12	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita porfirítica), areniscas (areniscas cuarzosas y arcosas) y calizas, todos presentan una pátina amarilla rojiza Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
16	CGS-SJ-14	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas, areniscas y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
17	CGS-SJ-13	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas, areniscas cuarzosas y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
18	CGS-SJ-18	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas, areniscas y calizas, las arenas presentan coloración amarillo rojiza debido a óxidos. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
19	CGS-SJ-19	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas, areniscas y calizas. Las arenas presentan color rojo amarillento. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
20	CGS-SJ-21	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos cuarcitas, areniscas y calizas. Arcillas de color beige y arenas de color gris Muestra compuesta al centro del canal.
21	CGS-SJ-22	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita porfirítica), areniscas (areniscas cuarzosas y arcosas), chert y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
22	CGS-SJ-20	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posibles basaltos), areniscas y calizas. Presencia de nódulos de hierro. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal

N.°	Código	Descripción
23	CGS-SJ-23	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas, areniscas y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal
24	CGS-SJ-25	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita porfirítica con máficos cloritizados), areniscas (areniscas cuarzosas y arcosas), chert y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
25	CGS-SJ-26	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas, areniscas y calizas con contenido de fósiles. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
26	CGS-SJ-27	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita porfirítica), areniscas (areniscas cuarzosas y arcosas), chert y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal
27	CGS-SJ-28	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita), areniscas y calizas con contenido de fósiles. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
28	CGS-SJ-29	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas, areniscas y calizas. Las arenas presentan color rojo amarillento. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
29	CGS-SJ-30	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita porfirítica), areniscas (areniscas cuarzosas y arcosas), chert y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
30	CGS-SJ-31	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita), areniscas (areniscas con cemento calcáreo) y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
31	CGS-SJ-32	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas, areniscas y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
32	CGS-SJ-38	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita fuertemente meteorizada), areniscas cuarzosas y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
33	CGS-SJ-37	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita), areniscas y calizas con contenido de fósiles. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
34	CGS-SJ-35	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos angulosos a sub angulosos de rocas volcánicas, areniscas (areniscas cuarzosas) y calizas con contenido de fósiles. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
35	CGS-SJ-36	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos angulosos de areniscas (areniscas cuarzosas y arcosas) y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
36	CGS-SJ-33	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos angulosos de rocas volcánicas (posible andesita porfirítica), areniscas (areniscas cuarzosas y arcosas) y calizas. Muestra compuesta de la barra lateral hacia el centro del canal.
37	CGS-SJ-34	Depósito fluvial, gravas con matriz de arena gruesa a media, limo y arcilla, se distinguen clastos de rocas volcánicas (posible andesita porfirítica) y areniscas. Muestra compuesta del centro del canal, canal que ha sido invadido por vegetación
Depósitos cuaternarios fluvio-aluviales		
1	Ragra1	Consta de arenas finas limosas amarillentas intercaladas con precipitaciones de evaporitas, arenas finas a medias de color marrón rojizo, gravas amarillentas con matriz de arena gruesa a media, limosas y arenas gruesas a gravas color marrón oscuro. Muestra compuesta de los depósitos de la llanura inundable, corresponde a los 30 cm más superficiales donde observo presencia de residuos mineros.
2	Ragra2	Consta de arenas grises finas a medias, arenas medias intercaladas con evaporitas, arenas amarillas finas limosas intercaladas con arcillas rojas y niveles endurecidos de arenas pardas gruesas, arenas de color marrón rojizo gruesas y gravas de matriz roja de arenas y limos. Muestra compuesta de los depósitos de la llanura inundable, corresponde a los 30 cm más superficiales donde observo presencia de residuos mineros.
3	Ragra3	Consta de arenas amarillentas medias a finas limosas y gravas matrices soportado, matriz de arenas grises medias a finas limosas. Muestra compuesta de los depósitos de la llanura inundable, corresponde a los 30 cm más superficiales donde observo presencia de residuos mineros.

N.°	Código	Descripción
4	Ragra4	Consta de arenas amarillentas medias a finas limosas. Muestra compuesta de los depósitos de la llanura inundable, corresponde a los 30 cm más superficiales donde observo presencia de residuos mineros.
5	Ragra5	Consta de limos arenosos amarillos, evaporitas, arenas grises rojizas medias a finas y arenas medias color marrón a gris oscuro. Muestra compuesta de los depósitos de la llanura inundable, corresponde a los 30 cm más superficiales donde observo presencia de residuos mineros.
6	Ragra6	Consta de arenas grises muy finas y limosas, arenas amarillentas medias a gruesas intercaladas con arcillas rojas, arcillas arenosas de color gris plomo, limos arenosos gris oscuros y arcillas anaranjadas. Evaporitas intercaladas en todos los niveles. Muestra compuesta de los depósitos de la llanura inundable, corresponde a los 30 cm más superficiales donde observo presencia de residuos mineros.

En la Figura 6.15a se presenta los resultados de concentraciones de metales totales en roca a lo largo del río San Juan (CGS-SJ-01, CGS-SJ-02, CGS-SJ-04, CGS-SJ-05, CGS-SJ-06, CGS-SJ-08, CGS-SJ-09, CGS-SJ-11, CGS-SJ-12, CGS-SJ-15, CGS-SJ-16, CGS-SJ-18, CGS-SJ-19, CGS-SJ-20, CGS-SJ-23, CGS-SJ-26, CGS-SJ-27, CGS-SJ-28, CGS-SJ-30, CGS-SJ-31, CGS-SJ-33, CGS-SJ-35, CGS-SJ-36, CGS-SJ-38), donde se observa en general concentraciones de metales inferiores a la media de la corteza terrestre, conforme a Rudnick (2014); a excepción de las concentraciones de Hg, Ag, Cd, Se, Sb, Tl, Mo, Se, As, Pb, Cu, Zn, P, Mn y Ca que muestran valores por encima de la concentración media de la corteza.

Además, en la Figura 6.15b se presenta los resultados de concentraciones de metales totales en roca en las confluencias de los tributarios al río San Juan (CGS-SJ-03,CGS-SJ-07,CGS-SJ-10, CGS-SJ-13, CGS-SJ-14, CGS-SJ-17, CGS-SJ-21, CGS-SJ-22, CGS-SJ-25, CGS-SJ-29, CGS-SJ-32, CGS-SJ-34, CGS-SJ-37), donde se observa en general concentraciones de metales inferiores a la media de la corteza terrestre, de acuerdo a Rudnick (2014); a excepción de las concentraciones de Hg, Ag, Cd, Se, Sb, Se, As, Pb, Cu, Zn, P, Mn, y Fe en algunas muestras, que presentan valores por encima de la concentración media de la corteza.

Asimismo, en la Figura 6.15c se presenta los resultados de concentraciones de metales totales en roca a lo largo del río Ragra entre el pasivo ambiental minero relavera de Quiulacocha y la relavera Ocroyoc (Ragra1, Ragra2, Ragra3, Ragra4, Ragra5 y Ragra6) donde se observa en general concentraciones de metales inferiores a la media de la corteza terrestre, según Rudnick (2014); a excepción de las concentraciones de Hg, Ag, Cd, Se, Sb, Tl, Mo, Sn, As, Pb, Cu, Zn, Mn y Fe que presentan valores por encima de la concentración media de la corteza.

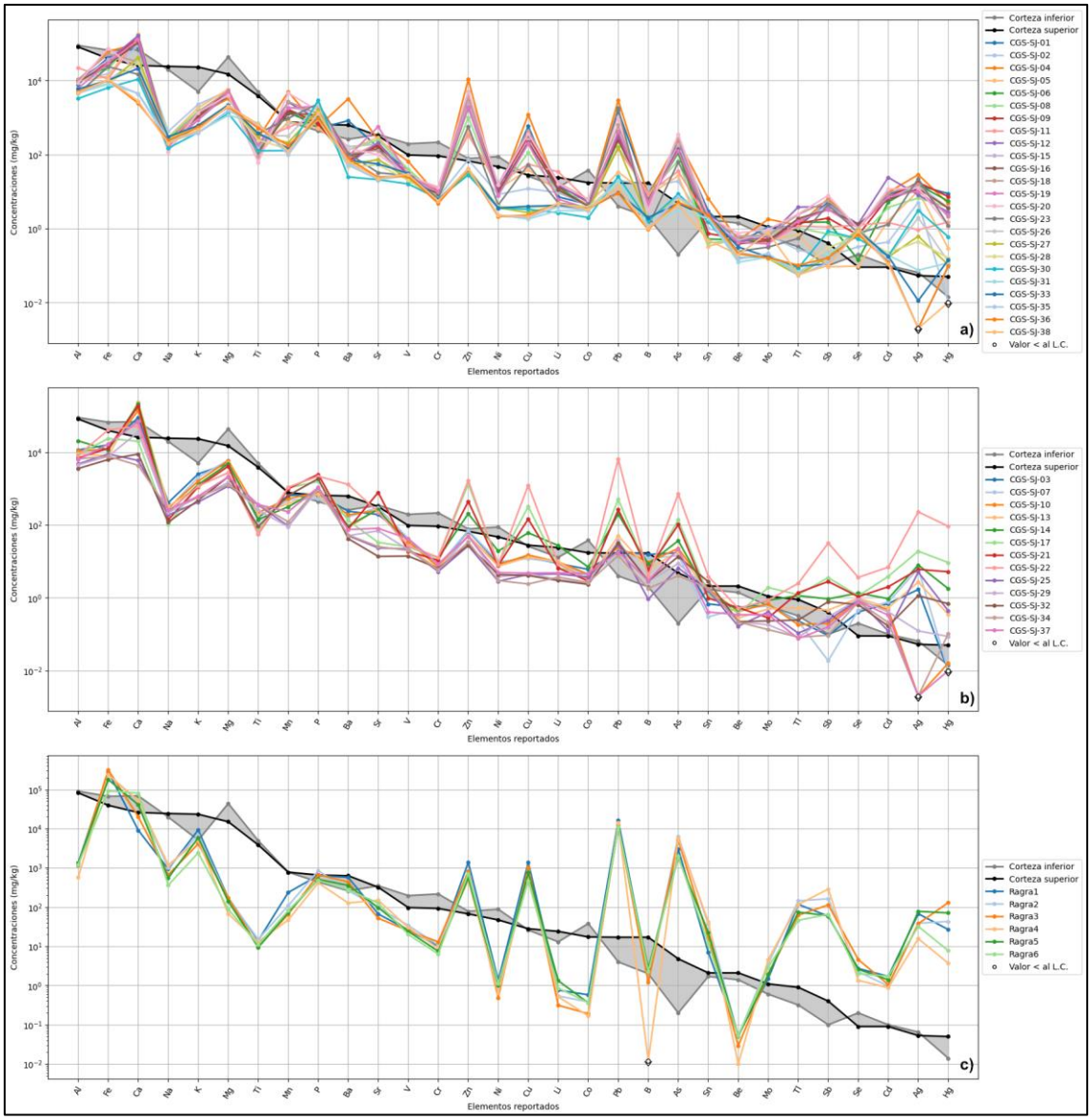


Figura 6.15. Concentraciones de metales totales en muestras de roca a) a lo largo del río San Juan, b) tributarios al río San Juan, y en muestras de c) sedimentos fluvio-aluviales del río Ragra mezclados con residuos mineros, en comparación con el rango de concentraciones de la corteza según Rudnick (2014)

En cuanto a la generación de acidez de las muestras de roca, mediante la prueba estática de balance ácido-base (ABA), de acuerdo al criterio 1[53] indica que las muestras Ragra1, Ragra2, Ragra3, Ragra4 y Ragra5 se encuentran en la zona de incertidumbre, mientras que la muestra Ragra6 se encuentra como generador de ácido; según el criterio 2[54] se observa que las 6 muestras (Ragra1, Ragra2, Ragra3, Ragra4, Ragra5 y Ragra6) son generadoras de ácido, tal y como se muestra en la Figura 6.16.

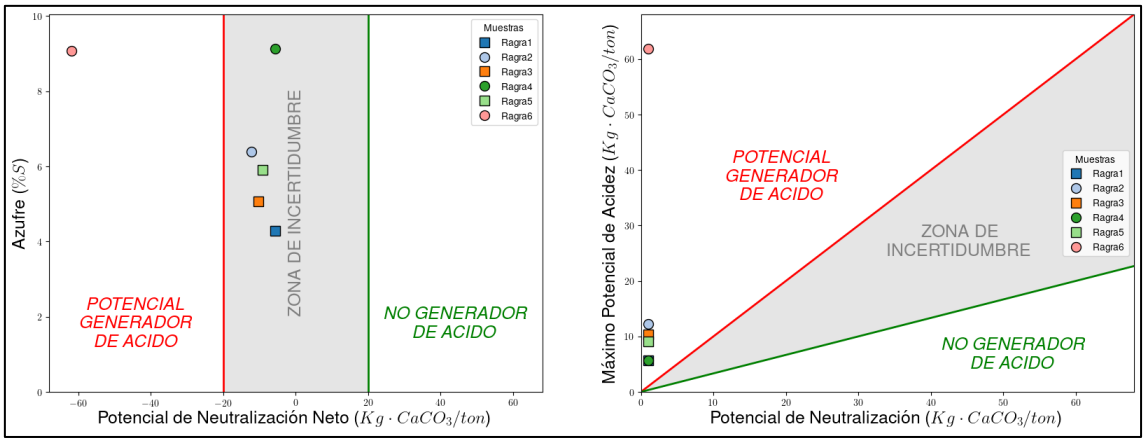


Figura 6.16. Prueba ABA de muestras de roca (Ragra1, Ragra2, Ragra3, Ragra4, Ragra5 y Ragra6) analizadas con el a) criterio 1 y b) criterio 2

De acuerdo a los resultados del análisis mineralógico por difracción de rayos X, de manera general se observa que el río San Juan presenta 2 contextos, uno dominado por la calcita y otro dominado por los silicatos (cuarzo, feldespato y plagioclasa), resultados que se encuentran acorde a la configuración geológica a lo largo del río San Juan. En cuanto al río Ragra, se observa que está dominado por sulfuros y sulfatos de hierro y evaporitas, tal y como se muestra en la Figura 6.17; además, se observa la ocurrencia de óxidos de hierro a partir del río Ragra aguas abajo, en este caso hematitas que son minerales que precipitan en ambientes ácidos.

53 **Criterio 1:** Para un potencial neto de neutralización: < a 0, la muestra es «generadora neta de ácido» [entre -20 y +20 kg CaCO3/Ton] la muestra corresponde a un rango de «incertidumbre»; > a +20 kg CaCO3/Ton, se considera a la muestra es «potencial no generador de ácido» < a -20 kg CaCO3/Ton se considera «potencial generador de ácido»

54 **Criterio 2:** Ratio potencial de neto (RNP), para un PN/PA < 1:1 es probable que se genere acidez, mientras que para el rango de PN/PA entre 1:1 y 3:1 corresponde a una zona de «incertidumbre». Cuando el PN/PA >3:1, la muestra es «potencial no generador de acidez».

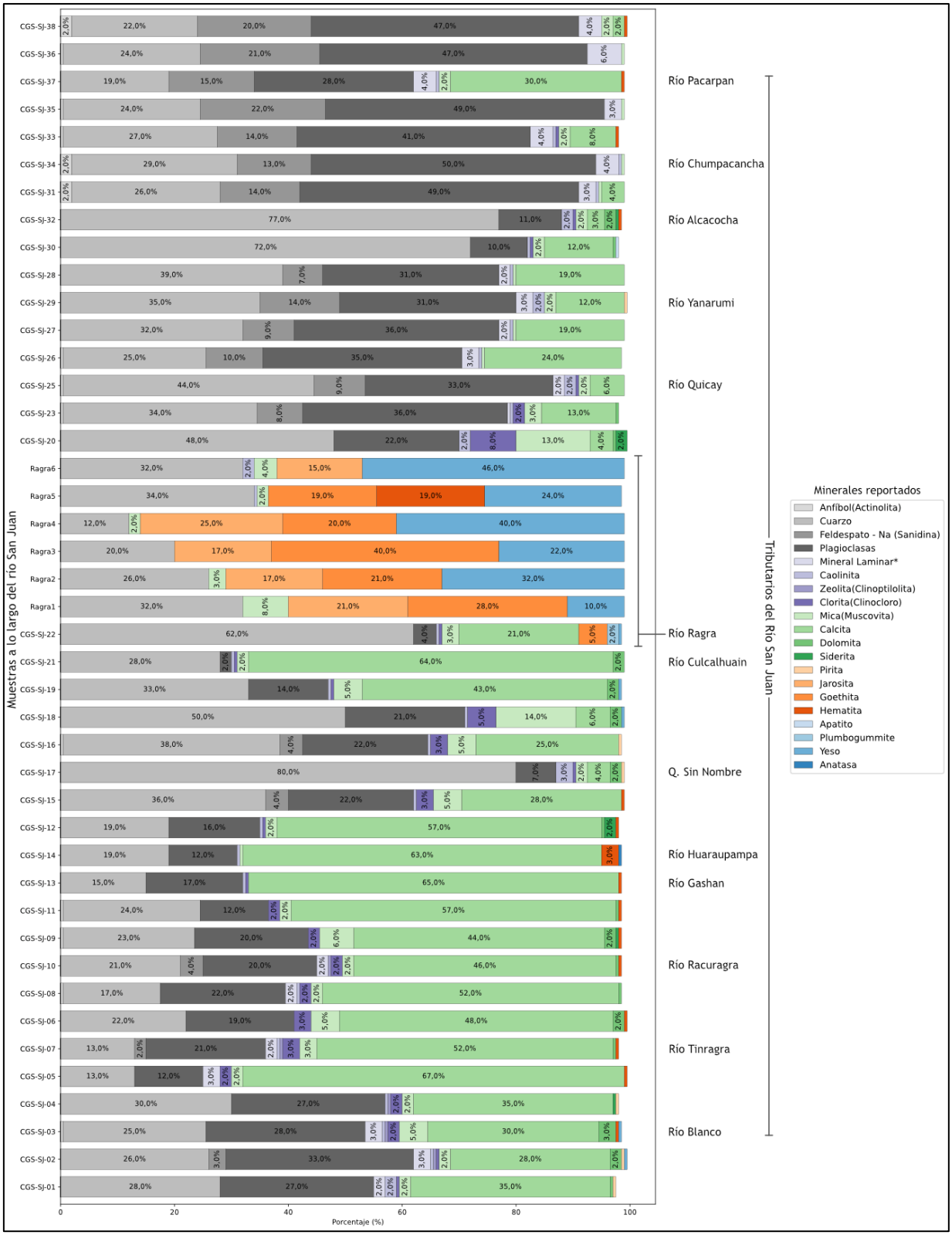


Figura 6.17. Minerales reportados en el análisis mineralógico por difracción de rayos X en muestras de roca (sedimentos fluviales y fluvio-aluviales de los ríos San Juan y Ragra respectivamente)

Por otro lado, se tiene los resultados del análisis mineralógico por microscopia electrónica de barrido, que se muestran en la Tabla 6.10, donde se observa una mayor ocurrencia de

minerales con contenido de Fe, S, Pb, Zn, Ti, Ba, Cu, Sn y entre otros; tal y como se muestra en la Figura 6.18.

Tabla 6.10. Resultados del análisis de microscopia electrónica de barrido en muestras de roca

Muestra	Presencia de Minerales
CGS-SJ-01	Pirita
	Goethita
	Goethita con presencia de Mn
	Esfalerita
	Óxidos de Fe-Sb
	Óxidos de Fe-Ti
	Magnetita con presencia de Ti
	Fosfato de Pb
	Enargita
	Baritina
	Óxidos de Bi
	Cerusita
	Aleación de Fe-Ni
	Galena
CGS-SJ-02	Pirita
	Goethita
	Ilmenita
	Ilmenita con presencia de Mn
	Hematita
	Hematita con presencia de Ti
	Magnetita
	Magnetita con presencia de Ti
	Espinela con presencia de Fe-Ti
	Óxidos de Fe-Ti
	Baritina
	Aleación de Fe-Cr
CGS-SJ-03	Pirita
	Hematita
	Hematita con presencia de Ti
	Ilmenita
	Ilmentita con presencia de Mn
	Magnetita con presencia de Ti
	Magnetita con presencia de Mn-Ti
	Zircon
	Rutilo
	Arsenopirita
	Esfalerita
	Fosfato de Ce-La
	Baritina
	Sulfosal de PB-Sb
CGS-SJ-04	Pirita
	Hematita
	Hematita con presencia de Ti
	Goethita
	Esfalerita
	Galena
	Zircon
	Baritina
	Óxidos de Sb-Fe-Bi
	Óxidos de Pb-Fe
	Fosfato de Pb
	Cerusita
CGS-SJ-05	Pirita
	Hematita
	Hematita con presencia de Ti
	Goethita
	Esfalerita
	Fe
	Magnetita
	Magnetita con presencia de Ti
	Ilmenita
	Ilmenita con presencia de Mn
	Pirrotita
	Casiterita
	Calcopirita
	Baritina
	Titanita
	Aleación de Fe-Cr
	Óxidos de Fe-Sb
CGS-SJ-06	Goethita
	Hematita
	Magnetita
	Ilmenita
	Pirita
	Pirrotita
	Calcopirita
	Fosfato de Pb
	Galena

Muestra	Presencia de Minerales
	Esfalerita
	Óxidos de Bi-Sb-Fe
	Aleación de Fe-Cr
	Casiterita
	Baritina
CGS-SJ-07	Pirita
	Hematita
	Goethita
	Aleación de Fe-Cr
CGS-SJ-09	Aleación de Fe-Cr
	Goethita
	Ilmenita
	Esfalerita
	Pirita
	Pirrotita
	Óxidos de Fe-Zn-Cu-Mn
	Bismuto nativo
	Baritina
CGS-SJ-11	Aleación de Fe-Cr
	Goethita
	Ilmenita
	Esfalerita
	Pirita
	Pirrotita
	Óxidos de Fe-Zn-Cu-Mn
	Bismuto nativo
	Baritina
CGS-SJ-12	Goethita
	Esfalerita
	Hematita
	Óxidos de Fe-Zn-Cu
	Calcocita
	Galena
	Pirrotita
	Magnetita
	Pirita
	Covelita
	Delafossita
	Baritina
	Rutilo
	Aleación de Fe-Cr
	Aleación de Fe-Cr-Ni
	Fosfato de Pb-As
	Stromeyerita
CGS-SJ-15	Pirita
	Pirrotita
	Ilmeniía
	Magnetita
	Hemaíita
	Goethita
	Aleación de Fe-Cr
	Aleación de Fe-Cr-Ni
	Esfalerita
	Fosfato de Pb
	Baritina
	Covelita
CGS-SJ-16	Pirita
	Rutilo
	Baritina
	Fosfato de Pb
	Magnetita
	Hematita
	Goethita
	Galena
	Ilmenita
	Aleación de Fe-Cr
	Tennantita
	Esfalerita
	Pirrotita
	Óxido de Pb-As
	Arsenopirita
CGS-SJ-17	Hematita
	Magnetita
	Esfalerita
	Rutilo
	Pirita
	Goethita
	Baritina
	Ilmenita
	Fosfato de Pb
	Alabandita
	Calcopirita
	Galena
	Sulfatos de Hg-Pb-Cu-Fe

Muestra	Presencia de Minerales
	Casiterita
	Rabdophana con presencia de Ce
CGS-SJ-18	Pirita
	Aleación de Fe-Cr
	Aleación de Fe-Cr-Ni
	Goethita
	Ilmenita
	Rutilo
	Calcopirita
	Baritina
	Esfalerita
	Rabdophana con presencia de Ce
	Arsenopirita
CGS-SJ-19	Pirita
	Hematita
	Goethita
	Goethita con presencia de Mn
	Aleación de Fe-Cr
	Aleación de Fe-Cr-Ni-Cu
	Esfalerita
	Magnetita
	Pirrotita
	Apatito
	Ilmenita
	Fosfato de Pb
	Rabdophana con presencia de Ce
	Galena
	Baritina
CGS-SJ-20	Goethita
	Pirita
	Esfalerita
	Ilmenita
	Rabdophana con presencia de Ce-La
	Hematita
	Aleación de Fe-Cr
	Aleación de Fe-Cr-Ni-Cu
	Pirrotita
	Rutilo
	Calcopirita
	Baritina
CGS-SJ-21	Pirrotita
	Esfalerita
	Goethita
	Casiterita
	Calcopirita
	Pirita
	Aleación de Fe-Cr
	Rutilo
	Aleación de Fe-Cr-Ni
	Zircón
CGS-SJ-22	Pirita
	Rutilo
	Fosfato de Pb
	Cinabrio
	Goethita
	Hematita
	Casiterita
	Ilmenita
	Fosfato de Pb
	Óxidos de Sb-Bi-Fe
	Fosfato de Pb-As
	Baritina
CGS-SJ-23	Ilmenita
	Pirita
	Esfalerita
	Zircon
	Goethita
	Magnetita
	Fosfato de Pb
	Óxidos de Fe-Bi-Sb
	Aleación de Fe-Cr
Ragra1	Rutilo
	Magnetita
	Goethita
	Óxidos de Fe-Sb-As
	Óxidos de Pb-Fe-As
	Fosfato de Pb
	Pirita
	Baritina
	Casiterita
	Esfalerita
Ragra4	Hematita
	Calcopirita
	Goethita

Muestra	Presencia de Minerales
	Baritina
	Pirita
	Ilmenita
	Esfalerita
	Óxidos de Fe-Pb-Sb
	Óxidos de Pb-Fe-As
	Óxidos de Sb-Fe-Pb
	Zircón
	Casiterita
	Óxidos de Sb-Fe-W
	Óxidos de Pb-Sb-As
	Óxidos de Bi
Ragra5	Goethita
	Baritina
	Fosfato de Pb
	Hematita
	Magnetita
	Pirita
	Sulfato de Hg-Ag
	Cinabrio
	Casiterita
	Galena
	Aleación de Fe-Cr-Ni
	Aleación de Fe-Cr
	Calcopirita
Ragra6	Pirita
	Rutilo
	Fosfato de Pb
	Hematita
	Esfalerita
	Galena
	Goethita
	Pirrotita
	Baritina

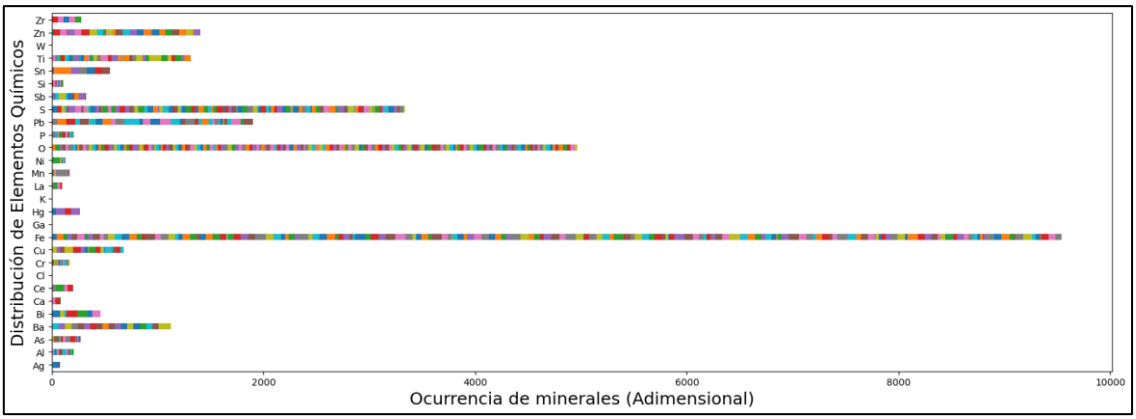


Figura 6.18. Distribución de elementos químicos según la ocurrencia de minerales a lo largo del río San Juan, según el análisis mineralógico por microscopia electrónica de barrido en roca (sedimentos fluviales y fluvio-aluviales de los ríos San Juan y Ragra respectivamente)

Se empleó la prueba lixiviación *shake flask* metales para caracterizar y medir la interacción del material de los depósitos fluvio-aluviales del río Ragra con agua proveniente de fenómenos meteorológicos (agua meteórica), como resultado se tuvo la corrida de 33 metales, detallados en el Anexo 2.1 (RRE-035-2020-STEC). De acuerdo a la Figura 6.19 se puede observar la ocurrencia de lixiviados arsénico, cadmio, cobre, plomo y zinc.

Complementando a lo anterior, se empleó la prueba lixiviación *shake flask* aniones, cuyos resultados muestran que los aniones predominantes en el material de los depósitos fluvio-aluviales del río Ragra, son los sulfatos seguido por los cloruros y los nitratos, tal y como se muestra en la Figura 6.20.

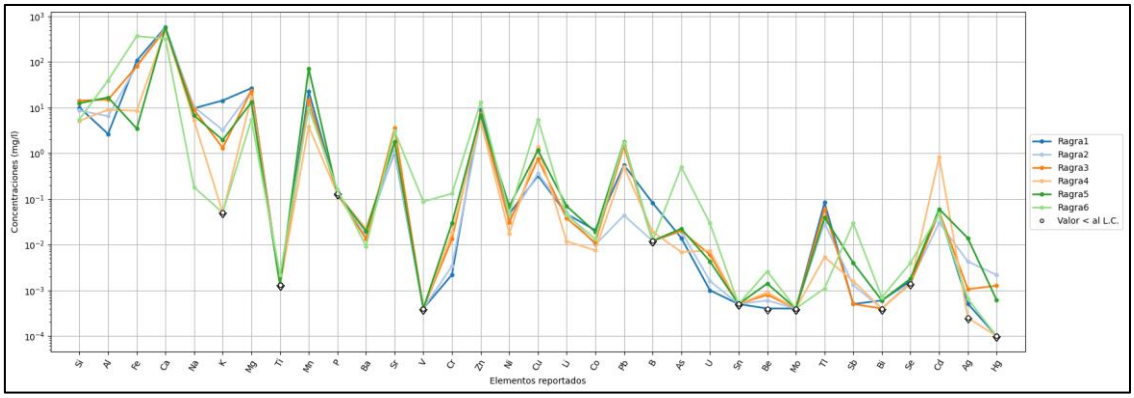


Figura 6.19. Concentraciones de metales en la prueba de lixiviación *shake flask* metales en muestras de roca (sedimentos fluvio-aluviales del río Ragra)

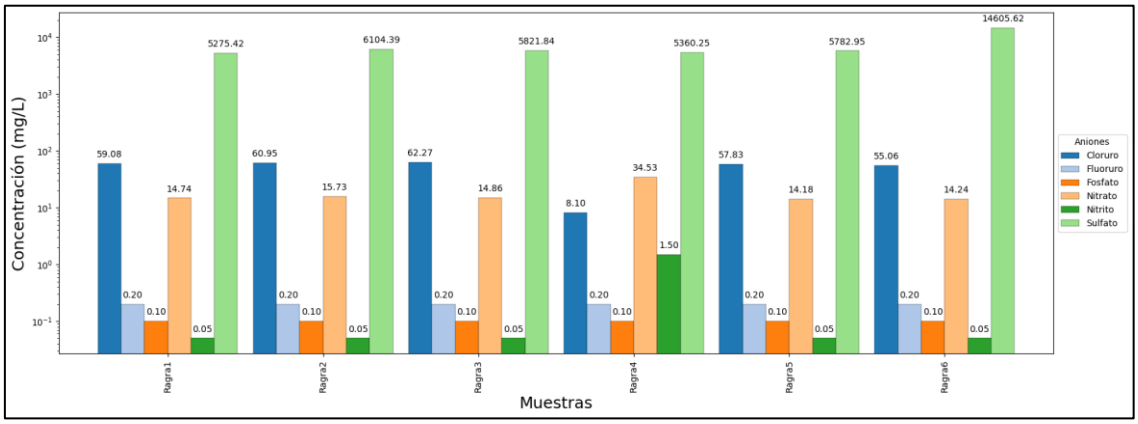


Figura 6.20. Concentraciones de aniones en la prueba de lixiviación *shake flask* aniones en muestras de roca (sedimentos fluvio-aluviales del río Ragra)

En la Figura 6.21 se observa los resultados de las fracciones de la extracción secuencial de Dold, que corresponden a las fracciones soluble en agua (FSA), intercambiable (FI), oxihidróxidos de hierro (III) (FOHH3), óxidos de hierro (III) (FOH3), orgánicos y sulfuros de cobre secundarios (FO&SCS), sulfuros primarios (FSP) y residual (FR). De las cuales las dos primeras (FSA y FI) son las fracciones más susceptibles a liberar sus lixiviados a condiciones ambientales y cuyos resultados muestran altas concentraciones para el azufre, calcio, cobre, hierro y zinc.

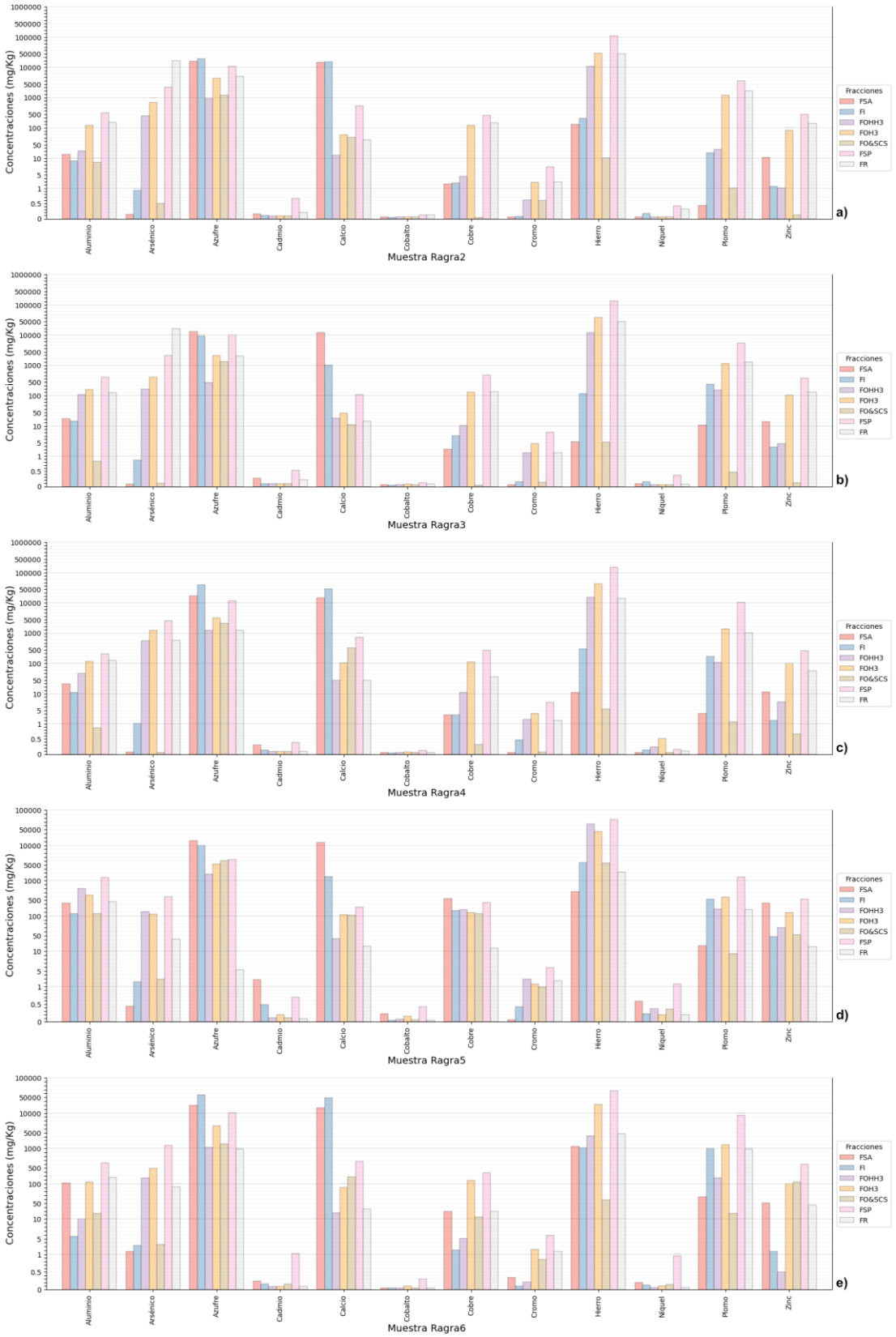


Figura 6.21. Resultados de la extracción secuencial de Dold para las muestras roca a) Ragra2, b) Ragra3, c) Ragra4, d) Ragra5 y e) Ragra6

6.2.1.4 Determinación de nivel de referencia

Para realizar este proceso, se ha tomado en cuenta los resultados de concentraciones de metales de los depósitos cuaternarios fluviales y los resultados de «sedimentos» finos. Los valores calculados se muestran en la Tabla 6.11, donde la Mediana – IT y Media – IT son los valores centrales calculados luego de realizar las respectivas iteraciones, según el procedimiento detallado en el ítem 5.2.5; MAD y STD corresponde a la desviación absoluta de la mediana y la desviación estándar respectivamente; Q1, Q2, Q3 corresponden a los valores del primer, segundo y tercer cuartil respectivamente; IQR corresponde a la diferencia entre el tercer y primer cuartil; la Mediana – CB y Media – CB corresponden a los valores centrales considerando toda la data para el diagrama de cajas y bigotes; finalmente, se muestra Umbral – Mediana, Umbral – Media y Umbral – Cajas y Bigotes que corresponden a los umbrales del nivel de fondo calculado para la distribución de elementos en la subcuenca del río San Juan (Figura 6.22). Los resultados de las iteraciones se muestran en el Anexo 4.3.

Tabla 6.11. Cuadro resumen para el calculo del nivel de referencia

Elementos	Mediana - IT	Media - IT	MAD	STD	Q1	Q2	Q3	IQR	Mediana - CB	Media - CB	Umbral - Mediana	Umbral - Media	Umbral - Cajas y Bigotes
Al	6546.000	7142.532	221.250	2350.600	4889.250	6696.000	10080.000	5190.750	6696.000	7659.952	6988.500	11843.732	17866.125
Fe	11458.000	10518.686	775.016	2327.629	11071.250	18861.000	41250.500	30179.250	18861.000	43481.473	13008.032	15173.943	86519.375
Ca	10861.000	46679.332	6603.619	34278.785	21286.500	52399.000	109740.500	88454.000	52399.000	70577.813	24068.238	115236.902	237195.000
Na	147.000	155.807	83.110	95.248	81.700	190.000	261.750	180.050	190.000	215.435	313.221	346.302	531.825
K	583.000	841.443	4.667	332.595	577.750	860.000	1323.750	746.000	860.000	1298.737	592.333	1506.632	2442.750
Mg	2167.000	2992.280	36.000	1547.255	1984.250	2917.500	4287.500	2303.250	2917.500	3040.526	2239.000	6086.790	6659.000
Ti	39.000	79.187	17.481	50.616	51.750	119.000	211.500	159.750	119.000	157.080	73.962	180.419	451.125
Mn	193.000	214.835	110.626	122.884	234.250	624.500	1653.500	1419.250	624.500	1299.124	414.251	460.603	3782.375
P	652.000	662.400	192.298	275.588	500.500	762.000	1140.000	639.500	762.000	1010.053	1036.595	1213.575	2099.250
Ba	56.180	84.174	3.109	31.394	67.697	103.590	172.300	104.602	103.590	236.241	62.398	146.962	329.204
Sr	98.405	112.942	54.273	70.032	54.830	135.350	195.300	140.470	135.350	148.447	206.951	253.006	406.005
V	26.000	24.652	1.014	3.274	22.000	27.000	35.250	13.250	27.000	36.013	28.028	31.201	55.125
Cr	6.305	8.035	0.254	2.671	6.023	7.480	10.475	4.451	7.481	273.775	6.812	13.376	17.152
Zn	42.000	50.742	5.500	18.193	52.750	431.000	3154.000	3101.250	431.000	2586.368	53.000	87.129	7805.875
Ni	5.330	5.728	2.584	3.018	3.638	7.240	9.825	6.187	7.240	7.467	10.498	11.764	19.106
Cu	3.850	6.404	0.150	4.322	9.450	58.000	492.000	482.550	58.000	361.414	4.150	15.047	1215.825
Li	4.864	5.866	0.044	3.133	4.057	6.069	9.856	5.799	6.069	197.898	4.951	12.132	18.555
Co	3.904	4.214	0.314	1.001	3.354	4.193	5.883	2.529	4.193	295.850	4.532	6.216	9.676
Pb	16.300	15.610	2.151	3.409	27.900	261.500	874.500	846.600	261.500	1603.947	20.602	22.428	2144.400
B	2.167	2.805	0.677	1.700	2.003	3.592	8.584	6.581	3.592	167.315	3.520	6.206	18.455
As	13.000	13.066	5.618	7.211	16.075	68.600	201.250	185.175	68.600	425.513	24.236	27.488	479.012
Sn	0.691	1.161	0.217	0.589	0.793	1.567	2.591	1.798	1.566	101.976	1.125	2.339	5.289
Be	0.006	0.193	0.000	0.193	0.006	0.190	0.401	0.395	0.190	0.212	0.006	0.580	0.749
Mo	0.409	0.496	0.170	0.252	0.370	0.635	1.009	0.640	0.635	0.884	0.749	1.000	1.969
Tl	0.083	0.096	0.015	0.029	0.125	0.925	31.097	30.973	0.925	556.297	0.114	0.154	77.557
Sb	0.167	0.584	0.045	0.496	0.284	1.414	4.809	4.524	1.414	12.570	0.257	1.575	11.595
Se	0.917	0.924	0.068	0.161	0.792	0.963	1.233	0.441	0.963	1.121	1.053	1.246	1.895
Cd	0.384	0.351	0.157	0.183	0.411	1.013	9.264	8.853	1.013	11.297	0.697	0.717	22.544
Ag	0.002	5.455	0.000	5.460	1.488	6.967	19.315	17.827	6.967	270.406	0.002	16.375	46.055
Hg	0.010	2.091	0.000	2.144	0.138	3.560	7.415	7.277	3.560	8.631	0.010	6.380	18.331

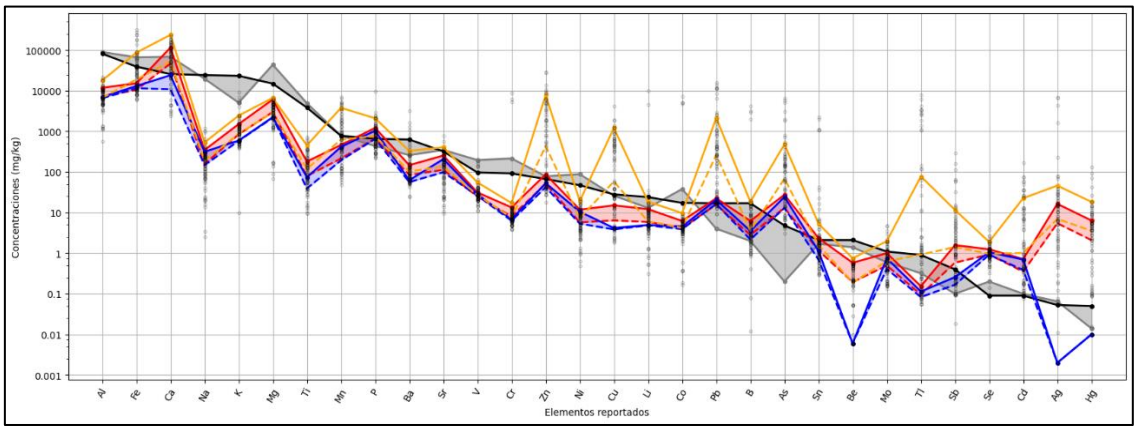


Figura 6.22. Diagrama spyder de los umbrales de niveles de fondo hallados mediante los métodos y criterios de la media (línea roja), la mediana (línea azul) y diagrama de cajas y bigotes (línea amarilla), para la distribución de elementos en la subcuenca del río San Juan

6.3 Objetivo específico 3: Determinar la influencia de los elementos de interés provenientes de los PAM, así como otras fuentes en el agua superficial, sedimento y comunidades hidrobiológicas de perifiton, macroinvertebrados acuáticos y peces en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo

6.3.1 Agua superficial

6.3.1.1 Valores que excedieron los ECA para agua 2017

Los puntos de muestreo de agua superficial en el río San Juan y aportantes fueron comparados con los Estándares de Calidad Ambiental para Agua, categoría 3; aprobados mediante Decreto Supremo N.° 004-2017-MINAM (en adelante, ECA para agua 2017, categoría 3). La Tabla 6.12 muestra los resultados de parámetros que no se encuentran dentro de lo establecido en la norma mencionada. Los resultados de todos los parámetros se encuentran a detalle en el Anexo 2.1, correspondiente al reporte de resultados N.° RRE-035-2020-STEC.

De acuerdo a la Tabla 6.12, los valores de potencial de hidrógeno (pH) en el río San Juan (cuerpo de agua principal) y tributarios, variaron desde 6,84 hasta 9,59 unidades de pH; los puntos RSjua-17 (9,59 unidades de pH), Rhuar-02 (8,41 unidades de pH), QSnom-02 (8,57 unidades de pH) y RSjua-01 (8,73 unidades de pH) presentaron valores que no se encuentran dentro de lo establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3; los valores de conductividad variaron desde 174,9 hasta 3090 µS/cm, donde los puntos RSjua-08A (2630 µS/cm), RSjua-08 (2590 µS/cm) y SJ-10 (3900 µS/cm) presentaron valores que se encuentran fuera de lo establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3; los valores de sulfatos variaron desde 2,5 hasta 3685 mg/L, donde los puntos RSjua-14 (2854 mg/L), RSjua-13(2826 mg/L), RSjua-12 (3685 mg/L), RSjua-09A (1060 mg/L), RSjua-08C (1203mg/L), SJ-17 (1410 mg/L), RSjua-08A (2016 mg/L), RSjua-08 (1810 mg/L) y SJ-11 (1664 mg/L), presentaron valores que no se encuentran dentro de lo establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3.

Los valores de oxígeno disuelto en los puntos de muestreo de agua superficial en el río San Juan y aportantes variaron desde 3,62 hasta 10,05 mg/L; los puntos SJ-17 (4,30 mg/L), RSjua-08A (4,17 mg/L), RSjua-08 (4,94 mg/L) y SJ-10 (3,62 mg/L) presentaron valores por debajo de los mínimos establecidos en los ECA para agua 2017, categoría 3. El oxígeno disuelto es importante para una alta calidad del agua y es crucial para la supervivencia de peces y otras formas de vida acuáticas. En general, los peces necesitan por lo menos concentraciones de oxígeno disuelto de 5 a 6 mg/L para su desarrollo (Weiner, 2007).

El punto SJ-12 (4300 NMP/100 mL) ubicado en el río San Juan después de la descarga del efluente DRSjua-07 (170000 NMP/100 mL) excede el valor de coliformes termotolerantes (1000 NMP/100 mL) establecido en los ECA para para agua 2017, categoría 3; esta excedencia también se presentó en los puntos establecidos en el río Ragra SJ-10 (54000 NMP/100 mL) y SJ-11(1100000 NMP/100 mL), así como en los puntos RSjua-08 (700000 NMP/100 mL), SJ-17 (3500 NMP/100 mL) y RSjua-08C (2400 NMP/100 mL) ubicados en el río San Juan después de la confluencia con el río Ragra.

Tabla 6.12. Resultados de parámetros muestreados en los puntos de agua superficial en el río San Juan y aportantes, comparados con los ECA para agua 2017, categoría 3

Cuerpo de agua	Código	pH	Conductividad eléctrica	Oxígeno disuelto	Aceites y grasas	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5)	Demanda química de oxígeno	Sulfatos	Coliformes termotolerantes	Cobre Total	Hierro Total	Manganeso Total	Plomo Total	Zinc Total
		Uds. de pH	µS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg O2/L	mg/L	NMP/100 mL	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Laguna Alcacocha (Descarga)	LAlca-02	8	174,9	5,35	-	-	-	2,8	-	< 0,0003	0,45	0,3512	0,00009	0,003
Río Paria	RPari-02	7,93	305	5,48	-	-	-	9,3	-	0,0006	0,47	0,05685	0,00061	0,005
	RPari-01A	8,39	290	6,62	-	-	-	4,5	-	0,0003	0,09	0,02182	0,00013	0,003
Río San Juan	RSjua-01	8,73	331	10,05	-	-	-	6,2	-	0,0007	0,09	0,01524	0,00042	< 0,002
Río sin nombre	RSnom-02	8,01	207,4	7,83	-	-	-	4,5	-	0,0006	0,23	0,02918	0,00054	0,002
Río San Juan	RSjua-02	8,07	284	6,06	-	-	-	5,3	-	0,0007	0,4	0,04414	0,00057	< 0,002
	RSjua-03	7,28	295	5,98	-	-	-	5,7	-	0,0008	0,27	0,04174	0,00058	< 0,002
Quebrada sin nombre 16	QSnom-16	7,76	408	6,81	-	-	-	6,5	-	< 0,0003	0,05	0,00987	0,00029	0,026
Río San Juan	RSjua-04	7,47	308	6,19	-	-	-	7	-	0,0007	0,3	0,03733	0,0007	< 0,002
	RSjua-05	7,22	299	6,63	< 0,100	4	10	8,9	< 1,8	< 0,0003	0,12	0,04962	0,00039	0,008
	RSjua-06	7,73	291	8,13	< 0,100	3	9	9,6	< 1,8	< 0,0003	0,25	0,03281	0,00072	0,005
	SJ-02A	7,61	232	6,75	< 0,100	3	9	12	14	< 0,0003	0,19	0,11195	0,00333	0,008
Río Quicay	RQuic-01	6,84	240	7,8	< 0,100	3	9	12	< 1,8	0,0043	< 0,03	0,03879	0,00239	0,011
Río San Juan	SJ-3	7,92	219	5,96	< 0,100	3	11	12	< 1,8	0,0133	0,09	0,04345	0,00264	0,01
	RSjua-07	7,9	255	6,73	< 0,100	3	< 5	21	790	< 0,0003	0,26	0,126	0,00362	0,007
	SJ-12	8,01	296	6,36	< 0,100	6	24	39	4300	0,4893	0,3	0,23647	0,00273	0,005
Río Ragra	SJ-10	7,91	3090	5,7	2.663	27	48	403	54000	0,0683	11	37.437	0,02916	2,3
	SJ-11	7,71	2480	3,62	10,88	87	134	1664	1100000	0,0857	11	32.606	0,05211	2,37
Río San Juan	RSjua-08	7,81	2590	4,94	6.666	57	87	1810	700000	0,1567	4,3	32,95	0,0201	1,24
	RSjua-08A	7,74	2630	4,17	-	-	-	2016	-	0,129	2,7	37,799	0,00776	0,873

Cuerpo de agua	Código	pH	Conductividad eléctrica	Oxígeno disuelto	Aceites y grasas	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5)	Demanda química de oxígeno	Sulfatos	Coliformes termotolerantes	Cobre Total	Hierro Total	Manganeso Total	Plomo Total	Zinc Total
		Uds. de pH	µS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg O2/L	mg/L	NMP/100 mL	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Quebrada sin nombre 02	QSnom-02	8,57	323	8,49	-	-	-	14	-	0,0006	0,11	0,01833	0,00052	0,004
Quebrada sin nombre 12	QSnom-12	7,71	374	6,14	-	-	-	8,4	-	< 0,0003	< 0,03	0,00529	0,00047	< 0,002
Río San Juan	SJ-17	7,61	2103	4,3	< 0,100	8	25	1410	3500	0,0525	1,7	19,06	0,0081	0,408
Río Huaraupampa	RHuar-01	8,13	358	5,74	-	-	-	2,5	-	< 0,0003	0,1	0,04706	0,00033	< 0,002
	RHuar-02	8,41	244	6,96	-	-	-	12	-	0,0003	< 0,03	0,00725	0,00075	< 0,002
	RHuar-03	8,16	236	6,77	-	-	-	12	-	0,0005	< 0,03	0,01096	0,00118	< 0,002
	RHuar-04	8,03	248	6,9	-	-	-	12	-	0,0008	< 0,03	0,00849	0,00202	< 0,002
	RHuar-05	8,04	280	7,14	-	-	-	11	-	0,0004	< 0,03	0,00483	0,00073	< 0,002
Río Gashan	RGash-01	8,26	261	8,26	-	-	-	6,4	-	< 0,0003	< 0,03	0,00355	0,00049	< 0,002
	RGash-02	8,28	264	7,14	-	-	-	7,6	-	0,0007	< 0,03	0,02952	0,00091	< 0,002
	SJ-16	8,24	306	8,05	< 0,100	2	10	10	< 1,8	0,0016	0,08	0,02725	0,00318	0,005
Río San Juan	RSjua-08C	7,72	1951	5,07	< 0,100	9	27	1203	2400	0,0441	1,4	16,112	0,00621	0,378
	SJ-18	8,21	1591	7,06	< 0,100	7	17	851	790	0,0265	0,90	12,863	0,00340	0,356
	SJ-18A	7,98	1608	6,84	< 0,100	7	10	849	790	0,0299	0,96	12,904	0,00334	0,324
Río Tinragra	SJ-20	8,4	215,9	6,33	-	-	-	25	-	0,0005	< 0,03	0,01735	0,00056	0,003
Río San Juan	RSjua-09A	7,67	1682	5,99	-	-	-	1060	-	0,0191	0,99	16,869	0,00243	0,91
	RSjua1A	7,56	1265	6,37	< 0,100	5	11	620	17	0,0138	0,71	10,022	0,00338	0,475
	RSjua1	7,74	1153	6,56	-	-	-	534	-	0,0124	0,58	8,5832	0,00168	0,357
	RSjua-12	7,98	1357	6,16	< 0,100	6	12	3685	< 1,8	0,0168	0,38	4,7901	0,00563	0,157
	RSjua-13	7,95	1201	6,27	-	-	-	2826	-	0,0102	0,33	5,8198	0,00223	0,191
	RSjua-14	7,82	1697	6,68	-	-	-	2854	-	0,0093	0,32	5,5852	0,00223	0,191
	RSjua-15	7,82	1166	7,01	-	-	-	653	-	0,0072	0,32	5,3089	0,00241	0,223
Río Blanco	RBlan-01	7,83	343	6,95	-	-	-	24	-	0,0004	< 0,03	0,00513	0,00022	< 0,002

Cuerpo de agua	Código	pH	Conductividad eléctrica	Oxígeno disuelto	Aceites y grasas	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5)	Demanda química de oxígeno	Sulfatos	Coliformes termotolerantes	Cobre Total	Hierro Total	Manganeso Total	Plomo Total	Zinc Total
		Uds. de pH	µS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg O2/L	mg/L	NMP/100 mL	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	RBlan-02	7,85	331	7,81	-	-	-	24	-	0,0004	< 0,03	0,00592	0,00024	< 0,002
Río San Juan	SJ-33	7,6	890	6,58	-	-	-	212	-	0,0061	0,19	1,8943	0,00327	0,099
	RSjua-16	8,07	683	6,69	-	-	-	212	-	0,0067	0,24	1,9251	0,00428	0,102
	RSjua-17	9,56	889	6,69	-	-	-	199	-	0,0068	0,24	1,8602	0,00412	0,108
	RSjua-17A	8,03	600	6,55	-	-	-	201	-	0,0088	0,36	1,8817	0,00583	0,127
Bofedal	Bof-01	7,46	592	6,65	-	-	-	14	-	0,0173	1,1	0,07235	0,04504	0,087
Río San Juan	SJ-34	7,88	608	6,38	-	-	-	203	-	0,0077	0,33	1,8504	0,00485	0,123
	RSjua-18	7,54	864	6,39	-	-	-	242	-	0,0064	0,23	1,6895	0,0046	0,111
	RSjua-20A	8,19	482	6,31	-	-	-	59	-	0,0213	2,3	0,54393	0,04099	0,17
	RSjua-19	8,04	592	6,51	-	-	-	234	-	0,009	0,35	1,8548	0,00907	0,13
	SJ-35	7,71	597	6,86	-	-	-	195	-	0,0059	0,28	1,8549	0,00452	0,122
Categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales (D.S. N.° 004-2017-MINAM)	D1: Riego de vegetales	**6,5 – 8,5**	**2500**	**≥ 4**	**5**	**15**	**40**	**1000**	**1000**	**0,2**	**5**	**0,2**	**0,05**	**2**
	D2: Bebida de animales	**6,5 – 8,4**	**5000**	**≥ 5**	**10**	**15**	**40**	**1000**	**1000**	**0,5**	**--**	**0,2**	**0,05**	**24**

Fuente: Reporte de campo RC-034-2020-412 y Reporte de resultados N.° RRE-035-2020-STEC.

«-»: Parámetro no analizado

«--»: No existe valor en la categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales

: Fuera de los valores de la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

: Fuera de un valor en la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

Los parámetros demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y demanda química de oxígeno (DQO) presentaron un comportamiento similar al de coliformes totales donde los puntos SJ-10 (27 mg/L DBO_5 y 48 mg/L DQO), SJ-11 (87 mg/L DBO_5 y 134 mg/L DQO) y RSjua-08 (57 mg/L DBO_5 y 87 mg/L DQO) excedieron los valores de DBO_5 (15 mg/L) y DQO (40 mg/L) establecidos en los ECA para agua 2017, categoría 3.

La concentración de cobre en el río San Juan y aportantes varió desde <0,0002 (valor del límite de cuantificación del método de análisis) hasta 0,489 mg/L, dicha concentración en el punto SJ-12 (0,489 mg/L) excedió el valor (0,2 mg/L) establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3-D1: riego de vegetales. La concentración de hierro varió desde <0,02 (valor del límite de cuantificación del método de análisis) hasta 11 mg/L, donde los puntos SJ-11 (11 mg/L) y SJ-10 (11 mg/L) excedieron el valor (0,2 mg/L) establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3-D1: riego de vegetales. Las concentraciones de plomo variaron desde 0,00009 hasta 11 mg/L, donde el punto SJ-11 (0,05211 mg/L) excedió el valor (0,05 mg/L) establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3. Las concentraciones de zinc variaron desde <0,001 (valor del límite de cuantificación del método de análisis) hasta 2,37 mg/L, donde los puntos SJ-11 (2,37 mg/L) y SJ-10 (2,3 mg/L) excedieron el valor (2 mg/L) establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3-D1: riego de vegetales.

Las concentraciones de manganeso exceden al valor (0,2 mg/L) establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3-D1: riego de vegetales, en los puntos del río Ragra: SJ-10 (37,437 mg/L) y SJ-11 (32,606 mg/L); en el río San Juan las concentraciones de manganeso empiezan a exceder al valor del ECA para agua después de la descarga del efluente identificado con código DRSjua-07B, el cual descarga antes del punto SJ-12 (0,23647 mg/L) ubicado en el río San Juan; asimismo, después de la confluencia del río Ragra con el río San Juan las concentraciones del manganeso se incrementan en los puntos de muestreo del río San Juan: RSjua-08 (32,95 mg/L), RSjua-08A (37,799 mg/L), SJ-17 (19,06 mg/L), RSjua-08C (16,112 mg/L), SJ-18 (12,863 mg/L), SJ-18A (12,904 mg/L), RSjua-09A (16,869 mg/L), RSjua1A (10,022 mg/L), RSjua1 (8,5832 mg/L), RSjua-12 (4,7901 mg/L), RSjua-13 (5,8198 mg/L), RSjua-14 (5,5852 mg/L), RSjua-15 (5,3089 mg/L), SJ-33 (1,8943 mg/L), RSjua-16 (1,925 mg/L), RSjua-17 (1,8602 mg/L), RSjua-17A (1,8817 mg/L), SJ-34 (1,8504 mg/L), RSjua-18 (1,6895 mg/L), RSjua-20A (0,54393 mg/L), RSjua-19 (1,85548 mg/L) y SJ-35 (1,8549 mg/L).

6.3.1.2 Caracterización hidroquímica

a) Diagrama de Piper

Las concentraciones de los iones principales determinadas en las muestras de agua superficial en el río San Juan, se presentan en el gráfico trilineal de Piper que permite identificar los tipos de agua, de acuerdo con las facies hidroquímicas (Figura 6.23).

El diagrama muestra que los puntos RHuar-03, RQuic-01, RHuar-02, SJ-03, SJ-02A, RSnom-02, SJ-20, LAlca-02, RGash-02, RGahs-01, RHuar-04, RSjua-07, QSnom-16, RHuar-01, RBlan-02, RBlan-01, RSjua-02, RPari-01A, RSjua-05, RSjua-03, RSjua-06, RHuar-05, SJ-16, RSjua-04, RPari-02, Qsnom-02, RSjua-01 y SJ-12 (ubicados en el río San Juan antes de la confluencia con el río Ragra y las quebradas aportantes) presentan facies bicarbonatadas cálcicas y el punto QSnom-12 presenta facies bicarbonatada magnésica; estos puntos mencionados pertenecen al clúster 2 hallado en el análisis de cluster; el punto RSjua-20A perteneciente al clúster 2 tiene una facies bicarbonatada cálcica-magnésica .

Los puntos que pertenecen al tipo sulfatado tenemos a RSjua-12, RSjua-13 y RSjua-14 pertenecientes al clúster 3 y tienen facies sulfatadas cálcicas; el resto de puntos (RSjua-15,

RSjua1A, RSjua1, RSjua-17, SJ-33, RSjua-18, SJ-34, RSjua-17A, SJ-35, RSjua-19, RSjua-16, y BOF-01, clúster 1; RSjua-08C, SJ-17, SJ-18A, SJ-18 y RSjua-09A, clúster 4; y SJ-10, SJ-11, RSjua-08 y RSjua-08A, clúster 5) tienen facies sulfatadas cálcicas y magnésicas.

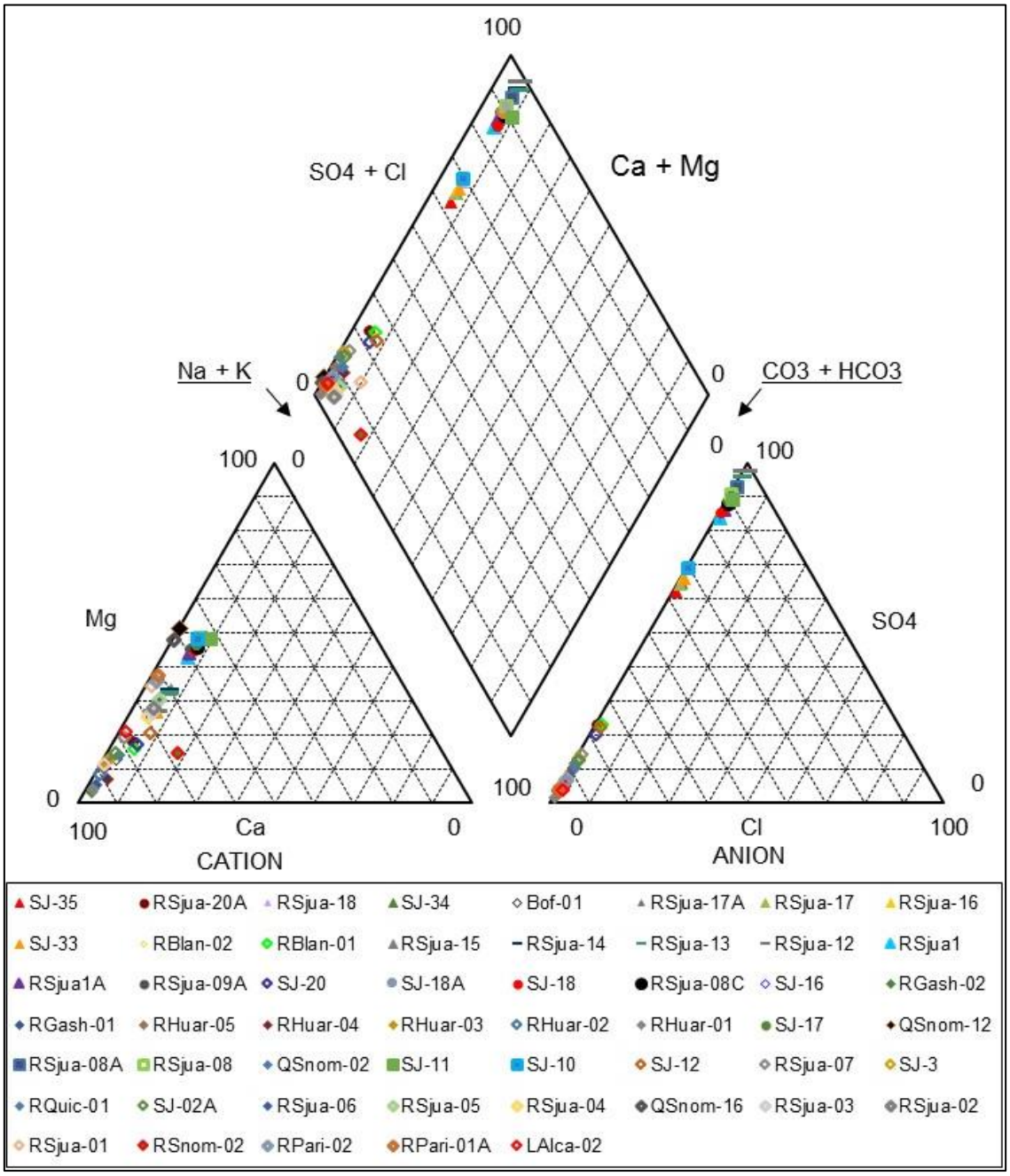


Figura 6.23. Diagrama de Piper que muestra la composición de iones mayoritarios en el agua superficial (río San Juan y aportantes)

6.3.1.3 Análisis estadístico multivariado

a) Análisis de componente principales (ACP)

El análisis de componentes principales (ACP) se realizó empleado los resultados de 30 parámetros (potencial de hidrógeno, conductividad, oxígeno disuelto, sólidos totales suspendidos, bicarbonatos, cloruros, fluoruros, sulfatos, y aluminio, arsénico, bario, bismuto,

boro, cadmio, calcio, cerio, cobalto, cobre, estroncio, fósforo, hierro, litio, magnesio, manganeso, plomo, potasio, sodio, titanio, uranio y zinc, como metales totales), en los 54 puntos de muestreo de agua superficial dispuestos en el río San Juan y aportantes.

En la Tabla 6.13 se muestra los parámetros que se agruparon en 2 componentes principales (PC1 y PC2), los cuales explicaron el 69,896 % de la varianza total en el conjunto de datos. El PC1 presentó una fuerte correlación positiva (>0,8) con la conductividad, calcio, estroncio, potasio, litio, sodio, magnesio, manganeso, cobalto, sulfatos, boro, cloruros; moderada correlación positiva (>0,5 a 0,8) con los fluoruros, zinc, titanio, uranio y moderada correlación negativa con el oxígeno disuelto; y débilmente correlacionado negativamente (<0,5) con el cobre y potencial de hidrógeno. Mientras que, el PC2 presentó fuerte correlación positiva con el plomo y moderada correlación con los sólidos totales suspendidos, bismuto, hierro, aluminio, cerio, fósforo, arsénico, bicarbonatos, cadmio y bario, (para los cálculos estadísticos ver el Anexo 4.1).

Tabla 6.13. Cargas de los componentes principales para los parámetros (variables) del agua superficial del río San Juan y aportantes

Parámetros (variables)	PC1	PC2
Conductividad eléctrica	0,922	0,319
Calcio Total	0,922	0,307
Litio Total	0,915	0,322
Potasio Total	0,906	0,355
Sodio Total	0,905	0,385
Estroncio Total	0,904	0,324
Magnesio Total	0,887	0,352
Manganeso Total	0,875	0,389
Cobalto Total	0,853	0,315
Sulfatos	0,817	-0,125
Cloruros	0,814	0,042
Boro Total	0,804	0,336
Fluoruros	0,711	-0,096
Zinc Total	0,699	0,621
Uranio Total	0,622	0,428
Titanio Total	0,622	0,406
Oxígeno disuelto	-0,562	-0,311
Cobre Total	0,315	0,131
Potencial de hidrógeno	-0,163	-0,019
Plomo Total	0,186	0,907
Sólidos totales en suspensión	0,410	0,790
Bismuto Total	0,432	0,770
Hierro Total	0,539	0,762
Aluminio Total	0,086	0,758
Cerio Total	0,216	0,739
Fósforo Total	0,446	0,718
Arsénico Total	0,328	0,707
Bicarbonatos	0,069	0,685
Cadmio Total	0,624	0,658
Bario Total	-0,213	0,576
Porcentaje de la varianza explicada (%)	43,134	43,134

Parámetros (variables)	PC1	PC2
Varianza % acumulado	26,762	69,896

b) Análisis de cluster (clúster) y escalamiento multidimensional no métrico (nMDS)

Las semejanzas del análisis de cluster para el agua superficial del río San Juan y aportantes, se calculó utilizando la distancia euclidiana al cuadrado y se evaluó la estructura multivariable empleado un análisis de agrupamiento jerárquico. Estos análisis se usan a menudo con el ACP en la identificación de las fuentes de contaminación en muestras ambientales (Zhou *et al*., 2008); y emplean una medida de disimilitud como la distancia euclidiana (recomendada para variables ambientales).

El agrupamiento de puntos por análisis de cluster (clúster) se realizó por el análisis de clúster jerárquicos con el método de Ward usando la medida de distancia euclídea al cuadrado. Para la agrupación de los puntos de muestreo se usaron los mismos 30 parámetros utilizados en el ACP. La Figura 6.24, muestra el dendrograma con los 5 grupos (clúster) formados, y la Figura 6.25 muestra la distribución del clúster en un gráfico de puntuaciones de los componentes principales.

El clúster 1 está conformado por los puntos RSjua-15, RSjua1A, RSjua1, RSjua-17, SJ-33, RSjua-18, SJ-34, RSjua-17A, SJ-35, RSjua-19, RSjua-16, RSjua-20A y BOF-01; los cuales se encuentran en la parte baja del río San Juan, a excepción de los puntos RSjua1A, RSjua1, que se ubican en la parte medía del río San Juan y aguas arriba de la unidad minera Colquijirca.

El clúster 2 está conformado por los puntos RHuar-03, RQuic-01, RHuar-02, SJ-03, SJ-02A, RSnom-02, SJ-20, LAlca-02, RGash-02, RGahs-01, RHuar-04, RSjua-07, QSnom-12, QSnom-16, RHuar-01, RBlan-02, RBlan-01, RSjua-02, RPari-01A, RSjua-05, RSjua-03, RSjua-06, RHuar-05, SJ-16, RSjua-04, RPari-02, Qsnom-02, RSjua-01 y SJ-12; ubicados en la parte alta del río San Juan antes de su unión con el río Ragra o quebradas aportantes al río San Juan.

El clúster 3 está conformado por los puntos RSjua-14, RSjua-13 y RSjua-12 ubicados en el río San Juan, aguas debajo de la unidad minera Colquijirca; el clúster 4 está conformado por los puntos RSjua-08C, SJ-17, SJ-18A, SJ-18 y RSjua-09A ubicados en el río San Juan y aguas abajo de un bofedal. Por último, el clúster 5 está conformado por los puntos de muestreo SJ-10 y SJ-11, ambos ubicados en el río Ragra, y RSjua-08 y RSjua-08A ubicados en el río San Juan después de la unión del río Ragra.

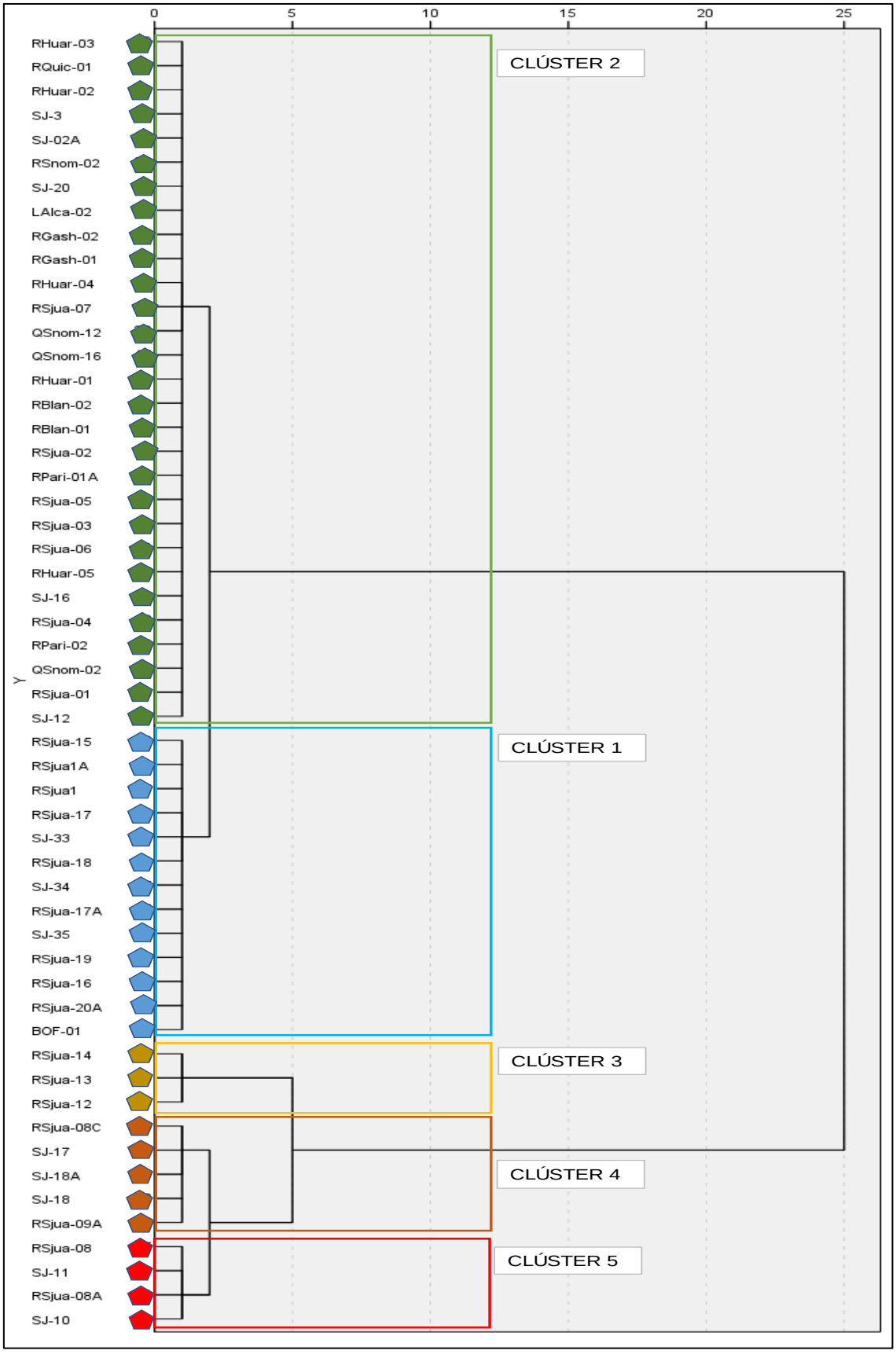


Figura 6.24. Dendrograma que muestra los grupos jerárquicos entre los puntos de muestreo del agua superficial en el río San Juan y aportantes (método «Ward»)

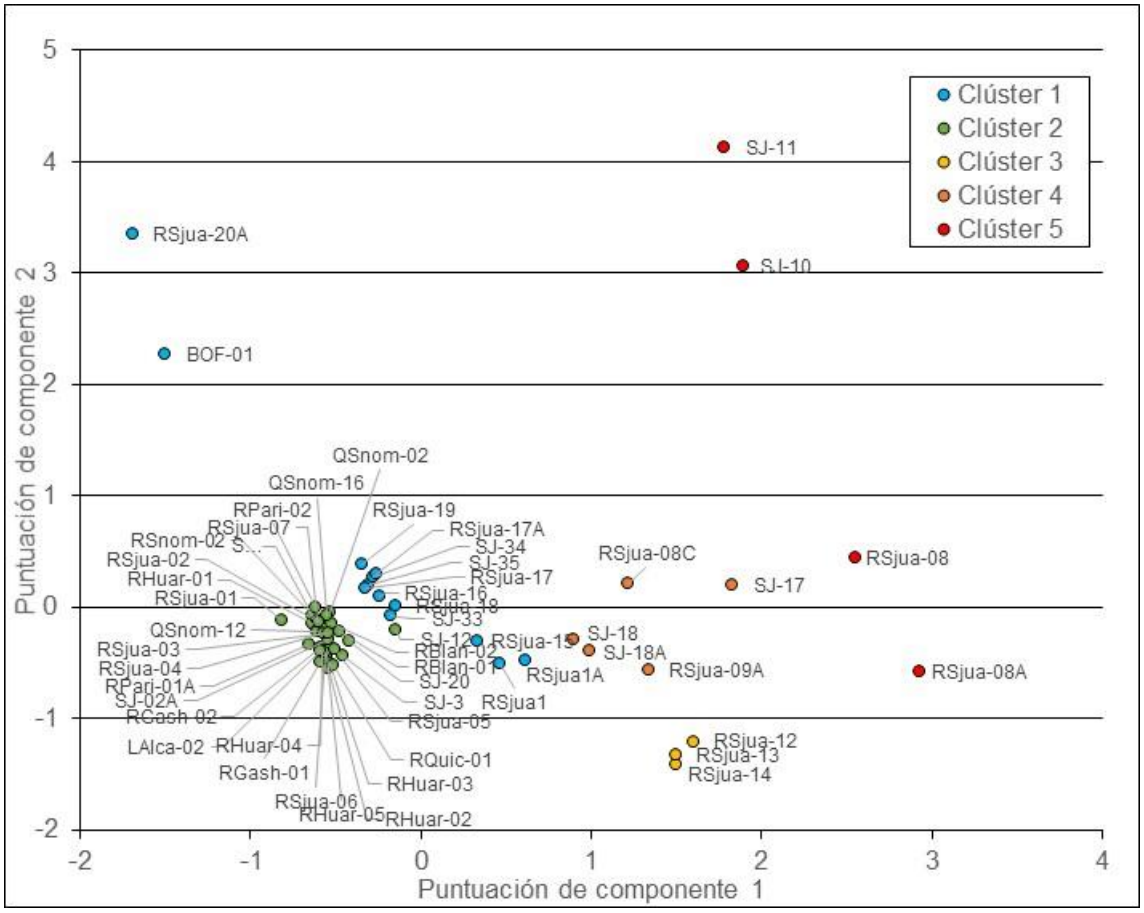


Figura 6.25. Puntuaciones de los componentes principales, con ubicación de los puntos de muestro de agua superficial separados por clústers

En la Figura 6.25 se observa que el clúster 2 está conformado por los puntos que por lo general presentan las menores concentraciones en parámetros que componen el PC1 y PC2; el clúster 1 tiene a los puntos con concentraciones altas de los parámetros que componen del PC2 y bajas del PC1; los clústers 3 y 4 están conformados por los puntos que presentan concentraciones medias altas de los parámetros que conforman el PC1; el clúster 5 está formado por los puntos de muestreo que presentan las mayores concentraciones de los parámetros que componen el PC1 y PC2.

La Tabla 6.14 muestra las medias de las concentraciones de los parámetros que componen los clúster y la media del total de puntos, donde se observa que el clúster 2 presenta las medias más bajas para casi todos los parámetros, excepto en oxígeno disuelto, potencial de hidrógeno, bicarbonatos y arsénico; el clúster 1 presenta las medias de potencial de hidrógeno, conductividad, oxígeno disuelto, sólidos totales suspendidos, bicarbonatos, aluminio, bario, boro, cerio, estroncio, plomo y uranio superior a las medias del total de datos y solo la media del potencial de hidrógeno y oxígeno disuelto son las mayores entre los 5 grupos. El clúster 3 tiene el valor de las medias de conductividad, cloruros, fluoruros, aluminio, boro, calcio, cobalto, estroncio, litio, magnesio, manganeso, potasio, sodio y uranio mayores a la media del total de datos, siendo las medias de cloruro, fluoruro y sulfatos las mayores de los 5 grupos.

Las medias de los parámetros del clúster 4 como potencial de hidrógeno, oxígeno disuelto, arsénico, bario, bismuto, boro, fósforo y plomo fueron menor a las medias del total de puntos, en este clúster ningún parámetro tuvo la media más alta, pero si varios fueron las segundas

de mayor valor. El clúster 5 presentó por lo general medias superiores a las medias de total de datos, excepto en potencial de hidrógeno, oxígeno disuelto y bario; además presentó los mayores valores de las medias en casi todos los parámetros, exceptuando en cloruros, fluoruros, sulfatos y aluminio.

Tabla 6.14. Tabla de medias de los parámetros que componen los clústers y del total de puntos de agua superficial

Parámetros	Clúster 1	Clúster 2	Clúster 3	Clúster 4	Clúster 5	Total
Potencial de hidrógeno	7,938	7,958	7,917	7,838	7,793	7,928
Conductividad eléctrica	798,538	283,421	1418,333	1787,000	2697,500	788,522
Oxígeno disuelto	6,581	6,945	6,370	5,852	4,608	6,551
Sólidos totales en suspensión	11,1408	2,9645	5,2233	10,9400	55,7500	9,7069
Bicarbonatos	155,077	140,945	99,733	171,960	202,950	149,522
Cloruros	2,812	0,569	24,533	10,808	14,640	4,431
Fluoruros	0,019	0,086	0,623	0,176	0,393	0,131
Sulfatos	275,231	11,559	3121,667	1074,600	1473,250	454,522
Aluminio Total	0,122	0,017	0,060	0,087	0,121	0,059
Arsénico Total	0,006	0,006	0,004	0,006	0,023	0,007
Bario Total	0,064	0,029	0,039	0,040	0,037	0,040
Bismuto Total	0,00010	0,00003	0,00010	0,00009	0,00102	0,00013
Boro Total	0,022	0,005	0,026	0,030	0,045	0,015
Cadmio Total	0,00038	0,00001	0,00042	0,00080	0,00687	0,00071
Calcio Total	90,385	42,724	165,000	211,800	308,000	96,296
Cerio Total	0,0003	0,0001	0,0001	0,0003	0,0003	0,0002
Cobalto Total	0,0005	0,0001	0,0007	0,0018	0,0033	0,0006
Cobre Total	0,010	0,018	0,012	0,034	0,110	0,024
Estroncio Total	0,609	0,125	0,883	1,255	2,028	0,529
Fósforo Total	0,029	0,028	0,021	0,073	0,949	0,100
Hierro Total	0,556	0,138	0,343	1,190	7,250	0,875
Litio Total	0,018	0,001	0,038	0,076	0,120	0,023
Magnesio Total	27,525	7,868	46,933	123,600	206,500	40,200
Manganeso Total	3,026	0,050	5,398	15,562	35,198	5,103
Plomo Total	0,010	0,001	0,003	0,005	0,027	0,006
Potasio Total	2,808	0,958	7,033	7,400	11,525	3,120
Sodio Total	10,554	2,274	22,000	37,400	61,000	12,966
Titanio Total	0,002	0,001	0,002	0,003	0,004	0,002
Uranio Total	0,0004	0,0002	0,0004	0,0005	0,0006	0,0003
Zinc Total	0,172	0,004	0,180	0,475	1,696	0,223

6.3.1.4 Cálculo de Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales ICARHS

A partir de los resultados de los parámetros demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, oxígeno disuelto y coliformes termotolerantes se calculó el subíndice S1 y de los resultados de potencial de hidrógeno, aluminio, arsénico, boro, cadmio, cobre, hierro, manganeso y plomo el subíndice S2, para posterior mente determinar el ICARHS de los puntos de agua superficial muestreados.

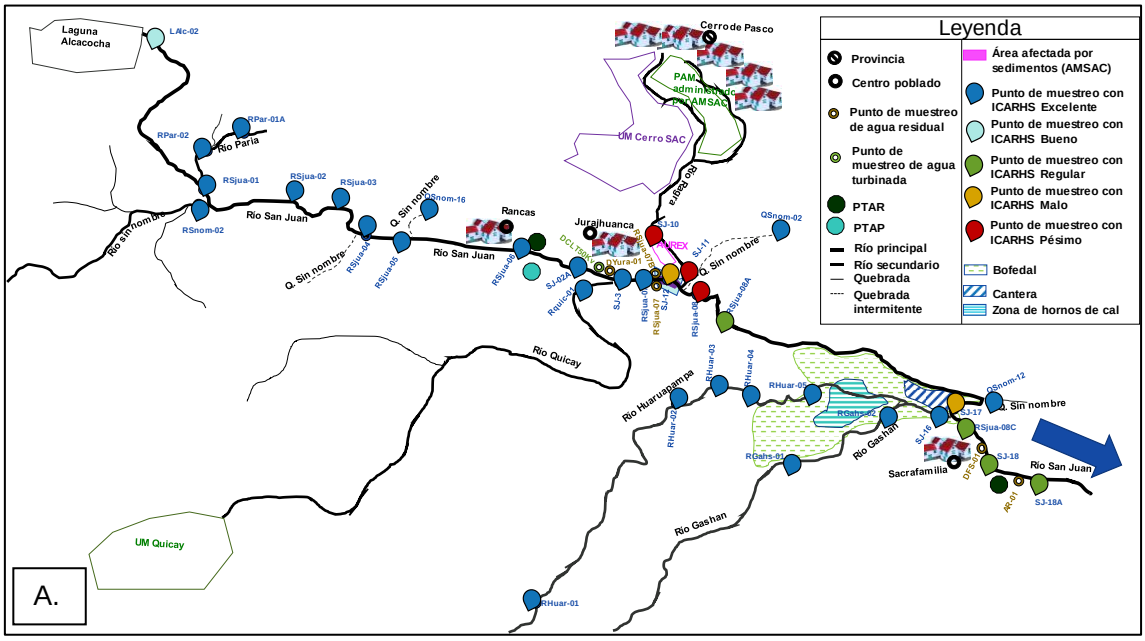
En la Tabla 6.15 se muestra los resultados del cálculo de los subíndices S1, S2 y el ICARHS, para el muestreo realizado en agosto del 2020, donde se aprecia que los puntos ubicados en la parte alta de río San Juan (antes de la descarga de las aguas residuales muestreadas en los puntos DRSjua-07 y DRSjua-07B) y los aportantes excepto el río Ragra, presentan un ICARHS excelente, el punto SJ-12 (después de la descarga de las aguas residuales muestreadas en los puntos DRSjua-07 y DRSjua-07B) presentó un ICARHS malo, los puntos de muestreo en el río Ragra presentan un ICARHS pésimo y los puntos de muestreo en el río San Juan después de la descarga del río Ragra presenta ICARHS de malo a regular, la cual va variando a menudo que se aleja de la descarga del río mencionado pasando de regular a buena, esta explicación también se puede observar en la Figura 6.26.

Los puntos de muestreo con ICARHS malo y pésimo son atribuidos por el subíndice S1 el cual es calculado envase a los parámetros orgánicos.

Tabla 6.15. ICARHS para el río San Juan y aportantes para el muestreo realizado en agosto de 2020

Cuerpo de agua	Código	Subíndice S1			Subíndice S2			ICARHS
		N.° de parámetros	parámetros > al ECA	S1	N.° de parámetros	parámetros > al ECA	S2	
Río San Juan	SJ-35	1	0	ND	9	1	72,78	Regular
	RSjua-19	1	0	ND	9	1	72,78	Regular
	RSjua-20A	1	0	ND	9	1	77,63	Regular
	RSjua-18	1	0	ND	9	1	72,95	Regular
	SJ-34	1	0	ND	9	1	72,78	Regular
Bofedal	BOF-01	1	0	ND	9	0	100	Excelente
Río San Juan	RSjua-17A	1	0	ND	9	1	72,75	Regular
	RSjua-17	1	0	ND	9	1	70,89	Regular
	RSjua-16	1	0	ND	9	1	72,71	Regular
	SJ-33	1	0	ND	9	1	72,74	Regular
Río Blanco	RBlan-02	1	0	ND	9	0	100	Excelente
	RBlan-01	1	0	ND	9	0	100	Excelente
Río San Juan	RSjua-15	1	0	ND	9	1	71,69	Regular
	RSjua-14	1	0	ND	9	1	71,66	Regular
	RSjua-13	1	0	ND	9	1	71,64	Regular
	RSjua-12	4	0	100	9	1	71,75	Regular
	RSjua1	1	0	ND	9	1	71,47	Regular
	RSjua1A	4	0	100	9	1	71,42	Regular
	RSjua-09A	1	0	ND	9	1	71,30	Regular
Río Tinragra	SJ-20	1	0	ND	9	0	100,00	Excelente
Río San Juan	SJ-18A	4	0	100	9	1	71,36	Regular
	SJ-18	4	0	100	9	1	71,36	Regular
	RSjua-08C	4	1	66,32	9	1	71,31	Regular
Río Gashan	SJ-16	4	0	100	9	0	100	Excelente
	RGash-02	1	0	ND	9	0	100	Excelente
	RGash-01	1	0	ND	9	0	100	Excelente
Río Huaraupampa	RHuar-05	1	0	ND	9	0	100	Excelente
	RHuar-04	1	0	ND	9	0	100	Excelente
	RHuar-03	1	0	ND	9	0	100	Excelente
	RHuar-02	1	0	ND	9	1	99,89	Excelente
	RHuar-01	1	0	ND	9	0	100	Excelente
Río San Juan	SJ-17	4	2	58,02	9	1	71,28	Malo

Cuerpo de agua	Código	Subíndice S1			Subíndice S2			ICARHS
		N.° de parámetros	parámetros > al ECA	S1	N.° de parámetros	parámetros > al ECA	S2	
Quebrada sin nombre 12	QSnom-12	1	0	ND	9	0	100	Excelente
Río San Juan	RSjua-08A	1	1	ND	9	1	71,21	Regular
	RSjua-08	4	4	42,34	9	1	71,22	Pésimo
Quebrada sin nombre 02	QSnom-02	1	0	ND	9	1	98,87	Excelente
Río Ragra	SJ-11	4	4	42,31	9	3	64,64	Pésimo
	SJ-10	4	3	43,31	9	2	64,97	Pésimo
Río San Juan	SJ-12	4	1	55,69	9	2	75,34	Malo
	RSjua-07	4	0	100	9	0	100	Excelente
	SJ-3	4	0	100	9	0	100	Excelente
Río Quicay	RQuic-01	4	0	100	9	0	100	Excelente
Río San Juan	SJ-02A	4	0	100	9	0	100	Excelente
	RSjua-06	4	0	100	9	0	100	Excelente
	RSjua-05	4	0	100	9	0	100	Excelente
	RSjua-04	1	0	ND	9	0	100	Excelente
Quebrada sin nombre 16	QSnom-16	1	0	ND	9	0	100	Excelente
Río San Juan	RSjua-03	1	0	ND	9	0	100	Excelente
	RSjua-02	1	0	ND	9	0	100	Excelente
	RSjua-01	1	0	ND	9	1	97,90	Excelente
Río sin nombre	RSnom-02	1	0	ND	9	0	100	Excelente
Río Paria	RPari-02	1	0	ND	9	0	100	Excelente
	RPari-01A	1	0	ND	9	0	100	Excelente
Laguna Alcacocha (Descarga)	LAlca-02	1	0	ND	9	0	82,62	Bueno



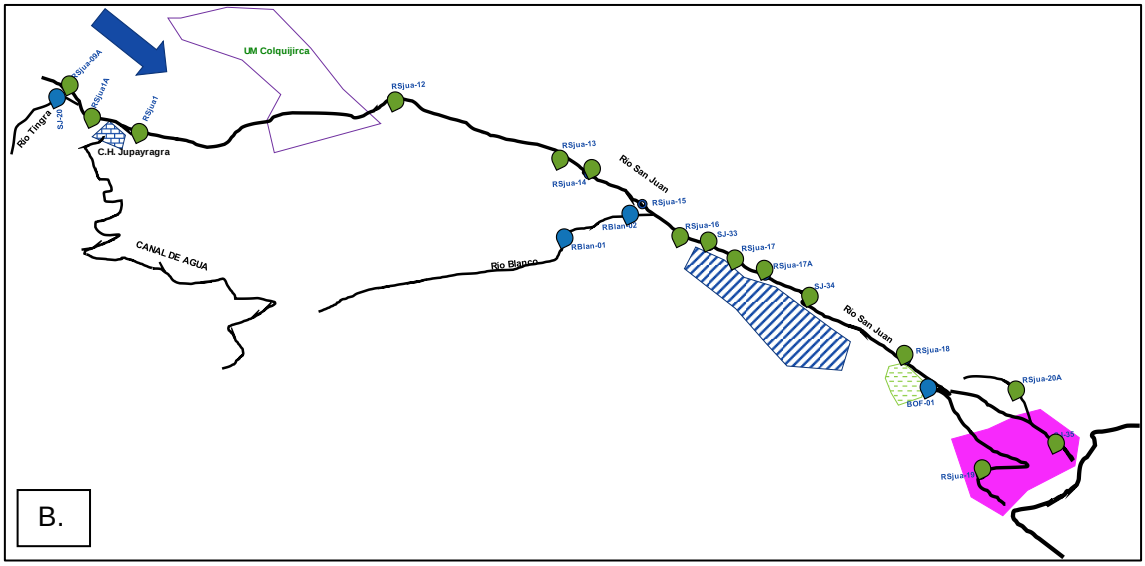


Figura 6.26. Representación gráfica del ICA-PE en el río San Juan y aportantes a) parte alta y B) parte baja.

6.3.2 Sedimento

En la Tabla 6.16 se presentan los de metaloides, metales y clase textural en los sedimentos del río San Juan y tributarios. Los resultados de todos los parámetros se encuentran a detalle en el Anexo 2.1, correspondiente al reporte de resultados N.° RRE-035-2020-STEC.

Tabla 6.16. Resultados de metaloides, metales y textura en los sedimentos del río San Juan y tributarios

Cuerpo de agua	Código	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Grava (%)	Clase textural	Fe (mg/kg)	Al (mg/kg)	As (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ba (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Ag (mg/kg)
Río San Juan	RSjua-01	2.3	8.08	89.69	0	Arenoso	11997	4930	100.00	217.00	93.00	0.45	13.00	23.00	4.10	10861	294.00	73.71	0.20	19.93
Quebrada sin nombre 16	QSnom-16	2.11	7.42	90.6	0	Arenoso	5910	3362	8.16	16.30	18.00	0.08	0.09	3.90	4.03	3336	55.80	25.09	0.20	1.64
Río San Juan	RSjua-06	9.97	34.66	55.4	0	Franco arenoso	19238	17976	23.10	116.00	150.00	0.95	4.45	24.00	9.86	49706	349.00	133.90	0.34	2.21
	SJ-02A	2.05	6.84	91.28	0	Arenoso	12508	7359	14.80	55.10	85.00	0.38	2.30	14.00	4.79	30858	237.00	59.04	0.34	1.51
Río Quicay	RQuic-01	5.82	20.23	74	0	Franco arenoso	26020	11673	27.20	37.10	55.00	0.40	0.60	9.10	6.34	10521	317.00	86.20	0.76	0.97
Río San Juan	SJ-3	2.16	7.87	89.94	0	Arenoso	13826	6921	35.00	251.00	135.00	0.67	4.23	23.00	5.69	124977	901.00	116.20	0.59	2.09
	RSjua-07	0.72	0.72	70.36	28.25	Arena gravosa	36180	6721	205.00	870.00	1816.00	4.46	5.01	486.00	13.20	21149	950.00	72.21	0.41	6.81
	SJ-12	0.68	1.35	77.55	20.97	Arena gravosa	56753	6438	274.00	799.00	3423.00	7.53	9.05	886.00	10.00	14054	2168.00	59.86	0.72	16.33
Río Ragra	SJ-10	0	1.18	89.3	9.85	Arena gravosa	88810	2946	410.00	1 974	6373.00	34.96	4.70	662.00	13.80	22927	5167.00	91.35	0.93	23.28
Quebrada sin nombre 02	QSnom-02	8.62	29.83	61.55	0	Franco arenoso	24222	13207	80.70	29.80	72.00	0.61	< 0.010	8.00	3.38	30846	1365.00	158.10	0.49	1.41
Río San Juan	RSjua-08	0	0.79	78.69	20.05	Arena gravosa	71389	4414	480.00	888.00	5908.00	23.11	5.27	449.00	9.70	39762	3169.00	69.63	0.91	26.84
	RSjua-08A	5.19	18.22	76.56	0	Arena arcillosa	175669	6246	539.00	772.00	27869.00	170.29	2.04	1941.00	2.79	24847	5252.00	117.70	1.72	6.13
Quebrada sin nombre 12	QSnom-12	7.97	27.77	64.21	0	Franco arenoso	9929	6829	16.50	75.10	63.00	0.34	2.84	22.00	7.70	3073	120.00	61.71	0.21	1.30
Río Huarupampa	RHuar-01	0.53	1.6	92.04	6.08	Arena gravosa	13983	6517	22.60	15.10	44.00	0.30	< 0.010	3.80	3.19	85959	398.00	66.61	0.74	0.52
	RHuar-02	0	1.74	67.11	31.17	Arena gravosa	10252	4539	40.10	269.00	57.00	0.41	10.40	22.00	5.38	140461	379.00	57.82	0.38	14.35
	RHuar-04	13.76	48.4	37.85	0	Franco	11510	4890	58.50	373.00	85.00	0.46	14.90	39.00	5.44	112457	360.00	82.30	0.38	14.96
	RHuar-05	4.59	16.34	79.11	0	Arena arcillosa	11468	5666	63.70	364.00	75.00	0.48	14.30	38.00	4.94	108835	337.00	59.28	0.38	33.80
Río Gashan	RGash-01	11.14	42.08	46.79	0	Franco	14176	13816	56.60	199.00	80.00	0.66	6.21	37.00	2.53	68446	605.00	96.87	0.74	4.36
	RGash-02	16.2	60.82	23.01	0	Franco limoso	11458	6260	13.00	18.50	55.00	0.47	< 0.010	9.50	7.12	54664	405.00	127.90	0.64	0.18

Cuerpo de agua	Código	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Grava (%)	Clase textural	Fe (mg/kg)	Al (mg/kg)	As (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Ba (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Ag (mg/kg)
	SJ-16	1.01	3.03	88.05	7.99	Arena gravosa	10024	6840	26.10	125.00	169.00	0.58	3.13	37.00	8.16	147980	313.00	99.38	0.48	2.45
Río San Juan	RSjua-08C	18.2	65.32	16.48	0	Franco limoso	43937	12990	167.00	282.00	8816.00	35.67	10.30	412.00	5.28	122151	3516.00	118.40	0.99	6.35
	SJ-18	9.35	32.82	57.83	0	Franco arenoso	80321	17670	200.00	433.00	13639.00	72.90	14.50	699.00	10.10	63446	4089.00	133.50	1.19	7.28
	RSjua1	17.16	61.32	21.52	0	Franco limoso	45762	7074	135.00	365.00	8920.00	26.81	3.55	383.00	15.40	98609	1998.00	162.00	0.91	3.51
Río San Juan	RSjua-12	10.6	38.3	51.11	0	Franco	33483	10843	226.00	1 291	6309.00	12.93	5.50	932.00	22.00	113465	6570.00	413.80	1.46	6.25
	RSjua-13	16.1	56.78	27.13	0	Franco limoso	26043	10430	142.00	457.00	4413.00	11.64	5.69	516.00	21.30	114362	4510.00	204.20	1.25	3.85
Rio Blanco	RBlan-01	0.62	2.48	69.39	27.38	Arena gravosa	11115	5942	13.50	16.20	48.00	0.40	< 0.010	7.20	7.65	68262	386.00	126.70	0.73	0.29
	RBlan-02	3.14	10.85	86.01	0	Arenoso	11591	6480	14.00	17.80	53.00	0.45	< 0.010	9.30	6.09	62253	370.00	127.80	0.63	0.20
Río San Juan	RSjua-16	17.78	62.32	19.9	0	Franco limoso	28188	9457	145.00	427.00	5987.00	13.08	5.48	595.00	17.00	85795	7053.00	215.90	1.25	5.06
	RSjua-17	9.18	30.53	60.29	0	Franco arenoso	18484	6648	68.20	567.00	1070.00	3.57	8.57	183.00	6.01	52569	681.00	271.40	0.81	6.65
	RSjua-17A	0.64	2.56	60.79	36.08	Arena gravosa	38913	6191	153.00	2522.00	4678.00	5.75	11.80	594.00	4.18	51171	1579.00	1616.00	1.44	29.98
	RSjua-18	14.33	50.55	35.1	0	Franco limoso	25789	9655	101.00	1019.00	2358.00	5.85	5.99	310.00	9.79	41922	857.00	608.50	1.06	10.40
	RSjua-20A	12.16	41.99	45.83	0	Franco	140271	6671	794.00	8441.00	28159.00	49.17	4.12	4235.00	10.10	21153	3364.00	494.70	4.72	77.90
	RSjua-19	17.1	60.44	22.46	0	Franco limoso	56414	14299	245.00	2583.00	9692.00	26.07	17.60	1865.00	6.41	63986	2322.00	1040.00	2.24	27.05
	SJ-35	16.17	57.21	26.65	0	Franco limoso	33452	10076	160.00	1082.00	3760.00	12.47	18.60	510.00	12.10	47445	821.00	301.90	1.25	14.58

6.3.2.1 Valores que excedieron los valores de la guía canadiense

A continuación, se muestran los resultados de los parámetros evaluados en los ríos San Juan, Quicay, Ragra, Huaraupampa, Gashan y Blanco; y de las quebradas sin nombre 2, sin nombre 12, sin nombre 16, comparados con los valores ISQG y PEL de la Guía de calidad ambiental de Canadá para sedimentos de agua dulce, en adelante guía canadiense de sedimento (Tabla 6.17).

Las concentraciones de arsénico, plomo, zinc, cadmio, mercurio y cobre al ser comparados referencialmente con el valor PEL de la guía canadiense de sedimento, superaron los valores establecidos en esta norma en arsénico (28 de 34 muestras), plomo (25 de 34 muestras), zinc (18 de 34 muestras), cadmio (17 de 34 muestras), mercurio (28 de 34 muestras) y cobre (21 de 34 muestras). Cabe precisar que, las mayores concentraciones se registraron en los puntos RSjua-08A y RSjua-20A.

Tabla 6.17. Resultados de metaloides y metales en los sedimentos del río San Juan y tributarios comparados con los valores ISQG y PEL de la guía canadiense de sedimento

Cuerpo de agua	Código	As (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Cu (mg/kg)
Río San Juan	RSjua-01	100	217	93	0,44542	13,0	23
Quebrada sin nombre 16	QSnom-16	8,16	16,3	18	0,07559	0,094	3,9
Río San Juan	RSjua-06	23,1	116	150	0,94875	4,45	24
	SJ-02A	14,8	55,1	85	0,38374	2,30	14
Río Quicay	RQuic-01	27,2	37,1	55	0,40387	0,601	9,1
Río San Juan	SJ-3	35,0	251	135	0,66824	4,23	23
	RSjua-07	205	870	1816	4,4594	5,01	486
	SJ-12	274	799	3423	75,279	9,05	886
Río Ragra	SJ-10	410	1974	6373	34,961	4,7	662
Quebrada sin nombre 02	QSnom-02	80,7	29,8	72	0,6093	< 0,010	8
Río San Juan	RSjua-08	480	888	5908	23,106	5,27	449
	RSjua-08A	539	772	27869	170,29	2,04	1 941
Quebrada sin nombre 12	QSnom-12	16,5	75,1	63	0,3426	2,84	22
Río Huarupampa	RHuar-01	22,6	15,1	44	0,30446	< 0,010	3,8
	RHuar-02	40,1	269	57	0,40866	10,4	22
	RHuar-04	58,5	373	85	0,46449	14,9	39
	RHuar-05	63,7	364	75	0,48046	14,3	38
Río Gashan	RGash-01	56,6	199	80	0,65986	6,21	37
	RGash-02	13	18,5	55	0,47251	< 0,010	9,5
	SJ-16	26,1	125	169	0,57744	3,13	37
Río San Juan	RSjua-08C	167	282	8816	35,671	10,3	412
	SJ-18	200	433	13639	72,898	14,5	699
	RSjua1	135	365	8920	26,810	3,55	383
Río San Juan	RSjua-12	226	1291	6309	12,929	5,5	932
	RSjua-13	142	457	4413	11,637	5,69	516
Rio Blanco	RBlan-01	13,5	16,2	48	0,40111	< 0,010	7,2
	RBlan-02	14	17,8	53	0,44842	< 0,010	9,3
Río San Juan	RSjua-16	145	427	5987	13,080	5,48	595
	RSjua-17	68,2	567	1070	35,702	8,57	183
	RSjua-17A	153	2522	4678	57,475	11,8	594
	RSjua-18	101	1019	2358	58,525	5,99	310
	RSjua-20A	794	8441	28159	49,174	4,12	4235
	RSjua-19	245	2583	9692	26,072	17,6	1865
	SJ-35	160	1082	3760	12,473	18,6	510

Cuerpo de agua	Código	As (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Cu (mg/kg)
CEQG-SQG	ISQG	5,9	35	123	0,6	0,17	35,7
	PEL	17	91,3	315	3,5	0,486	197

CEQG-SQG: Canadian Environmental Quality Guidelines- *Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life for Fresh water*

: Superan los valores ISQG de la guía canadiense de sedimento
: Superan los valores PEL de la guía canadiense de sedimento

6.3.2.2 Cálculo de índice de geoacumulación

Los resultados de índices de geoacumulación (Igeo) se muestran en la Tabla 6.18, los cuales varían desde -9,9 a 7,97 para 12 elementos evaluados. Los valores negativos de los metales, según la clasificación de Müller (1969), indicaron que el sedimento no está contaminado con el metal que corresponda.

Tabla 6.18. Índice de geoacumulación (Igeo) de metales y metaloides en los sedimentos del río San Juan y tributarios

Código	Índices de geoacumulación (Igeo)											
	Fe	Cu	Zn	Pb	Hg	Cd	As	Ba	Mn	Mo	Ag	Se
RSjua-01	-0,92	0,03	-0,49	2,69	0,44	-1,27	1,28	-1,58	-1,23	-2,94	-0,30	-1,43
QSnom-16	-1,95	-2,53	-2,86	-1,05	-6,67	-3,83	-2,34	-3,14	-3,63	-2,91	-3,91	-2,21
RSjua-06	-0,24	0,09	0,20	1,79	-1,10	-0,18	-0,84	-0,72	-0,99	-2,14	-3,48	-0,60
SJ-02A	-0,86	-0,69	-0,62	0,71	-2,06	-1,49	-1,48	-1,90	-1,54	-2,13	-4,02	-1,28
RQuic-01	0,19	-1,31	-1,25	0,14	-3,99	-1,41	-0,60	-1,35	-1,12	-0,98	-4,67	-0,50
SJ-3	-0,72	0,03	0,05	2,90	-1,18	-0,69	-0,24	-0,92	0,38	-1,35	-3,56	-1,22
RSjua-07	0,67	4,43	3,80	4,69	-0,93	2,05	2,31	-1,61	0,46	-1,88	-1,85	-1,34
SJ-12	1,32	5,29	4,71	4,57	-0,08	6,13	2,73	-1,88	1,65	-1,07	-0,59	-1,28
SJ-10	1,96	4,87	5,61	5,87	-1,03	5,02	3,31	-1,27	2,90	-0,69	-0,08	-0,86
QSnom-02	0,09	-1,50	-0,86	-0,17	-9,90	-0,82	0,97	-0,48	0,98	-1,61	-4,12	-0,99
RSjua-08	1,65	4,31	5,50	4,72	-0,86	4,43	3,54	-1,66	2,20	-0,71	0,13	-1,09
RSjua-08A	2,95	6,43	7,74	4,52	-2,23	7,31	3,71	-0,91	2,93	0,20	-2,00	-1,51
QSnom-12	-1,20	-0,04	-1,05	1,16	-1,75	-1,65	-1,32	-1,84	-2,53	-2,86	-4,24	-1,20
RHuar-01	-0,70	-2,57	-1,57	-1,16	-9,90	-1,82	-0,87	-1,73	-0,80	-1,02	-5,55	-1,46
RHuar-02	-1,15	-0,04	-1,20	3,00	0,12	-1,40	-0,04	-1,93	-0,87	-1,99	-0,78	-1,46
RHuar-04	-0,98	0,79	-0,62	3,47	0,64	-1,21	0,50	-1,42	-0,94	-1,97	-0,72	-1,32
RHuar-05	-0,99	0,75	-0,80	3,44	0,58	-1,16	0,63	-1,89	-1,04	-1,99	0,46	-1,42
RGash-01	-0,68	0,71	-0,71	2,56	-0,62	-0,70	0,46	-1,19	-0,19	-1,02	-2,50	-1,11
RGash-02	-0,99	-1,25	-1,25	-0,86	-9,90	-1,19	-1,67	-0,79	-0,77	-1,23	-7,10	-1,19
SJ-16	-1,18	0,71	0,37	1,89	-1,61	-0,90	-0,66	-1,15	-1,14	-1,65	-3,32	-1,78
RSjua-08C	0,95	4,19	6,08	3,07	0,11	5,05	2,02	-0,90	2,35	-0,59	-1,95	-1,16
SJ-18	1,82	4,95	6,71	3,69	0,60	6,08	2,28	-0,72	2,57	-0,34	-1,76	-0,84
RSjua1	1,01	4,08	6,09	3,44	-1,43	4,64	1,71	-0,44	1,53	-0,73	-2,81	-1,14
RSjua-12	0,56	5,37	5,59	5,26	-0,80	3,59	2,45	0,91	3,25	-0,04	-1,98	-0,30
RSjua-13	0,19	4,51	5,08	3,76	-0,75	3,44	1,78	-0,11	2,71	-0,27	-2,67	-0,34
RBlan-01	-1,03	-1,65	-1,45	-1,05	-9,90	-1,42	-1,61	-0,80	-0,84	-1,04	-6,40	-1,17
RBlan-02	-0,97	-1,28	-1,30	-0,92	-9,90	-1,26	-1,56	-0,79	-0,90	-1,25	-6,95	-1,20
RSjua-16	0,31	4,72	5,52	3,67	-0,80	3,60	1,81	-0,03	3,35	-0,26	-2,28	-0,12
RSjua-17	-0,30	3,02	3,03	4,08	-0,16	5,05	0,73	0,30	-0,02	-0,88	-1,89	-0,95
RSjua-17A	0,77	4,72	5,16	6,23	0,30	5,74	1,89	2,87	1,19	-0,06	0,29	-0,83
RSjua-18	0,18	3,78	4,17	4,92	-0,68	5,77	1,29	1,46	0,31	-0,51	-1,24	-0,75
RSjua-20A	2,62	7,55	7,75	7,97	-1,22	5,51	4,27	1,17	2,28	1,65	1,67	-0,50
RSjua-19	1,31	6,37	6,21	6,26	0,88	4,60	2,57	2,24	1,75	0,58	0,14	-0,33

Código	Índices de geoacumulación (Igeo)											
	Fe	Cu	Zn	Pb	Hg	Cd	As	Ba	Mn	Mo	Ag	Se
SJ-35	0,56	4,50	4,85	5,01	0,96	3,54	1,96	0,45	0,25	-0,27	-0,75	-0,54

6.3.2.3 Cálculo de factor de enriquecimiento

Los resultados de factor de enriquecimiento (EF) se presentan en la Tabla 6.19, se observa que los mayores EF varían para Cu (de 0,27 a 33,3), Zn (de 0,37 a 37), Pb (de 0,73 a 43,8) y Cd (de 0,27 a 48,0); en comparación al resto de elementos.

Tabla 6.19. Factor de enriquecimiento (EF) de metales y metaloides en los sedimentos del río San Juan y tributarios

Código	Factor de enriquecimiento (FE)											
	Fe	Cu	Zn	Pb	Hg	Cd	As	Ba	Mn	Mo	Ag	Se
RSjua-01	1	1,93	1,35	12,24	2,58	0,79	4,60	0,63	0,81	0,25	1,54	0,70
QSnom-16	1	0,67	0,53	1,87	0,04	0,27	0,76	0,44	0,31	0,51	0,26	0,83
RSjua-06	1	1,26	1,36	4,08	0,55	1,04	0,66	0,72	0,60	0,27	0,11	0,78
SJ-02A	1	1,13	1,18	2,98	0,44	0,65	0,65	0,49	0,62	0,42	0,11	0,75
RQuic-01	1	0,35	0,37	0,96	0,05	0,33	0,58	0,34	0,40	0,44	0,03	0,62
SJ-3	1	1,68	1,70	12,28	0,73	1,02	1,40	0,87	2,15	0,65	0,14	0,70
RSjua-07	1	13,55	8,74	16,27	0,33	2,61	3,13	0,21	0,87	0,17	0,17	0,25
SJ-12	1	15,74	10,50	9,53	0,38	28,07	2,67	0,11	1,26	0,19	0,27	0,17
SJ-10	1	7,52	12,50	15,04	0,13	8,33	2,55	0,11	1,92	0,16	0,24	0,14
QSnom-02	1	0,33	0,52	0,83	0,00	0,53	1,84	0,67	1,86	0,31	0,05	0,47
RSjua-08	1	6,34	14,41	8,42	0,18	6,85	3,71	0,10	1,46	0,19	0,35	0,15
RSjua-08A	1	11,14	27,63	2,97	0,03	20,52	1,69	0,07	0,98	0,15	0,03	0,05
QSnom-12	1	2,23	1,11	5,12	0,68	0,73	0,92	0,64	0,40	0,32	0,12	1,00
RHuar-01	1	0,27	0,55	0,73	0,00	0,46	0,89	0,49	0,94	0,81	0,03	0,59
RHuar-02	1	2,16	0,97	17,75	2,41	0,84	2,16	0,58	1,22	0,56	1,30	0,81
RHuar-04	1	3,42	1,29	21,93	3,08	0,85	2,81	0,74	1,03	0,51	1,20	0,79
RHuar-05	1	3,34	1,14	21,47	2,97	0,89	3,07	0,53	0,97	0,50	2,73	0,74
RGash-01	1	2,63	0,98	9,50	1,04	0,99	2,20	0,71	1,41	0,79	0,28	0,74
RGash-02	1	0,84	0,84	1,09	0,00	0,87	0,63	1,15	1,16	0,85	0,01	0,87
SJ-16	1	3,72	2,94	8,44	0,74	1,22	1,44	1,02	1,03	0,72	0,23	0,66
RSjua-08C	1	9,46	34,94	4,34	0,56	17,18	2,10	0,28	2,64	0,34	0,13	0,23
SJ-18	1	8,78	29,57	3,65	0,43	19,21	1,37	0,17	1,68	0,22	0,08	0,16
RSjua1	1	8,44	33,95	5,40	0,18	12,40	1,63	0,37	1,44	0,30	0,07	0,23
RSjua-12	1	28,07	32,81	26,09	0,39	8,17	3,73	1,28	6,46	0,66	0,17	0,55
RSjua-13	1	19,98	29,51	11,87	0,52	9,46	3,01	0,81	5,71	0,73	0,14	0,69

Código	Factor de enriquecimiento (FE)											
	Fe	Cu	Zn	Pb	Hg	Cd	As	Ba	Mn	Mo	Ag	Se
RBlan-01	1	0,65	0,75	0,99	0,00	0,76	0,67	1,18	1,14	0,99	0,02	0,91
RBlan-02	1	0,81	0,80	1,04	0,00	0,82	0,67	1,14	1,05	0,83	0,02	0,85
RSjua-16	1	21,29	36,99	10,25	0,46	9,82	2,84	0,79	8,24	0,67	0,17	0,74
RSjua-17	1	9,98	10,08	20,75	1,10	40,88	2,04	1,52	1,21	0,67	0,33	0,64
RSjua-17A	1	15,39	20,94	43,85	0,72	31,26	2,17	4,29	1,34	0,56	0,71	0,33
RSjua-18	1	12,12	15,92	26,73	0,55	48,03	2,16	2,44	1,09	0,62	0,37	0,53
RSjua-20A	1	30,45	34,96	40,71	0,07	7,42	3,12	0,36	0,79	0,51	0,51	0,12
RSjua-19	1	33,34	29,92	30,98	0,74	9,78	2,40	1,90	1,36	0,60	0,44	0,32
SJ-35	1	15,37	19,57	21,88	1,32	7,89	2,64	0,93	0,81	0,57	0,40	0,47

6.3.2.4 Cálculo del factor de contaminación

Los resultados de factor de contaminación (CF) se muestran en la Tabla 6.20, donde los mayores CF para Cu (de 0,25 hasta 281,45), Zn (de 0,21 hasta 323,19), Pb (de 0,67 hasta 376,36) y Cd (de 0,11 hasta 237,50); en comparación con el Fe (de 0,39 hasta 11,58), Hg (de 0 hasta 2,92), As (de 0,30 hasta 28,89), Ba (de 0,17 hasta 11), Mn (de 0,12 hasta 15,31), Mo (de 0,20 hasta 4,72), Ag (de 0,01 hasta 4,76) y Se (de 0,32 hasta 1).

Tabla 6.20. Factor de contaminación (CF) de metales y metaloides en los sedimentos del río San Juan y tributarios

Código	Factor de contaminación (CF)											
	Fe	Cu	Zn	Pb	Hg	Cd	As	Ba	Mn	Mo	Ag	Se
RSjua-01	0,8	1,5	1,1	9,7	2,0	0,6	3,6	0,5	0,6	0,2	1,2	0,6
QSnom-16	0,4	0,3	0,2	0,7	0,0	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,3
RSjua-06	1,3	1,6	1,7	5,2	0,7	1,3	0,8	0,9	0,8	0,3	0,1	1,0
SJ-02A	0,8	0,9	1,0	2,5	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5	0,3	0,1	0,6
RQuic-01	1,7	0,6	0,6	1,7	0,1	0,6	1,0	0,6	0,7	0,8	0,1	1,1
SJ-3	0,9	1,5	1,5	11,2	0,7	0,9	1,3	0,8	2,0	0,6	0,1	0,6
RSjua-07	2,4	32,3	20,8	38,8	0,8	6,2	7,5	0,5	2,1	0,4	0,4	0,6
SJ-12	3,7	58,9	39,3	35,6	1,4	105,0	10,0	0,4	4,7	0,7	1,0	0,6
SJ-10	5,9	44,0	73,1	88,0	0,7	48,8	14,9	0,6	11,2	0,9	1,4	0,8
QSnom-02	1,6	0,5	0,8	1,3	0,0	0,8	2,9	1,1	3,0	0,5	0,1	0,8
RSjua-08	4,7	29,8	67,8	39,6	0,8	32,2	17,5	0,5	6,9	0,9	1,6	0,7
RSjua-08A	11,6	129,0	319,9	34,4	0,3	237,5	19,6	0,8	11,4	1,7	0,4	0,5
QSnom-12	0,7	1,5	0,7	3,3	0,4	0,5	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,7
RHuar-01	0,9	0,3	0,5	0,7	0,0	0,4	0,8	0,5	0,9	0,7	0,0	0,5
RHuar-02	0,7	1,5	0,7	12,0	1,6	0,6	1,5	0,4	0,8	0,4	0,9	0,5
RHuar-04	0,8	2,6	1,0	16,6	2,3	0,6	2,1	0,6	0,8	0,4	0,9	0,6
RHuar-05	0,8	2,5	0,9	16,2	2,2	0,7	2,3	0,4	0,7	0,4	2,1	0,6
RGash-01	0,9	2,5	0,9	8,9	1,0	0,9	2,1	0,7	1,3	0,7	0,3	0,7
RGash-02	0,8	0,6	0,6	0,8	0,0	0,7	0,5	0,9	0,9	0,6	0,0	0,7
SJ-16	0,7	2,5	1,9	5,6	0,5	0,8	0,9	0,7	0,7	0,5	0,1	0,4
RSjua-08C	2,9	27,4	101,2	12,6	1,6	49,8	6,1	0,8	7,6	1,0	0,4	0,7
SJ-18	5,3	46,5	156,5	19,3	2,3	101,7	7,3	0,9	8,9	1,2	0,4	0,8
RSjua1	3,0	25,5	102,4	16,3	0,6	37,4	4,9	1,1	4,3	0,9	0,2	0,7
RSjua-12	2,2	61,9	72,4	57,6	0,9	18,0	8,2	2,8	14,3	1,5	0,4	1,2

Código	Factor de contaminación (CF)											
	Fe	Cu	Zn	Pb	Hg	Cd	As	Ba	Mn	Mo	Ag	Se
RSjua-13	1,7	34,3	50,6	20,4	0,9	16,2	5,2	1,4	9,8	1,2	0,2	1,2
RBlan-01	0,7	0,5	0,6	0,7	0,0	0,6	0,5	0,9	0,8	0,7	0,0	0,7
RBlan-02	0,8	0,6	0,6	0,8	0,0	0,6	0,5	0,9	0,8	0,6	0,0	0,7
RSjua-16	1,9	39,5	68,7	19,0	0,9	18,2	5,3	1,5	15,3	1,3	0,3	1,4
RSjua-17	1,2	12,2	12,3	25,3	1,3	49,8	2,5	1,8	1,5	0,8	0,4	0,8
RSjua-17A	2,6	39,5	53,7	112,4	1,8	80,2	5,6	11,0	3,4	1,4	1,8	0,8
RSjua-18	1,7	20,6	27,1	45,4	0,9	81,6	3,7	4,1	1,9	1,1	0,6	0,9
RSjua-20A	9,2	281,5	323,2	376,4	0,6	68,6	28,9	3,4	7,3	4,7	4,8	1,1
RSjua-19	3,7	123,9	111,2	115,2	2,8	36,4	8,9	7,1	5,0	2,2	1,7	1,2
SJ-35	2,2	33,9	43,2	48,2	2,9	17,4	5,8	2,1	1,8	1,2	0,9	1,0

6.3.2.5 Cálculo del riesgo ecológico potencial

Los resultados del índice de riesgo ecológico potencial (PER) se muestran en la Tabla 6.21. El factor de respuesta estandarizado para la toxicidad de los metales pesados, que fue elaborado por Hakanson (1980) y adoptado como criterio de evaluación en la presente EAC PRSJDU. Respectivamente, los factores correspondientes basados en su toxicidad fueron: Cd (30), Cu (5), Pb (5), Zn (1), Hg (40) y As (10).

Tabla 6.21. Factor de enriquecimiento (FE) de metales en los sedimentos del río San Juan y tributarios

Código	Índices de riesgo ecológico potencial por metal						Riesgo ecológico potencial de múltiples metales (PER)
	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As	
RSjua-01	7,64	1,07	48,38	18,64	81,50	36,38	193,61
QSnom-16	1,30	0,21	3,63	3,16	0,59	2,97	11,86
RSjua-06	7,98	1,72	25,86	39,70	27,90	8,40	111,56
SJ-02A	4,65	0,98	12,28	16,06	14,42	5,38	53,77
RQuic-01	3,02	0,63	8,27	16,90	3,77	9,90	42,49
SJ-3	7,64	1,55	55,96	27,96	26,52	12,73	132,36
RSjua-07	161,49	20,84	193,95	186,59	31,41	74,58	668,87
SJ-12	294,41	39,29	178,13	3149,75	56,74	99,68	3817,99
SJ-10	219,98	73,14	440,07	1462,80	29,47	149,16	2374,62
QSnom-02	2,66	0,83	6,64	25,49	0,06	29,36	65,04
RSjua-08	149,20	67,81	197,97	966,78	33,04	174,62	1589,41
RSjua-08A	644,98	319,86	172,11	7125,10	12,79	196,09	8470,92
QSnom-12	7,31	0,72	16,74	14,33	17,81	6,00	62,92
RHuar-01	1,26	0,50	3,37	12,74	0,06	8,22	26,16
RHuar-02	7,31	0,65	59,97	17,10	65,20	14,59	164,83
RHuar-04	12,96	0,98	83,15	19,43	93,42	21,28	231,22
RHuar-05	12,63	0,86	81,15	20,10	89,66	23,17	227,57
RGash-01	12,29	0,92	44,36	27,61	38,93	20,59	144,71
RGash-02	3,16	0,63	4,12	19,77	0,06	4,73	32,47
SJ-16	12,29	1,94	27,87	24,16	19,62	9,50	95,38
RSjua-08C	136,90	101,18	62,87	1492,51	64,58	60,75	1918,80

Código	Índices de riesgo ecológico potencial por metal						Riesgo ecológico potencial de múltiples metales (PER)
	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As	
SJ-18	232,27	156,54	96,53	3050,13	90,91	72,76	3699,13
RSjua1	127,27	102,38	81,37	1121,76	22,26	49,11	1504,14
RSjua-12	309,70	72,41	287,81	540,96	34,48	82,22	1327,58
RSjua-13	171,46	50,65	101,88	486,90	35,67	51,66	898,23
RBlan-01	2,39	0,55	3,61	16,78	0,06	4,91	28,31
RBlan-02	3,09	0,61	3,97	18,76	0,06	5,09	31,59
RSjua-16	197,71	68,71	95,19	547,28	34,36	52,75	996,01
RSjua-17	60,81	12,28	126,40	1493,81	53,73	24,81	1771,84
RSjua-17A	197,38	53,69	562,24	2404,81	73,98	55,66	3347,77
RSjua-18	103,01	27,06	227,17	2448,74	37,55	36,74	2880,29
RSjua-20A	1407,26	323,19	1881,80	2057,49	25,83	288,85	5984,42
RSjua-19	619,72	111,24	575,84	1090,88	110,34	89,13	2597,16
SJ-35	169,47	43,15	241,22	521,88	116,61	58,21	1150,54

6.3.3 Comunidades hidrobiológicas

A continuación, se presentan los resultados perifiton (microalgas y microorganismos) y macroinvertebrados bentónicos obtenidos en los puntos del río San Juan y tributarios.

6.3.3.1 Perifiton

a) Composición y riqueza

En agosto (temporada seca) de 2020 se registraron 326 especies de perifiton, de las cuales 294 son de perifiton vegetal, los cuales están distribuidos en 7 phyla. El phylum Bacillariophyta fue el más diverso con 137 especies (47 %), seguido de Chlorophyta con 66 especies (23 %), Cyanobacteria con 47 especies (16 %), Charophyta con 30 especies (10 %), Euglenozoa con 9 especies (3 %), Ochrophyta con 4 especies (1 %), Cryptophyta con 1 especie. El phylum Bacillariophyta conforma el 47 % del número total de especies registradas, de los cuales *Navicula* y *Nitzschia* representó la mayor riqueza con 12 especies (4 %), seguido de *Achnanthidium* y *Gomphonema* con el 3 % cada una (Figura 6.27). En el Anexo 2.1 (RRE-035-2020-STEC) se muestra a detalle lo antes descrito.

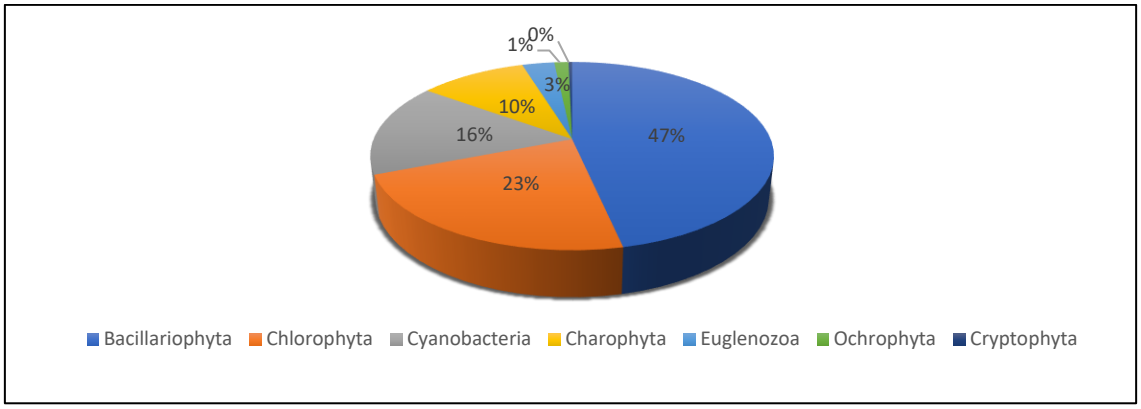


Figura 6.27. Riqueza absoluta de especies de perifiton vegetal según especie en los cuerpos de agua del área de estudio evaluada

El punto de muestreo con el mayor número de especies (78) fue RSjua-14 (río San Juan) y las de menor riqueza corresponden a los puntos de muestreo: RPari-02 (río Paria) y SJ-10 (río Ragra), con 5 y 8 especies respectivamente.

En la Figura 6.28 se comparó la riqueza de especies de perifiton vegetal con la distribución altitudinal de los puntos de muestreo evaluados y no se encontraron diferencias; por lo que, los ríos y quebradas evaluados están asociados a los aportes bióticos y abióticos de la zona ribereña y esto condiciona el desarrollo de las comunidades acuáticas.

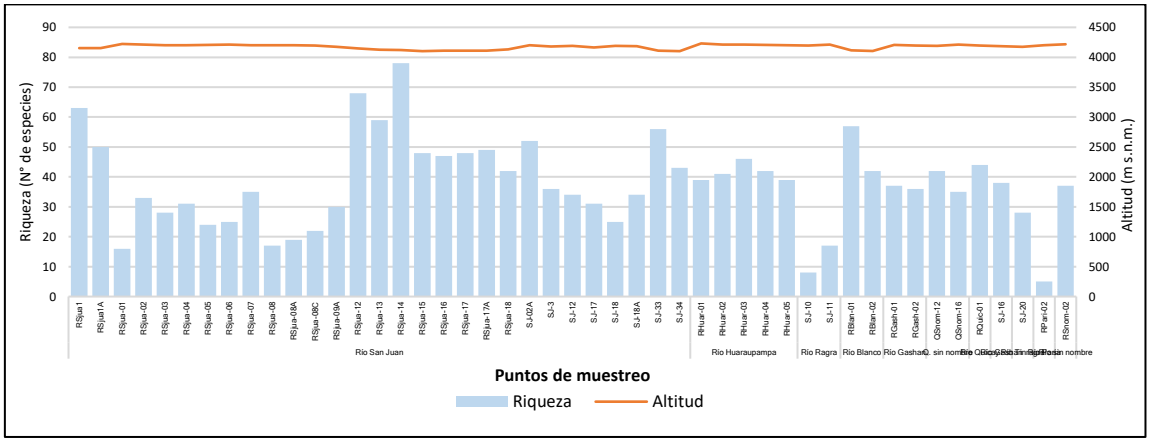


Figura 6.28. Número de especies en relación con el gradiente altitudinal por punto de muestreo

En todos los puntos de muestreo se evidenció la dominancia del phylum Bacillariophyta sobre los demás phyla, seguido está el phylum Chlorophyta, Cyanobacteria y ocasionalmente aparecen los demás phyla (Figura 6.29).

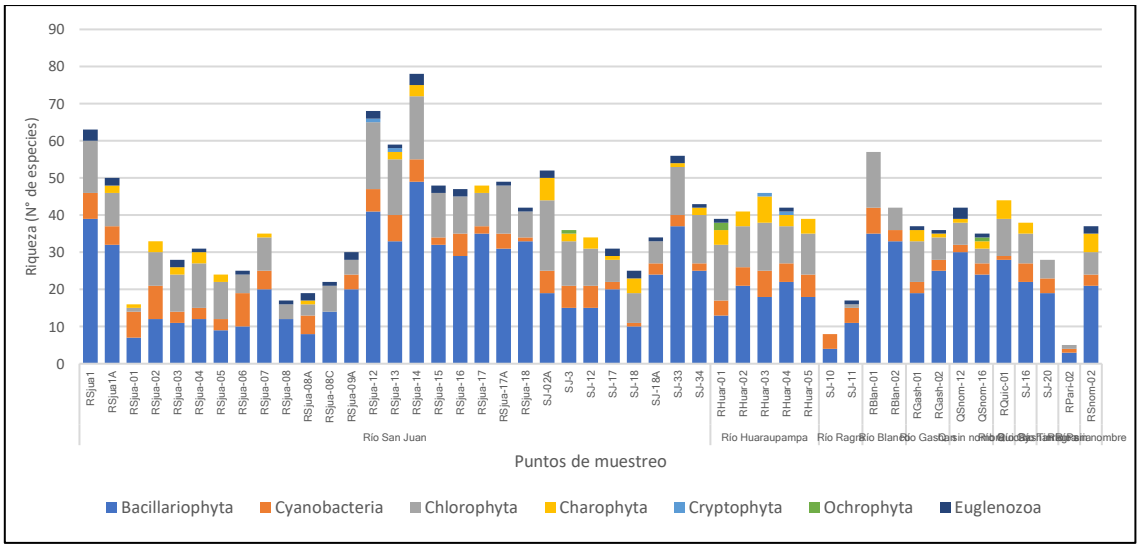


Figura 6.29. Riqueza de especies de perifiton vegetal por phylum en los puntos de muestreo

b) Abundancia

La abundancia total en la temporada de muestreo fue de 26736272 organismos de los cuales 26733490 son de perifiton vegetal, los cuales pertenecen a los phyla Bacillariophyta (24023905 organismos; 90 %), Chlorophyta (1560535 organismos; 6 %), Cyanobacteria (957998 organismos). Los demás phyla: Euglenozoa (111183 organismos), Charophyta (63669 organismos), Ochrophyta (11200 organismos) y Cryptophyta (5000 organismos) representaron menos del 1 %, Figura 6.30 y Anexo 2.1 (RRE-035-2020-STEC).

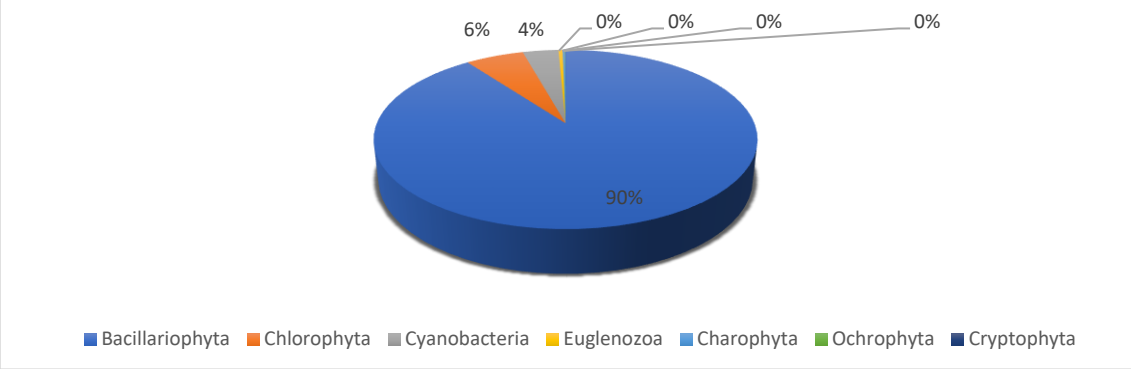


Figura 6.30. Abundancia relativa de la comunidad de perifiton vegetal según orden en los cuerpos de agua del área de estudio evaluada

El punto de muestreo con mayor densidad fue RBlan-01 (río Blanco), con 27573 organismos/cm^2; mientras que, el menor número de organismos se registró en los puntos de muestreo RSjua-08A y RPari-02 (río Paria) con 671 y 68 organismos/cm^2 respectivamente (Figura 6.31).

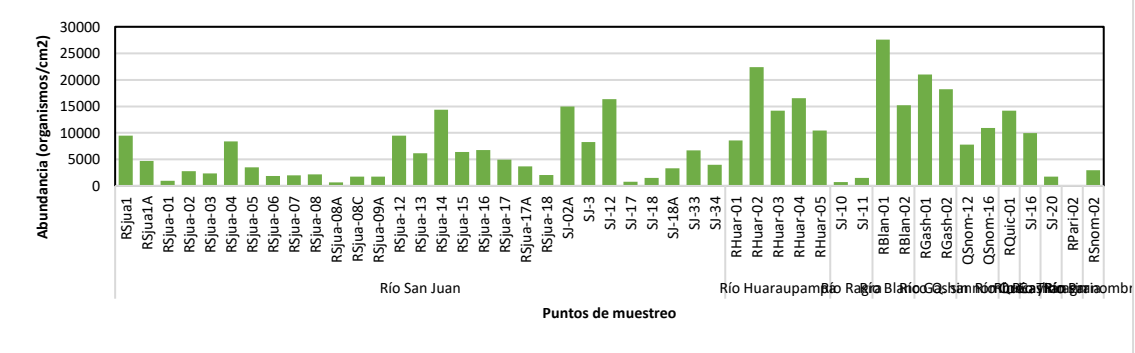


Figura 6.31. Abundancia total de organismos/cm^2 de perifiton vegetal en agosto de 2020

En la mayoría de los puntos de muestreo se evidenció la dominancia del phylum Bacillariophyta sobre los demás phyla, excepto en los puntos de muestreo de individuos del phylum Cyanobacteria (Figura 6.32).

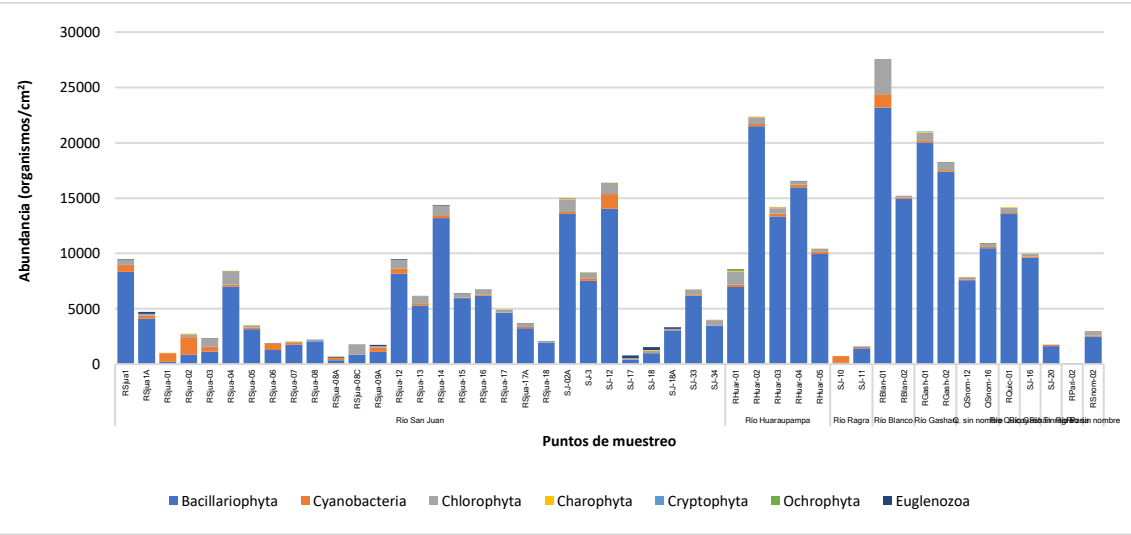


Figura 6.32. Abundancia de perifiton vegetal

c) Estructura trófica

De las 326 especies identificadas, el phylum Bacillariophyta fue el dominante en la temporada seca. En esta temporada, 137 especies pertenecen al phylum Bacillariophyta y está representado por 24023905 organismos; además, del total de especies vegetales, se tomaron 20 especies que tuvieron hasta 81 % de la abundancia relativa encontrándose a la especie *Encyonema silesiacum* (Bacillariophyta) como la más abundante (12744307; 48 del total), tal como se detalla en la Tabla 6.17.

Tabla 6.22. Número de especies

Temporada Seca				
N°	Phylum	Especie	Total (organismos)	A.R.
1	Bacillariophyta	*Encyonema silesiacum*	12744307	48
2	Bacillariophyta	*Fragilaria capuccina*	2103177	8
3	Bacillariophyta	*Nitzschia gracilis*	1408817	5
4	Bacillariophyta	*Achnanthidium* cf. *exilis*	561600	2
5	Bacillariophyta	*Achnanthidium* cf. *atomus*	450697	2
6	Bacillariophyta	*Fragilaria tenera*	434941	2
7	Bacillariophyta	*Epithemia adnata*	395996	1
8	Bacillariophyta	*Meridion circulare*	391077	1
9	Bacillariophyta	*Encyonema minutum*	355126	1
10	Bacillariophyta	*Achnanthidium minutissimum*	324319	1
11	Bacillariophyta	*Staurosira* sp. 1PAS	321507	1
12	Bacillariophyta	*Planothidium frequentissimum*	308854	1
13	Bacillariophyta	*Encyonema minutiforme*	306827	1
14	Bacillariophyta	*Ulnaria ulna*	256787	1
15	Bacillariophyta	*Ulnaria acus*	238854	1
16	Bacillariophyta	*Staurosira* sp. 2PAS	219161	1
17	Chlorophyta	*Messastrum gracile*	205822	1
18	Chlorophyta	*Ankistrodesmus falcatus*	197924	1
19	Chlorophyta	*Ankistrodesmus fusiformis*	192807	1
20	Bacillariophyta	*Diatoma tenuis*	190225	1

A.R.: Abundancia Relativa

: Phylum Bacillariophyta, : Phylum Chlorophyta

d) Diversidad alfa

En el perifiton vegetal, la dominancia de Simpson varió de 0,2293 a 0,9304 dando valores bajos en algunos puntos de muestreo, lo que indica la presencia de especies dominantes. Asimismo, los valores de equidad de Pielou fluctuaron de 0,2045 a 0,8646 en temporada seca; es decir, la comunidad del perifiton vegetal en los puntos de muestreo presentó una distribución desde poco homogénea (valores cercanos a 0) a muy homogénea en los valores cercanos a 1 (Tabla 6.23).

Tabla 6.23. Diversidad alfa

Puntos de muestreo	Riqueza (S)	Abundancia (N)	Equidad de Pielou (J')	Dominancia de Simpson (1-Lambda')
RSjua1	63	710500	0.6553	0.6553

Puntos de muestreo	Riqueza (S)	Abundancia (N)	Equidad de Pielou (J')	Dominancia de Simpson (1-Lambda')
RSjua1A	50	354932	0,6469	0,8497
RSjua-01	16	75550	0,7752	0,8242
RSjua-02	33	207550	0,7964	0,8941
RSjua-03	28	175880	0,7999	0,91
RSjua-04	31	631560	0,4707	0,5596
RSjua-05	24	264281	0,5398	0,742
RSjua-06	25	141950	0,6511	0,7845
RSjua-07	35	152350	0,6943	0,8512
RSjua-08	17	163700	0,5922	0,7279
RSjua-08A	19	50323	0,8222	0,8782
RSjua-08C	22	132720	0,7743	0,8415
RSjua-09A	30	129900	0,8646	0,9304
RSjua-12	68	711550	0,6818	0,8627
RSjua-13	59	462550	0,6025	0,773
RSjua-14	78	1078045	0,6023	0,8265
RSjua-15	48	480150	0,6577	0,8359
RSjua-16	47	505700	0,5885	0,7323
RSjua-17	48	371192	0,5975	0,7634
RSjua-17A	49	276950	0,7656	0,9041
RSjua-18	42	154080	0,6821	0,8455
SJ-02A	52	1123100	0,4997	0,6691
SJ-3	36	619200	0,5059	0,682
SJ-12	34	1228840	0,3715	0,4796
SJ-17	31	59631	0,8324	0,9194
SJ-18	25	115200	0,7668	0,8692
SJ-18A	34	249936	0,5984	0,7457
SJ-33	56	502175	0,6242	0,8051
SJ-34	43	297800	0,6771	0,8049
RHuar-01	39	642000	0,4689	0,5782
RHuar-02	41	1678350	0,3739	0,4674
RHuar-03	46	1064350	0,2045	0,2293
RHuar-04	42	1240250	0,2935	0,3687
RHuar-05	39	783400	0,275	0,3303
SJ-10	8	54000	0,7881	0,7563
SJ-11	17	115926	0,6911	0,8044
RBlan-01	57	2068000	0,6534	0,8374
RBlan-02	42	1141312	0,5297	0,74
RGash-01	37	1573740	0,5327	0,7044
RGash-02	36	1368561	0,3783	0,4539
QSnom-12	42	585359	0,6369	0,8513
QSnom-16	35	819550	0,751	0,8848
RQuic-01	44	1064305	0,3904	0,5002
SJ-16	38	747842	0,3865	0,4725
SJ-20	28	132400	0,3402	0,3794
RPari-02	5	5100	0,7233	0,5959
RSnom-02	37	221750	0,6933	0,8557

6.3.3.2 Comunidades de macroinvertebrados bentónicos

a) Riqueza

En la subcuenca del río San Juan la comunidad de macroinvertebrados bentónicos estuvo representada por 30 taxa agrupadas en 5 phyla, 10 clases y 15 órdenes. El orden Díptera registró la mayor riqueza con 9 taxa, seguida por los órdenes Trichoptera y Coleoptera con 3 taxa cada una (Figura 6.33). En el Anexo 2.1 (RRE-035-2020-STEC) se presenta el registro completo de macroinvertebrados bentónicos.

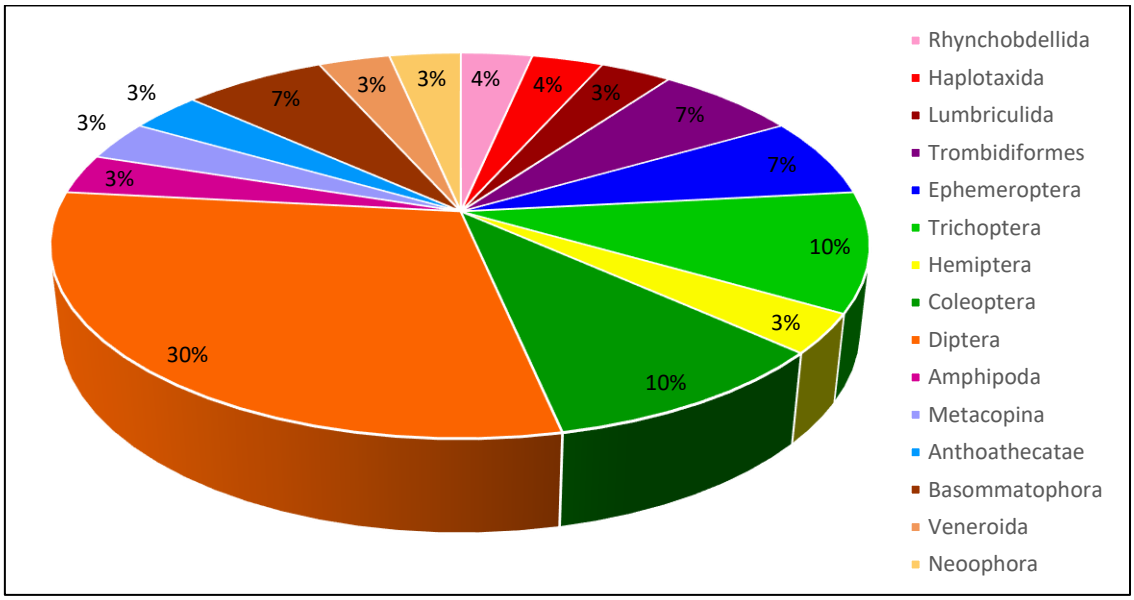


Figura 6.33. Riqueza de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por orden

En la Tabla 6.24 se presentan los resultados de la riqueza de macroinvertebrados bentónicos por punto de muestreo. Se observó que el punto SJ-20, ubicado en el río Tinragra, registró la mayor riqueza con 14 taxa; mientras que, el punto RSjua-08A, ubicado en el río San Juan, registró la menor riqueza con 2 taxa.

Tabla 6.24. Riqueza de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por orden

Cuerpo de agua	Punto	Rhynchobdellida	Haplotaxida	Lumbriculida	Trombidiformes	Ephemeroptera	Trichoptera	Hemiptera	Coleoptera	Diptera	Amphipoda	Metacopina	Anthoathecatae	Basommatophora	Veneroida	Neoophora	Riqueza de especies (S)
R. Paria	RPari-02	0	1	1	1	0	0	1	1	3	1	0	1	0	0	1	11
R. San Juan	RSjua-01	0	1	1	1	1	3	0	1	2	1	0	0	1	0	1	13
R. sin nombre 02	RSnom-02	1	0	1	1	1	0	1	1	2	1	0	0	0	0	1	10
R. San Juan	RSjua-02	0	1	1	1	1	1	0	1	2	1	0	0	0	0	1	10
R. San Juan	RSjua-03	1	1	1	1	1	3	0	1	2	1	0	0	0	0	1	13
R. San Juan	RSjua-04	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	9
R. San Juan	RSjua-05	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	2	0	1	8
Q. sin nombre 16	QSnom-16	0	1	0	1	0	1	0	1	2	0	0	1	1	0	1	9
R. San Juan	RSjua-06	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	8
R. San Juan	SJ-02A	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	6
R. Quicay	RQuic-01	1	0	0	0	0	0	1	1	2	1	0	0	0	1	0	7
R. San Juan	SJ-3	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	7
R. San Juan	RSjua-07	1	0	1	0	0	0	0	1	2	1	1	0	0	0	1	8
R. San Juan	SJ-12	1	0	1	0	0	0	0	1	3	1	0	0	0	0	1	8
R. Ragra	SJ-10	0	0	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	4
R. San Juan	RSjua-08	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	3
R. San Juan	RSjua-08A	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Q. sin nombre 12	QSnom-12	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	7
R. San Juan	SJ-17	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	3
R. Huaraupampa	RHuar-01	0	1	1	2	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	1	9
R. Huaraupampa	RHuar-02	0	0	0	0	2	2	0	1	3	1	0	0	0	0	1	10
R. Huaraupampa	RHuar-03	0	1	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	1	5
R. Huaraupampa	RHuar-04	0	1	1	1	0	0	0	1	3	1	0	1	0	0	1	10
R. Huaraupampa	RHuar-05	0	1	0	1	0	0	1	1	3	1	0	1	0	0	1	10
R. Gashan	RGash-01	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	1	5
R. Gashan	RGash-02	0	1	0	0	1	0	0	1	3	0	0	0	0	0	1	7
R. Gashan	SJ-16	1	0	1	0	1	0	1	1	3	1	0	0	1	0	1	11
R. San Juan	RSjua-08C	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	4
R. San Juan	SJ-18	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	5
R. San Juan	SJ-18A	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	4
R. San Juan	RSjua-09A	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	6
R. Tinragra	SJ-20	0	0	1	1	1	2	0	1	4	1	1	0	1	0	1	14
R. San Juan	RSjua1A	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	4
R. San Juan	RSjua1	0	1	1	0	1	2	0	1	2	1	0	1	1	0	1	12
R. San Juan	RSjua-12	0	1	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	1	5
R. San Juan	RSjua-13	1	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	5
R. San Juan	RSjua-14	0	1	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	1	0	1	6
R. San Juan	RSjua-15	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	4
R. Blanco	RBlan-01	0	1	0	0	1	2	0	1	3	0	0	0	0	0	1	9
R. Blanco	RBlan-02	0	1	1	0	0	0	0	1	2	1	0	0	1	0	0	7
R. San Juan	RSjua-16	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	6
R. San Juan	SJ-33	0	0	1	0	1	0	1	1	3	0	0	0	0	0	1	8
R. San Juan	RSjua-17	0	0	1	0	1	2	0	1	4	0	0	0	1	0	1	11
R. San Juan	RSjua-17A	0	0	1	0	0	0	0	2	2	0	1	0	1	0	1	8
R. San Juan	SJ-34	1	0	1	0	0	1	0	3	2	0	1	0	0	0	1	10
R. San Juan	RSjua-18	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	5
R. San Juan	RSjua-20A	1	0	1	1	0	0	1	3	2	1	1	0	1	0	1	13
R. San Juan	SJ-35	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	9

b) Abundancia

En la subcuenca del río San Juan, la abundancia de macroinvertebrados bentónicos fue de 46512 individuos. El orden Díptera registró la mayor abundancia con 25875 individuos, seguida por el orden Haplotaxida con 6169 individuos (Figura 6.34). En el Anexo 2.1 (RRE-035-2020-STEC) se presenta el registro completo de macroinvertebrados bentónicos.

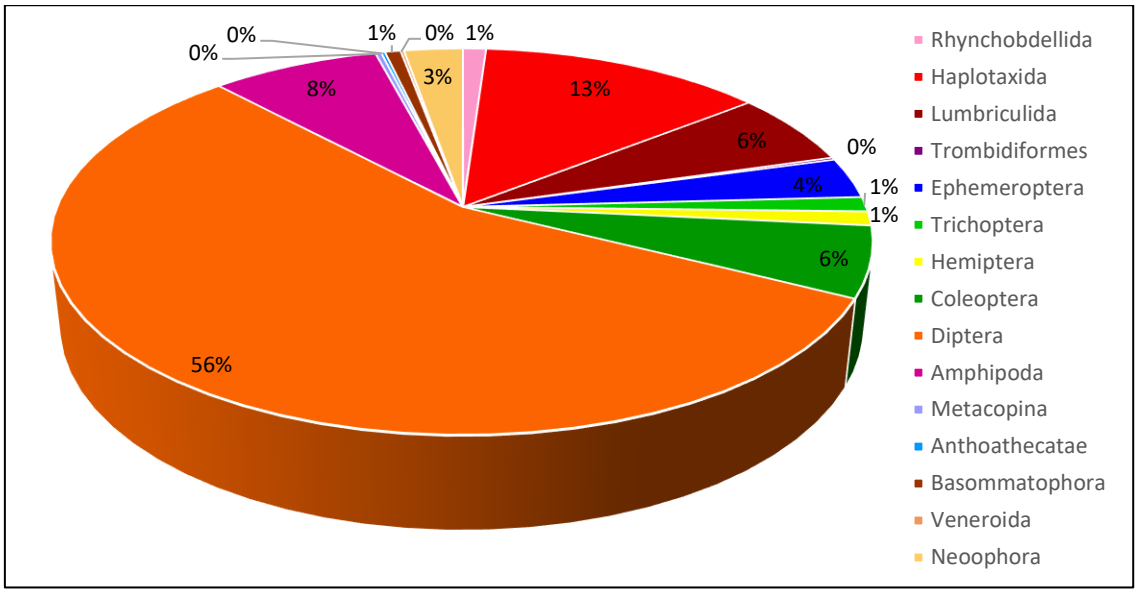


Figura 6.34. Abundancia de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por orden

En la Tabla 6.25 se presentan los resultados de la abundancia de macroinvertebrados bentónicos por punto de muestreo. Se observó que el punto RSjua-06, ubicado en el río San Juan, registró la mayor abundancia con 3139 individuos; mientras que, el punto SJ-10, ubicado en el río Ragra, registró la menor abundancia con 7 individuos.

Tabla 6.25. Abundancia de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por orden

Cuerpo de agua	Punto	Rhynchobdellida	Haplotaxida	Lumbriculida	Trombidiformes	Ephemeroptera	Trichoptera	Hemiptera	Coleoptera	Diptera	Amphipoda	Metacopina	Anthoathecatae	Basommatophora	Veneroida	Neoophora	Abundancia de individuos (N)
R. Paria	RPari-02	0	64	6	12	0	0	3	105	234	314	0	9	0	0	26	773
R. San Juan	RSjua-01	0	47	6	18	309	84	0	165	775	955	0	0	11	0	106	2476
R. sin nombre 02	RSnom-02	4	0	10	9	298	0	5	106	618	1100	0	0	0	0	140	2290
R. San Juan	RSjua-02	0	79	3	30	84	26	0	56	642	53	0	0	0	0	8	981
R. San Juan	RSjua-03	6	116	8	2	345	184	0	146	1114	9	0	0	0	0	14	1944
R. San Juan	RSjua-04	115	28	0	0	249	6	0	125	1225	193	0	0	9	0	12	1962
R. San Juan	RSjua-05	0	0	37	0	0	0	14	24	103	170	0	0	9	0	4	361
Q. sin nombre 16	QSnom-16	0	30	0	3	0	62	0	57	1349	0	0	18	4	0	16	1539
R. San Juan	RSjua-06	0	182	0	0	0	0	338	141	1742	387	0	13	139	0	197	3139
R. San Juan	SJ-02A	73	60	0	0	0	0	0	36	551	66	0	0	0	0	2	788
R. Quicay	RQuic-01	75	0	0	0	0	0	14	103	955	107	0	0	0	5	0	1259
R. San Juan	SJ-3	84	43	0	0	0	0	6	95	181	57	0	0	0	0	8	474
R. San Juan	RSjua-07	6	0	1	0	0	0	0	9	55	55	12	0	0	0	11	149
R. San Juan	SJ-12	36	0	1	0	0	0	0	56	239	1	0	0	0	0	118	451
R. Ragra	SJ-10	0	0	1	1	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	7
R. San Juan	RSjua-08	0	0	108	0	0	0	0	1	6	0	0	0	0	0	0	115

Cuerpo de agua	Punto	Rhynchobdellida	Haplotaxida	Lumbriculida	Trombidiformes	Ephemeroptera	Trichoptera	Hemiptera	Coleoptera	Diptera	Amphipoda	Metacopina	Anthoathecatae	Basommatophora	Veneroida	Neoophora	Abundancia de individuos (N)
R. San Juan	RSjua-08A	1	0	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68
Q. sin nombre 12	QSnom-12	72	58	0	0	0	61	28	0	287	0	0	0	0	67	5	578
R. San Juan	SJ-17	0	0	229	0	0	0	0	1	6	0	0	0	0	0	0	236
R. Huaraupampa	RHuar-01	0	747	44	13	0	0	0	166	1601	29	0	0	0	0	10	2610
R. Huaraupampa	RHuar-02	0	0	0	0	85	11	0	314	186	37	0	0	0	0	51	684
R. Huaraupampa	RHuar-03	0	55	0	0	0	0	0	46	178	0	0	0	0	0	5	284
R. Huaraupampa	RHuar-04	0	32	95	3	0	0	0	34	330	8	0	7	0	0	4	513
R. Huaraupampa	RHuar-05	0	223	0	3	0	0	4	70	1131	9	0	14	0	0	5	1459
R. Gashan	RGash-01	0	0	0	0	0	0	0	106	361	26	0	0	0	0	77	570
R. Gashan	RGash-02	0	59	0	0	167	0	0	182	857	0	0	0	0	0	111	1376
R. Gashan	SJ-16	7	0	6	0	1	0	3	306	401	7	0	0	1	0	23	755
R. San Juan	RSjua-08C	0	0	69	0	0	0	0	19	256	0	0	0	0	0	8	352
R. San Juan	SJ-18	4	0	288	0	0	0	0	7	166	0	0	0	0	0	13	478
R. San Juan	SJ-18A	0	293	37	0	0	0	0	6	863	0	0	0	0	0	0	1199
R. San Juan	RSjua-09A	2	0	538	0	0	1	0	2	225	0	0	0	0	0	1	769
R. Tinragra	SJ-20	0	0	14	1	20	27	0	7	82	3	3	0	3	0	8	168
R. San Juan	RSjua1A	0	1645	0	0	0	0	0	12	1361	0	0	0	0	0	12	3030
R. San Juan	RSjua1	0	607	15	0	3	94	0	45	268	34	0	23	93	0	76	1258
R. San Juan	RSjua-12	0	288	0	0	0	0	0	8	859	0	0	0	0	0	4	1159
R. San Juan	RSjua-13	3	33	0	0	0	0	0	0	491	0	0	0	0	0	2	529
R. San Juan	RSjua-14	0	103	0	0	0	0	0	9	1294	0	0	0	3	0	5	1414
R. San Juan	RSjua-15	0	0	6	0	0	0	0	0	145	0	0	0	0	0	1	152
R. Blanco	RBlan-01	0	1321	0	0	23	13	0	69	1638	0	0	0	0	0	3	3067
R. Blanco	RBlan-02	0	56	6	0	0	0	0	60	1325	6	0	0	8	0	0	1461
R. San Juan	RSjua-16	0	0	91	0	0	0	1	4	330	0	0	0	4	0	53	483
R. San Juan	SJ-33	0	0	155	0	3	0	1	8	296	0	0	0	0	0	11	474
R. San Juan	RSjua-17	0	0	218	0	1	2	0	6	273	0	0	0	1	0	12	513
R. San Juan	RSjua-17A	0	0	361	0	0	0	0	4	268	0	2	0	2	0	46	683
R. San Juan	SJ-34	2	0	101	0	0	3	0	6	142	0	1	0	0	0	3	258
R. San Juan	RSjua-18	4	0	59	0	1	0	0	1	107	0	0	0	0	0	0	172
R. San Juan	RSjua-20A	5	0	87	1	0	0	106	17	266	9	6	0	42	0	33	572
R. San Juan	SJ-35	2	0	209	0	0	0	25	3	88	8	103	0	11	0	31	480

c) Índice de diversidad

En la Tabla 6.26 se presentan los resultados de los índices de diversidad alfa: riqueza de especies, abundancia, diversidad de Shannon-Wiener (H´), equidad de Pielou (J´), dominancia de Simpson (λ) y diversidad de Simpson (1-λ) por punto de muestreo. Se observó que, el punto SJ-20 (río Tinragra) registró el mayor valor de diversidad de Shannon-Wiener con 2,336; asimismo, registró altos valores de riqueza con 14 especies y diversidad de Simpson con 0,706; estos resultados se vieron reflejados en un alto valor de equidad de Pielou con 0,738, que indica una distribución homogénea de la abundancia de individuos por taxa registrada para esta zona.

Tabla 6.26. Índices de diversidad alfa de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por punto de muestreo

Cuerpo de agua	Punto	Riqueza de especies (S)	Abundancia de individuos (N)	Diversidad de Shannon-Wiener (H´)	Equidad de Pielou (J´)	Dominancia de Simpson (λ)	Diversidad de Simpson (1-λ)	Número de Hill N1	Número de Hill N2
R. Paria	RPari-02	11	773	2,198	0,662	0,283	0,717	4,609	3,565
R. San Juan	RSjua-01	13	2476	2,323	0,635	0,270	0,730	5,005	3,711
R. sin nombre 02	RSnom-02	10	2290	1,961	0,621	0,326	0,674	3,895	3,071
R. San Juan	RSjua-02	10	981	1,848	0,585	0,446	0,554	3,603	2,248
R. San Juan	RSjua-03	13	1944	1,980	0,567	0,374	0,626	3,953	2,685
R. San Juan	RSjua-04	9	1962	1,801	0,579	0,425	0,575	3,488	2,356
R. San Juan	RSjua-05	8	361	1,975	0,707	0,328	0,672	3,935	3,051
Q. sin nombre 16	QSnom-16	9	1539	0,834	0,279	0,769	0,231	1,783	1,301
R. San Juan	RSjua-06	8	3139	2,088	0,711	0,352	0,648	4,261	2,866
R. San Juan	SJ-02A	6	788	1,467	0,611	0,518	0,482	2,767	1,938
R. Quicay	RQuic-01	7	1259	1,267	0,462	0,590	0,410	2,428	1,720
R. San Juan	SJ-3	7	474	2,264	0,828	0,249	0,752	4,830	4,106
R. San Juan	RSjua-07	8	149	2,018	0,765	0,299	0,701	4,102	3,443
R. San Juan	SJ-12	8	451	1,630	0,694	0,382	0,618	3,101	2,635
R. Ragra	SJ-10	4	7	0,799	0,906	0,479	0,521	1,918	2,300
R. San Juan	RSjua-08	3	115	0,378	0,378	0,850	0,150	1,321	1,208
R. San Juan	RSjua-08A	2	68	0,069	0,206	0,979	0,021	1,051	1,022
Q. sin nombre 12	QSnom-12	7	578	2,135	0,780	0,306	0,694	4,410	3,308
R. San Juan	SJ-17	3	236	0,226	0,205	0,930	0,070	1,172	1,078
R. Huaraupampa	RHuar-01	9	2610	1,466	0,472	0,460	0,540	2,766	2,175
R. Huaraupampa	RHuar-02	10	684	2,151	0,668	0,306	0,694	4,493	3,349
R. Huaraupampa	RHuar-03	5	284	1,479	0,672	0,441	0,559	2,797	2,298
R. Huaraupampa	RHuar-04	10	513	1,705	0,551	0,445	0,555	3,270	2,250
R. Huaraupampa	RHuar-05	10	1459	1,163	0,377	0,611	0,389	2,241	1,637
R. Gashan	RGash-01	5	570	1,586	0,683	0,434	0,566	3,012	2,333
R. Gashan	RGash-02	7	1376	1,776	0,651	0,410	0,590	3,433	2,453
R. Gashan	SJ-16	11	755	1,434	0,452	0,470	0,530	2,723	2,140
R. San Juan	RSjua-08C	4	352	1,011	0,527	0,621	0,379	2,100	1,746
R. San Juan	SJ-18	5	478	1,231	0,558	0,492	0,508	2,347	2,037
R. San Juan	SJ-18A	4	1199	1,027	0,559	0,579	0,421	2,038	1,728
R. San Juan	RSjua-09A	6	769	0,811	0,409	0,652	0,348	1,771	1,590
R. Tinragra	SJ-20	14	168	2,336	0,738	0,294	0,706	5,156	3,540
R. San Juan	RSjua1A	4	3030	1,056	0,528	0,497	0,503	2,079	2,011
R. San Juan	RSjua1	12	1258	2,309	0,669	0,295	0,705	4,957	3,388
R. San Juan	RSjua-12	5	1159	0,903	0,409	0,611	0,389	1,871	1,636
R. San Juan	RSjua-13	5	529	0,511	0,257	0,840	0,160	1,429	1,193
R. San Juan	RSjua-14	6	1414	0,532	0,213	0,834	0,167	1,446	1,200
R. San Juan	RSjua-15	4	152	0,420	0,265	0,867	0,133	1,347	1,161
R. Blanco	RBlan-01	9	3067	1,255	0,425	0,468	0,532	2,388	2,136
R. Blanco	RBlan-02	7	1461	0,569	0,225	0,835	0,165	1,495	1,203
R. San Juan	RSjua-16	6	483	1,251	0,541	0,519	0,481	2,420	1,997
R. San Juan	SJ-33	8	474	1,183	0,489	0,556	0,444	2,303	1,916
R. San Juan	RSjua-17	11	513	1,298	0,473	0,501	0,499	2,461	2,015
R. San Juan	RSjua-17A	8	683	1,321	0,564	0,469	0,531	2,507	2,164
R. San Juan	SJ-34	10	258	1,316	0,539	0,481	0,519	2,496	2,083
R. San Juan	RSjua-18	5	172	1,032	0,677	0,565	0,435	2,046	1,774
R. San Juan	RSjua-20A	13	572	2,100	0,615	0,345	0,655	4,380	3,106
R. San Juan	SJ-35	9	480	2,115	0,707	0,294	0,706	4,342	3,431

d) Índices bióticos

En la Tabla 6.27 se presentan los resultados de la calidad ecológica del agua por punto de muestreo, determinada referencialmente a partir del protocolo CERA-S que evalúa el índice biótico andino (ABI) y la calidad hidromorfológica. El punto SJ-20 (río Tinragra) registró una buena calidad ecológica del agua; mientras que, el punto SJ-17 (río San Juan) registró una pésima calidad ecológica del agua.

Tabla 6.27. Índices bióticos y calidad ecológica del agua por punto de muestreo

Cuerpo de agua	Punto	Índice Biótico Andino (ABI)	Calidad hidromorfológica	Calidad ecológica
R. Paria	RPari-02	35	29	Moderada
R. San Juan	RSjua-01	56	22	Moderada
R. sin nombre 02	RSnom-02	39	29	Moderada
R. San Juan	RSjua-02	38	33	Moderada
R. San Juan	RSjua-03	54	22	Moderada
R. San Juan	RSjua-04	37	31	Moderada
R. San Juan	RSjua-05	30	29	Moderada
Q. sin nombre 16	QSnom-16	30	29	Moderada
R. San Juan	RSjua-06	27	18	Moderada
R. San Juan	SJ-02A	22	26	Mala
R. Quicay	RQuic-01	28	28	Moderada
R. San Juan	SJ-3	27	11	Moderada
R. San Juan	RSjua-07	27	28	Moderada
R. San Juan	SJ-12	28	29	Moderada
R. Ragra	SJ-10	13	18	Mala
R. San Juan	RSjua-08	8	30	Pésimo
R. San Juan	RSjua-08A	4	26	Pésimo
Q. sin nombre 12	QSnom-12	25	32	Mala
R. San Juan	SJ-17	8	19	Pésimo
R. Huaraupampa	RHuar-01	32	25	Moderada
R. Huaraupampa	RHuar-02	55	32	Buena
R. Huaraupampa	RHuar-03	17	32	Mala
R. Huaraupampa	RHuar-04	30	32	Moderada
R. Huaraupampa	RHuar-05	34	13	Moderada
R. Gashan	RGash-01	22	29	Mala
R. Gashan	RGash-02	23	14	Mala
R. Gashan	SJ-16	46	23	Moderada
R. San Juan	RSjua-08C	13	24	Mala
R. San Juan	SJ-18	16	26	Mala
R. San Juan	SJ-18A	9	19	Pésimo
R. San Juan	RSjua-09A	22	32	Mala
R. Tinragra	SJ-20	57	31	Buena
R. San Juan	RSjua1A	13	20	Mala
R. San Juan	RSjua1	43	20	Moderada
R. San Juan	RSjua-12	16	24	Mala
R. San Juan	RSjua-13	13	14	Mala
R. San Juan	RSjua-14	18	23	Mala
R. San Juan	RSjua-15	10	22	Pésimo
R. Blanco	RBlan-01	37	26	Moderada
R. Blanco	RBlan-02	22	12	Mala
R. San Juan	RSjua-16	21	27	Mala
R. San Juan	SJ-33	28	29	Moderada
R. San Juan	RSjua-17	44	25	Moderada
R. San Juan	RSjua-17A	24	25	Mala

Cuerpo de agua	Punto	Índice Biótico Andino (ABI)	Calidad hidromorfológica	Calidad ecológica
R. San Juan	SJ-34	33	21	Moderada
R. San Juan	RSjua-18	15	30	Mala
R. San Juan	RSjua-20A	48	22	Moderada
R. San Juan	SJ-35	31	23	Moderada

6.4 Objetivo específico 4: Identificar los sitios contaminados en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo

La evaluación de campo se realizó siguiendo las recomendaciones principalmente de los lineamientos descritos en la cuarta edición del Manual de estudios de suelos (*Soil Survey Manual*), publicado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en 2017; esto ayudó para poder describir el paisaje, la litología, el material parental, la secuencia de horizontes y capas identificables dentro del perfil de los cuerpos del suelo ubicados en las áreas de potencial interés (API) en estudio. Además, se tomaron como referencia los patrones de muestreo y la determinación de puntos de muestreo establecidos en la Guía para muestreo de suelos.

Durante el levantamiento técnico, se evaluaron suelos con vegetación endémicas afectados por las concentraciones de metales sobre la influencia de los pasivos ambientales de origen mineros y los pasivos del río San Juan y delta Upamayo, para lo cual se realizó un análisis multitemporal con imágenes satelitales Landsat 8 a una resolución espacial de 30 m entre 1989 y 2019, donde se identificaron API mediante mapas de cambios generados a través del análisis de índices de vegetación que fueron comparados cada 3 años. Así mismo se realizó sobrevuelos con RPAS utilizando sensores multiespectrales para obtener imágenes a una resolución alta a diferencia de las imágenes satelitales, donde se generó también los índices de vegetación a una mejor resolución para determinar el estado o vigorosidad de la flora con relación a las actividades externas.

Con ayuda de la información recopilada durante la investigación histórica y la información levantada de manera *in situ* durante el levantamiento técnico, se pudo determinar que tanto las API como el nivel de fondo se encuentran en suelos formados a partir de un mismo origen edafogénico, lo cual concierne a clima, organismos, relieve, material parental o roca madre y tiempo. De esta manera, se sustenta el muestreo de nivel de fondo; donde, los valores de nivel de fondo y referencia determinados a partir de la información obtenida de estas áreas los resultados completos se presentan en el Anexo 2.2 (RRE-043-2020-STEC), representarán a las condiciones naturales del área de estudio y servirán como punto de referencia para la gestión de sitios contaminados o potencialmente contaminados que se lleven a cabo en su entorno.

6.4.1 Áreas de potencial interés

6.4.1.1 API PAM 20

a) Metales totales

En la Tabla 6.28 y Figura 6.35 se presentan las concentraciones de metales totales en el API PAM 20 en comparación con los Estándares de Calidad Ambiental para Suelo, uso agrícola; aprobados mediante Decreto Supremo N.° 011-2017-MINAM (en adelante, ECA para suelo 2017, uso agrícola), donde se observa que los parámetros arsénico y plomo superaron en un 100 % (6/6 de puntos muestreados) los ECA para suelo 2017, uso agrícola

(50 mg/kg PS y 70 mg/kg PS respectivamente), cadmio superó en un 50 % (3/6 puntos muestreados) y mercurio superó en un 83,33 % (5/6 de puntos muestreados) los valores de 1,4 mg/kg PS y 6,6 mg/kg PS respectivamente, establecidos en la norma en mención. Además, el único punto muestreado que no superó el ECA para suelo 2017, uso agrícola para mercurio es el CS-P20-05; mientras que, las concentraciones de bario en todos los puntos se encuentran por debajo de la norma antes señalada.

Tabla 6.28. Resultados de parámetros de metales totales del API PAM 20 comparados con los ECA para suelos 2017, uso agrícola

Código	Arsénico Total (mg/kg PS)	Bario Total (mg/kg PS)	Cadmio Total (mg/kg PS)	Mercurio Total (mg/kg PS)	Plomo Total (mg/kg PS)
CS-P20-02	496	88,2	1,5969	33,7	1 091
CS-P20-01	93,9	171,4	0,84115	15,6	251
CS-P20-03	461	236,3	2,0797	50,8	920
CS-P20-04	88,3	52,49	1,1925	7,48	337
CS-P20-06	354	172	3,5336	118	1 592
CS-P20-05	51,8	66,66	0,64839	3,11	101
ECA para suelo, uso agrícola (D.S. N.° 011-2017-MINAM)	50	750	1,4	6,6	70

: Concentración que supera el valor del Estándar de calidad ambiental 2017 para suelo de uso agrícola



Figura 6.35. Concentraciones de a) arsénico, b) bario, c) cadmio, d) mercurio y e) plomo en el API PAM 20, comparados con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores del nivel de fondo

Además, la Tabla 6.29 y Figura 6.36 muestra las concentraciones de elementos de interés de las muestras del API PAM 20 comparados, de manera referencial, con los valores de la Guía canadiense de calidad del suelo para la protección del medio ambiente y la salud humana, uso agrícola (en adelante guía canadiense de suelo, uso agrícola); donde cobre excedió en un 66,67 % (4/6 de puntos muestreados), plata excedió en un 50 % (3/6 de puntos muestreados), selenio excedió en un 83,33 % (5/6 de puntos muestreados) y el zinc excedió en un 33,33 % (2/6 de puntos muestreados) los valores de 63 mg/kg PS, 20 mg/kg PS, 1 mg/kg PS y 250 mg/kg PS respectivamente; establecidos en la guía en mención.

Tabla 6.29. Resultados de parámetros de metales totales del API PAM 20 comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

Código	Cobre Total (mg/kg PS)	Plata Total (mg/kg PS)	Selenio Total (mg/kg PS)	Zinc Total (mg/kg PS)
CS-P20-02	87	28,23	2,086	133
CS-P20-01	35	9,433	1,303	96
CS-P20-03	90	37,62	1,965	267
CS-P20-04	85	8,515	1,538	225
CS-P20-06	327	64,52	5,424	796
CS-P20-05	31	8,837	0,716	97
Guía canadiense de suelo, uso agrícola	63	20	1	250

: Concentraciones que superan los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

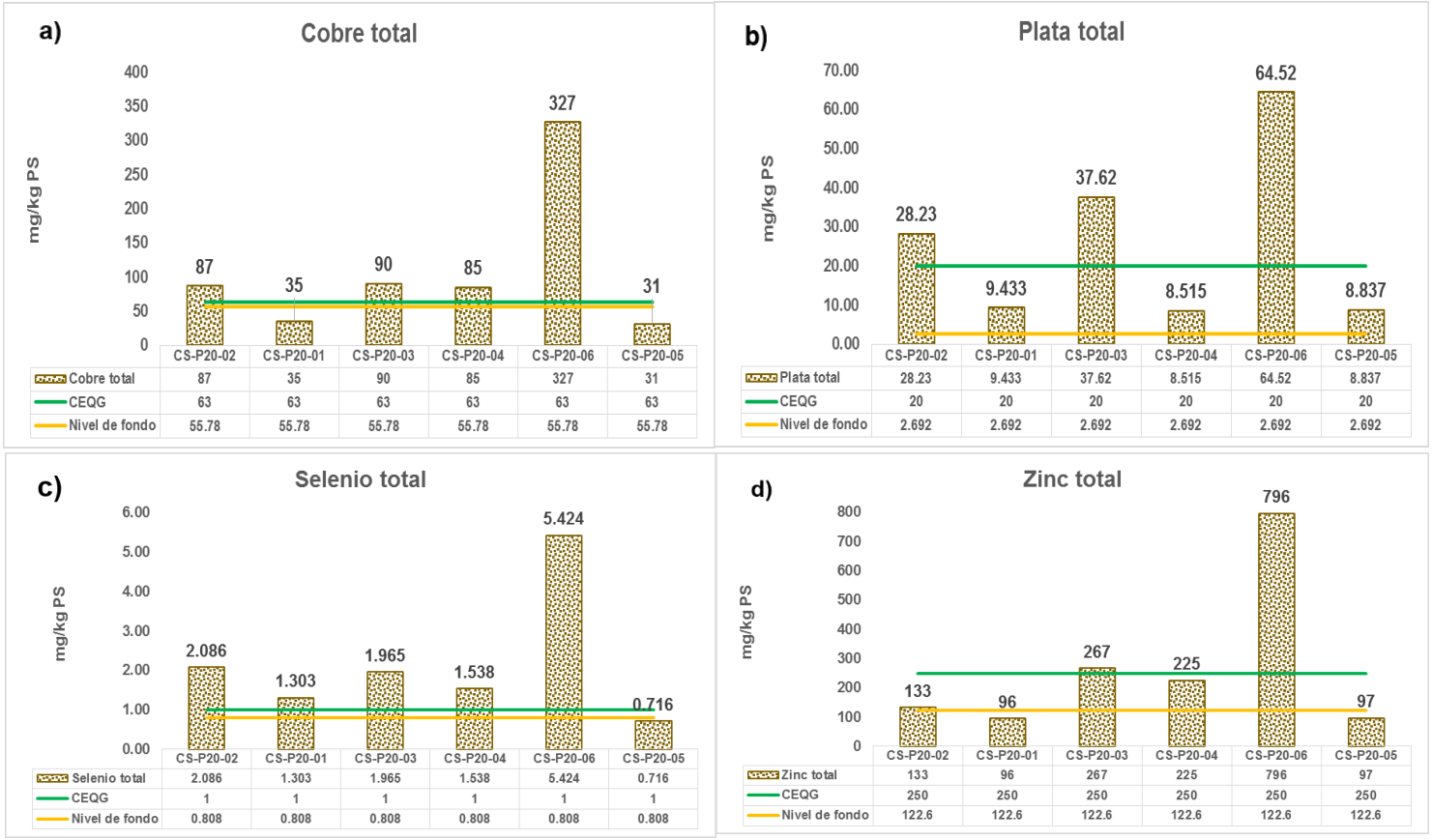


Figura 6.36. Concentraciones de a) cobre, b) plata, c) selenio y d) zinc en el API PAM 20, comparados con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y valores del nivel de fondo

b) Disponibilidad de metales pesados

En la Tabla 6.30 y Figura 6.37 se aprecian las concentraciones de los metales del punto de muestreo CS-P20-02, donde los mayores valores de arsénico, bario y mercurio se presentan en la etapa 6 (residual); mientras que, las máximas concentraciones de cadmio y plomo se encontraron en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro).

El cobre presenta su máxima concentración de 62,52 mg/kg en la etapa 5 (ligado a materia orgánica), plata presenta su máxima concentración en la etapa 6 (residual) de 41,84 mg/kg, selenio presenta concentraciones por debajo del límite de detección en las primeras 4 etapas y presenta su concentración máxima de 1,44 mg/kg en la etapa 5 (ligado a materia orgánica); la concentración máxima de zinc de 76,14 mg/kg está en la etapa 6 (residual), mientras que en la etapa 1 (extraíbles) el valor está por debajo del límite de detección.

Tabla 6.30. Resultados de parámetros de disponibilidad de metales pesados por la metodología de Tessier en el API PAM 20

Código		CS-P20-02					
Parámetro	Unidad	Tessier – Extraíbles (Etapa 1)	Tessier – Intercambiable y adsorbidas (Etapa 2)	Tessier – Ligado a carbonato (Etapa 3)	Tessier – Fácilmente reducibles y óxidos de hierro (Etapa 4)	Tessier – ligado a materia orgánica (Etapa 5)	Tessier – Residual (Etapa 6)
Arsénico (As)	mg/kg	1,15	0,377	1,56	28,03	34,69	500,1
Bario (Ba)	mg/kg	0,40	13,71	10,33	14,50	17,64	19,44
Cadmio (Cd)	mg/kg	< 0,050	0,591	0,115	0,405	0,109	0,386
Cobre (Cu)	mg/kg	0,58	0,44	3,984	19,60	62,52	29,54
Mercurio (Hg)	mg/kg	0,024	< 0,010	0,033	0,339	25,10	112,4
Plata (Ag)	mg/kg	0.021	2,456	0,0049	2,941	2,738	41,84
Plomo (Pb)	mg/kg	3,31	50,20	114,0	361,9	261,7	342,7
Selenio (Se)	mg/kg	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	1,44	1,10
Zinc (Zn)	mg/kg	< 5,0	6,5	5,69	29,84	16,09	76,14

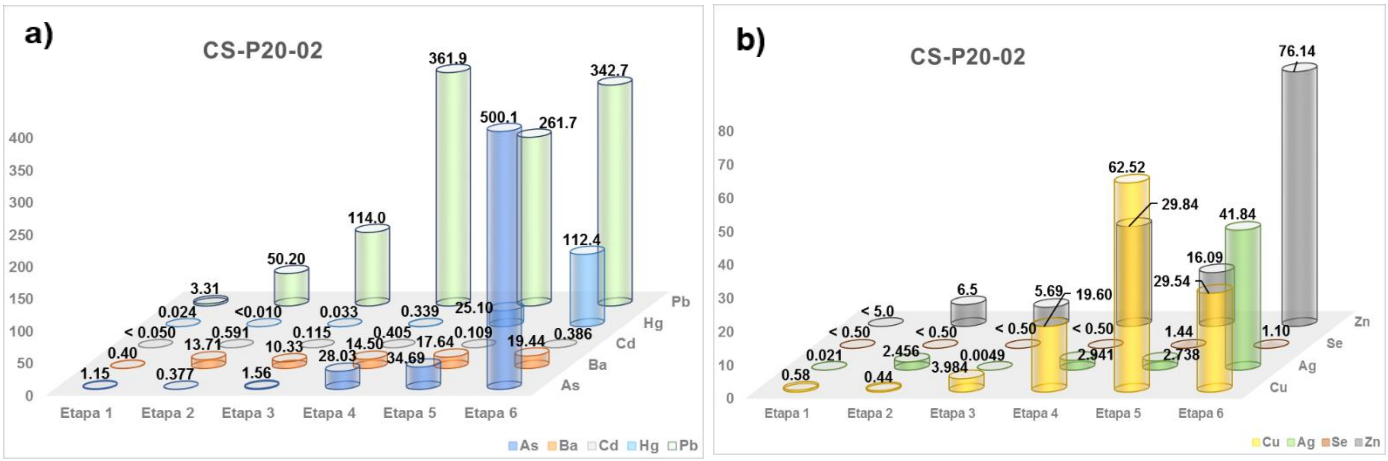


Figura 6.37. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el API PAM 20

c) Índices NDVI y NDRE

En esta API PAM 20 se hizo un sobrevuelo de un área de 6,30 ha (Figura 6.38), que conforma la formación de cobertura vegetal mixta o alterada en la que se realizó el análisis de los índices de vegetación de NDVI y NDRE. Obteniéndose una media de 0,525 de NDVI y -0,224 de NDRE (Tabla 6.31 y Figura 6.39).

Tabla 6.31. Información estadística de los índices de vegetación NDVI y NDRE

Estadísticos	NDVI	NDRE
count	12603672	12603700
sum	3311601,38	141364,88
mean	0,525498	0,224322
stdev	0,18833	0,045422
Min	-0,25189	-0,235186
Max	1,434872	0,601354

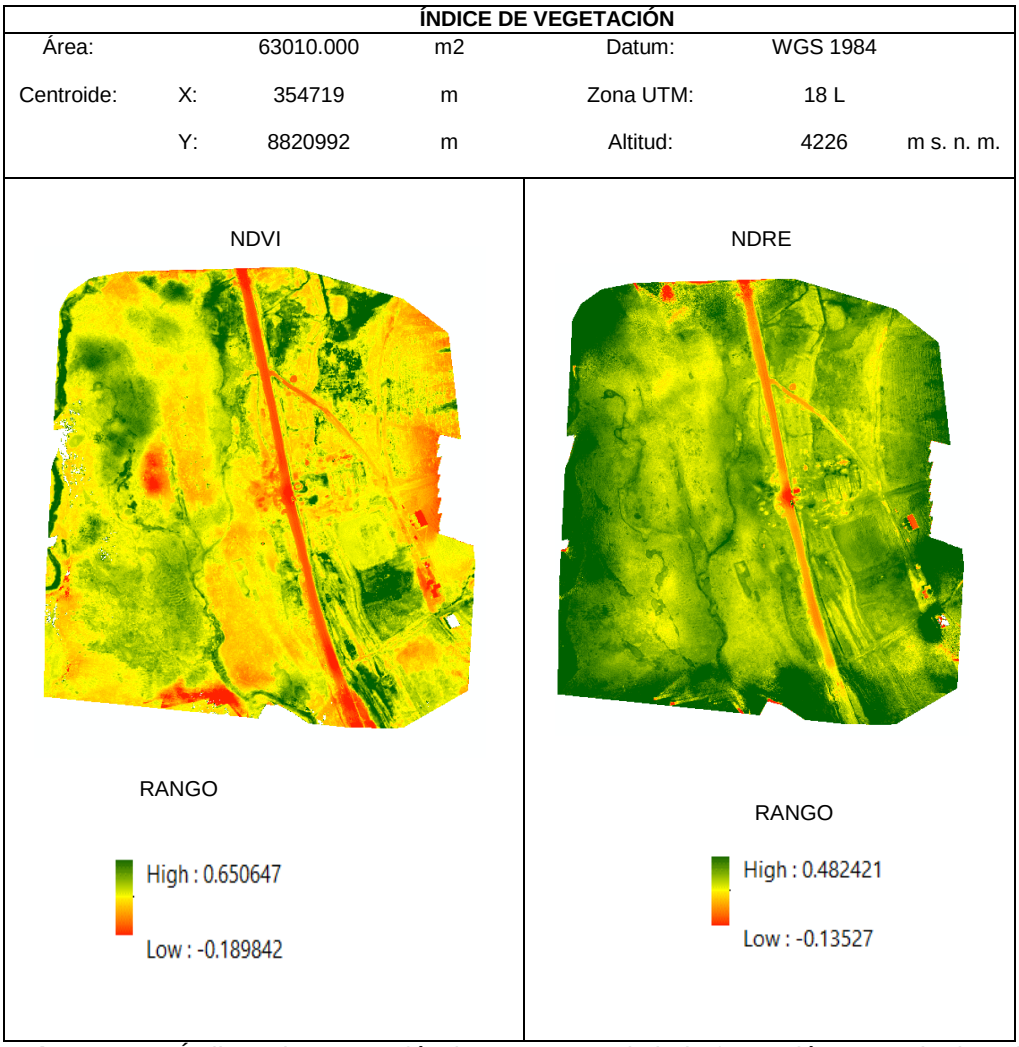


Figura 6.38. Índices de vegetación (NDVI y NDRE) de la formación vegetal mixta del API PAM 20

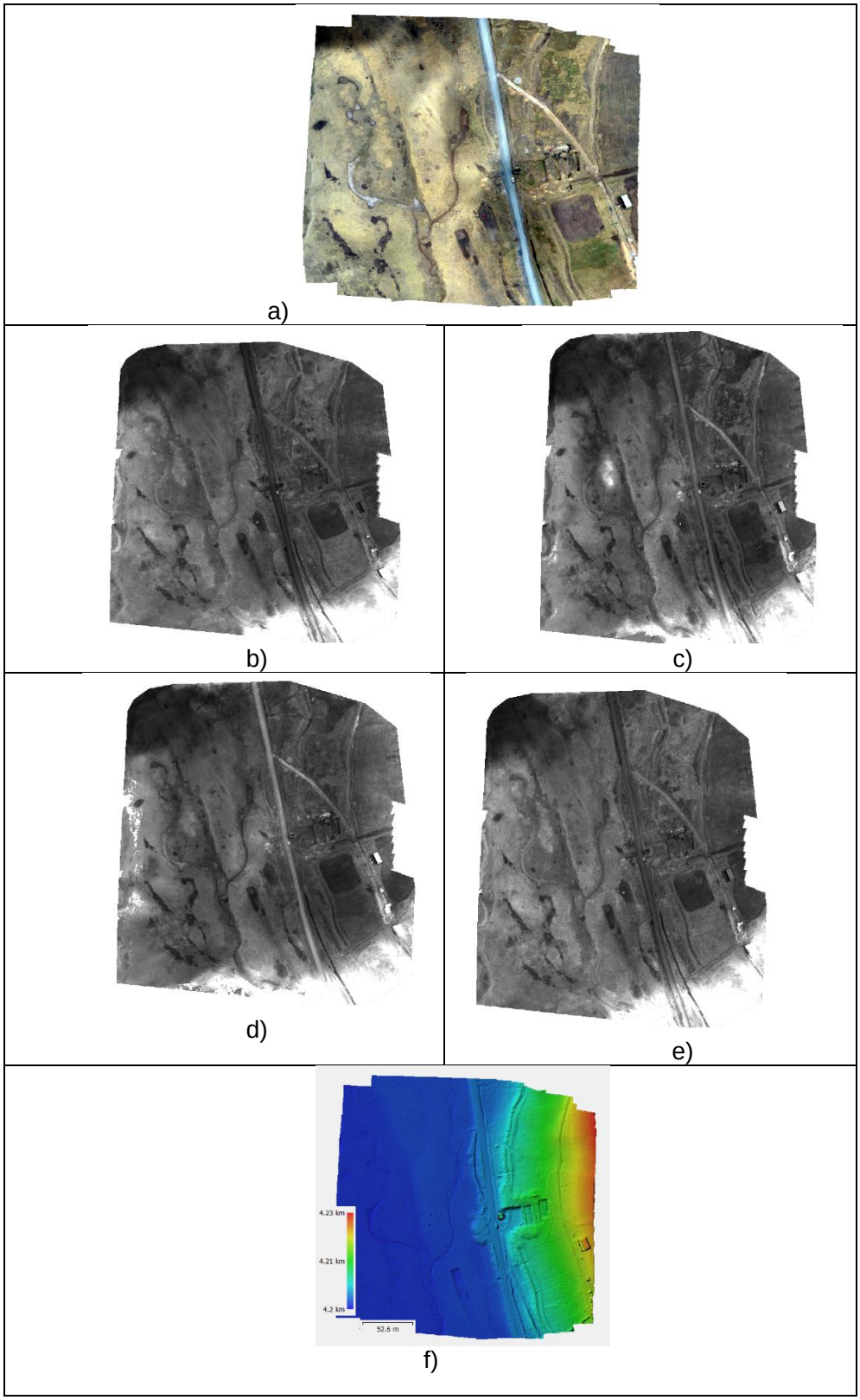


Figura 6.39. a) Ortofoto RGB, b) NIR c) Red, d) Green, e) Red Edge) y f) DEM del API PAM 20

- **Correlación de raster**

Con los datos estandarizados se realizó la primera aproximación del análisis de correlación entre los índices de vegetación del sensor Parrot Sequoia y los datos de parámetros de suelo, que se presenta en las Tablas 6.32 y 6.33 y Figuras 6.40 y 6.41.

Tabla 6.32. Índice de vegetación (NDVI) y muestreo de suelo

Código	API	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18 L		Altitud (m s. n. m.)	Fecha	NDVI
		Este (m)	Norte (m)			
CS-P20-01	PAM 20	354698	8820958	4214	17/09/2020	0.204028
CS-P20-02	PAM 20	354733	8820960	4210	17/09/2020	0.243294
CS-P20-03	PAM 20	354697	8820994	4226	17/09/2020	0.225398
CS-P20-04	PAM 20	354726	8820990	4226	17/09/2020	0.092509
CS-P20-05	PAM 20	354710	8820940	4173	17/09/2020	0.146992
CS-P20-06	PAM 20	354737	8820925	4202	17/09/2020	0.147903

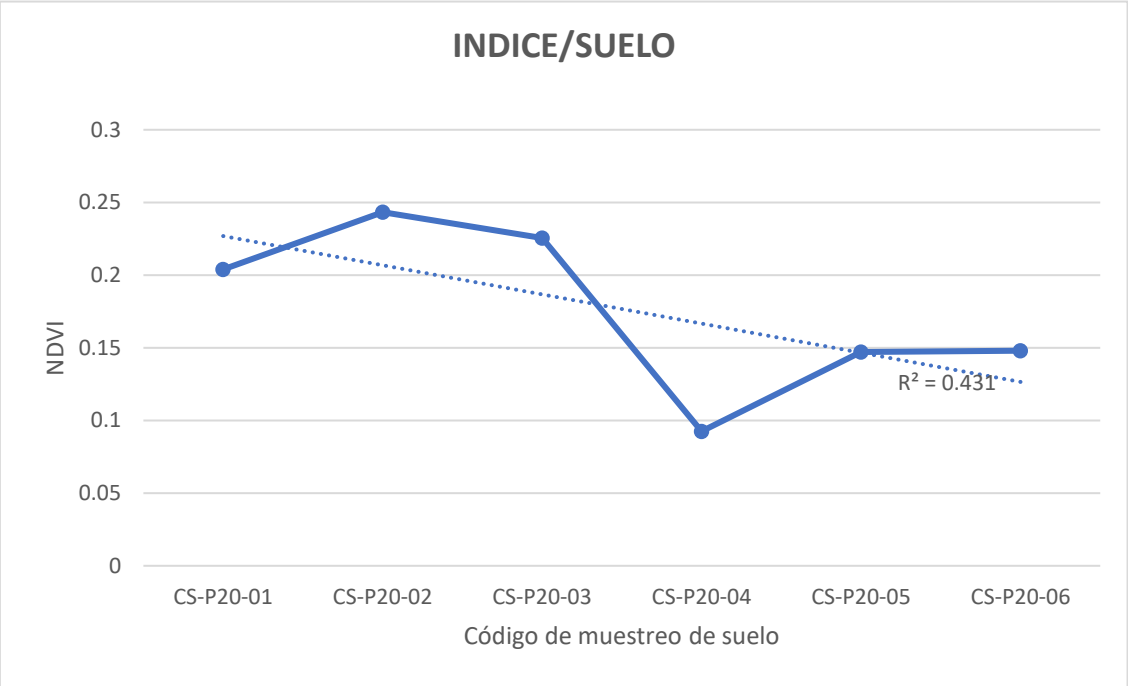


Figura 6.40. Índice de vegetación (NDVI) y muestreo de suelo

Tabla 6.33. Índice de vegetación (NDRE) y muestreo de suelo

Código	API	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18 L		Altitud (m s. n. m.)	Fecha	NDRE
		Este (m)	Norte (m)			
CS-P20-01	PAM 20	354698	8820958	4214	17/09/2020	0.120222
CS-P20-02	PAM 20	354733	8820960	4210	17/09/2020	0.112586
CS-P20-03	PAM 20	354697	8820994	4226	17/09/2020	0.113221
CS-P20-04	PAM 20	354726	8820990	4226	17/09/2020	0.111225
CS-P20-05	PAM 20	354710	8820940	4173	17/09/2020	0.101013
CS-P20-06	PAM 20	354737	8820925	4202	17/09/2020	0.099407

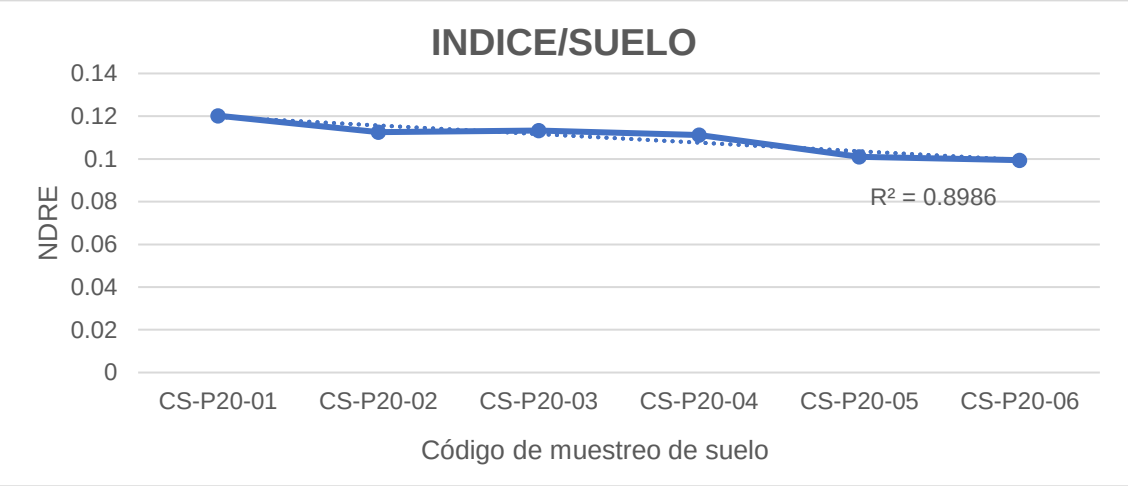


Figura 6.41. Índice de vegetación (NDRE) y muestreo de suelo

6.4.1.2 API MF

a) Metales totales

El API MF es aquel desarrollado por muestras compuestas, donde los resultados obtenidos de las concentraciones de metales totales se presentan en la Tabla 6.34 y Figura 6.42, en comparación con los ECA para suelo 2017, uso agrícola; donde las concentraciones de arsénico, cadmio, mercurio y plomo superaron en un 100 % (12/12 de puntos muestreados) los valores de 50 mg/kg PS, 1,4 mg/kg PS, 6,6 mg/kg PS, y 70 mg/kg PS respectivamente, bario superó en un 8,33 % (1/12 puntos muestreados) el valor de 750 mg/kg PS, con una concentración de 798 mg/kg PS en el punto de muestreo MF-06; establecidos en la norma en mención. Además, presentó valores máximos de 1424 mg/kg PS (arsénico), 4,616 mg/kg PS (cadmio), 244 mg/kg PS (mercurio) y 3348 mg/kg PS (plomo) que superaron ampliamente la norma antes señalada.

Tabla 6.34. Resultados de parámetros de metales totales del API MF comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola

Código	Arsénico Total (mg/kg PS)	Bario Total (mg/kg PS)	Cadmio Total (mg/kg PS)	Mercurio Total (mg/kg PS)	Plomo Total (mg/kg PS)
MF-01	148	150,8	1,4036	31,7	508
MF-02	991	440,7	3,0977	143	2 075
MF-03	1 386	632,5	3,8197	178	3 055
MF-04	1 248	603,8	3,9387	142	2 798
MF-05	1 423	664,8	4,4679	151	3 059
MF-06	1 424	798,0	4,6160	135	3 348
MF-07	350	335,4	1,6009	108	1 114
MF-08	1 172	461,8	3,1613	110	2 340
MF-09	1 188	517,5	2,9869	148	2 307
MF-10	930	353,0	2,5552	160	2 060
MF-11	1 157	266,5	3,5898	244	2 895
MF-12	574	211,6	2,0174	117	1 654
ECA para suelo, uso agrícola (D.S. N.° 011-2017-MINAM)	50	750	1,4	6,6	70

: Concentración que supera el valor del Estándar de calidad ambiental 2017 para suelo de uso agrícola

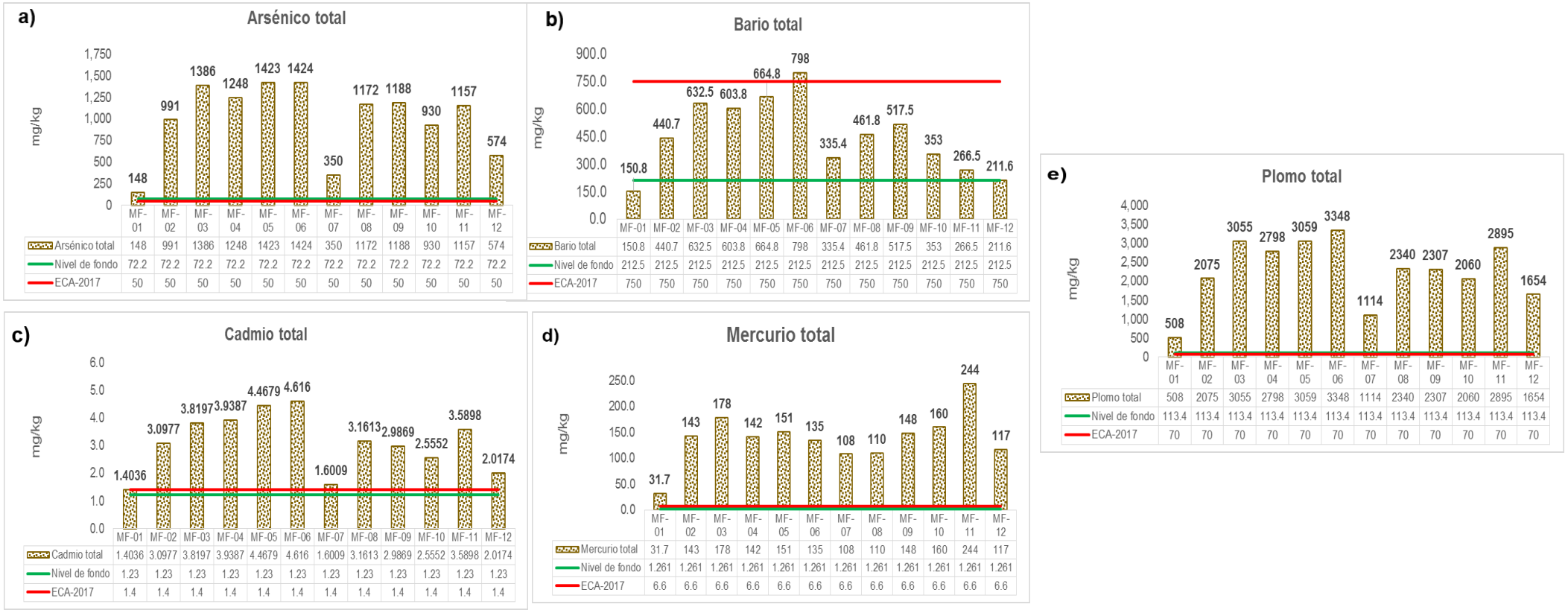


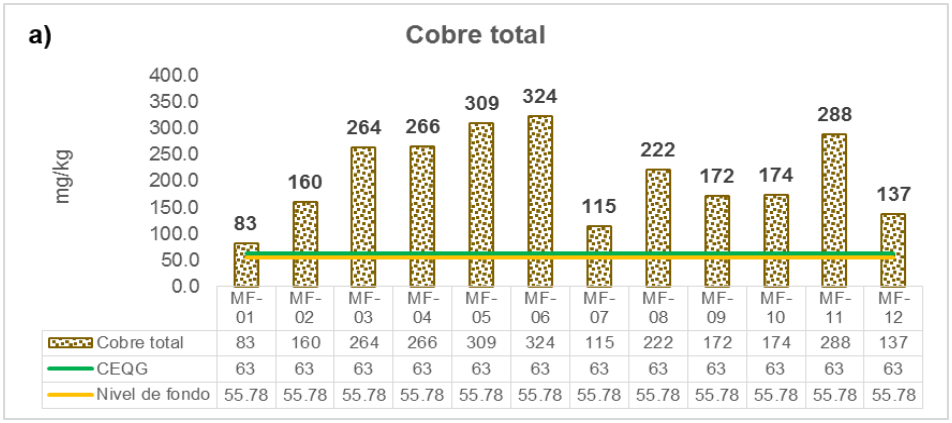
Figura 6.42. Concentraciones de a) arsénico, b) bario, c) cadmio, d) mercurio y e) plomo en el API MF, comparados con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores del nivel de fondo

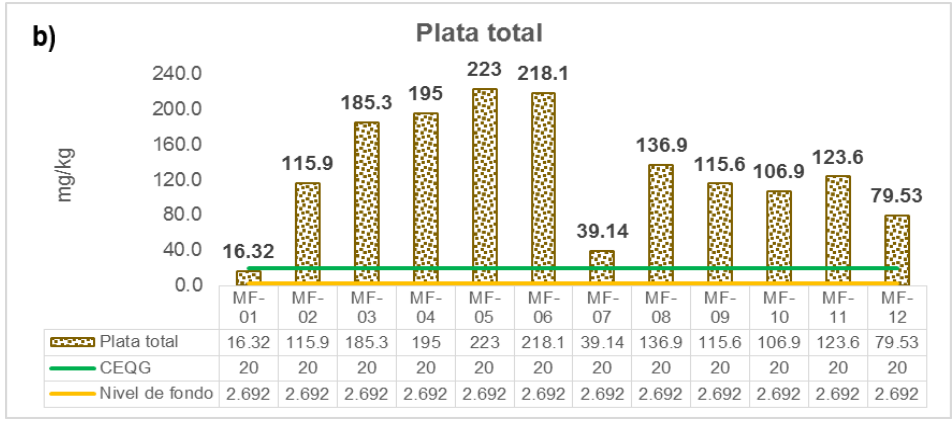
Adicionalmente, en la Tabla 6.35 y Figura 6.43 se muestran las concentraciones de metales de interés de las muestras del API MF comparados, referencialmente, con la guía canadiense de suelo, uso agrícola; el cobre y selenio excedieron en 100 % (12/12 puntos muestreados) los valores de 63 mg/kg PS y 1 mg/kg PS respectivamente, con concentraciones de 324 mg/kg PS y 3,439 mg/kg PS respectivamente; plata excedió en 91,67 % (11/12 puntos muestreados) el valor de 20 mg/kg PS, siendo el único punto de muestreo que no excedió ese valor, el MF-01; zinc excedió en 83,33 % (10/12 puntos muestreados) el valor de 250 mg/kg PS, siendo los puntos MF-01 y MF-07 que no excedieron ese valor; establecidos en la guía en mención.

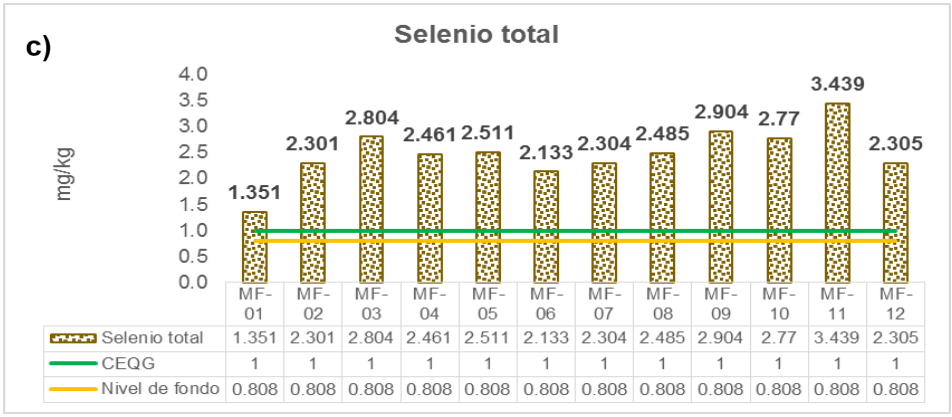
Tabla 6.35. Resultados de parámetros de metales totales del API MF comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

Código	Cobre Total (mg/kg PS)	Plata Total (mg/kg PS)	Selenio Total (mg/kg PS)	Zinc Total (mg/kg PS)
MF-01	83	16,32	1,351	152
MF-02	160	115,9	2,301	432
MF-03	264	185,3	2,804	699
MF-04	266	195,0	2,461	771
MF-05	309	223,0	2,511	879
MF-06	324	218,1	2,133	888
MF-07	115	39,14	2,304	196
MF-08	222	136,9	2,485	326
MF-09	172	115,6	2,904	329
MF-10	174	106,9	2,770	342
MF-11	288	123,6	3,439	364
MF-12	137	79,53	2,305	286
Guía canadiense de suelo, uso agrícola	63	20	1	250

: Concentraciones que superan los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola







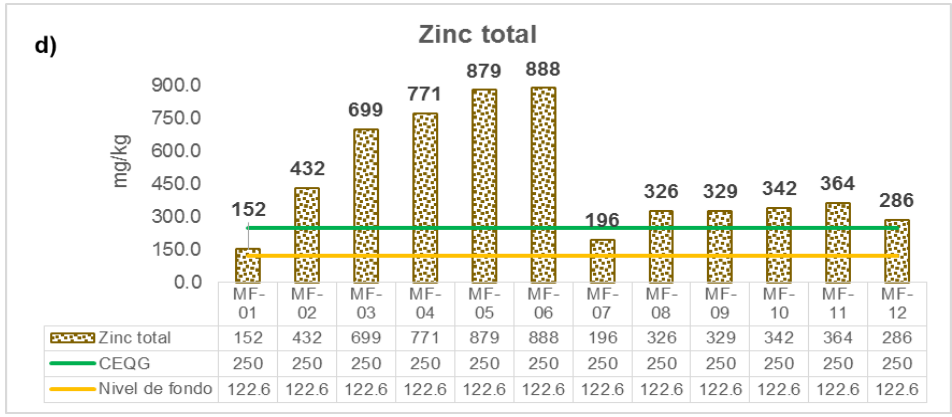


Figura 6.43. Concentraciones de a) cobre, b) plata, c) selenio y d) zinc en el API MF, comparados con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y valores del nivel de fondo

6.4.1.3 API PAM 22

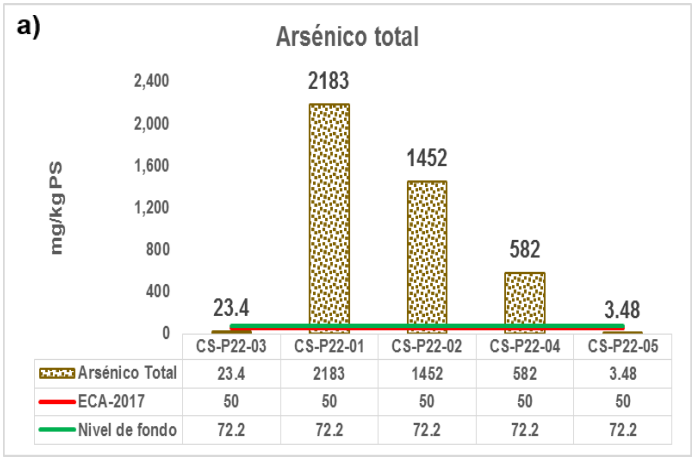
a) Metales totales

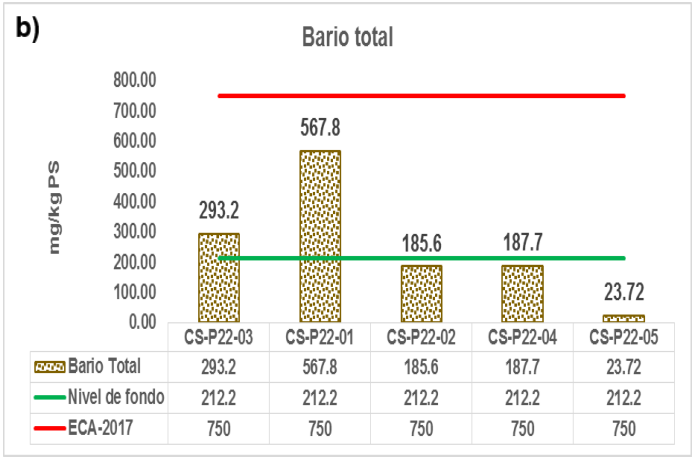
En la Tabla 6.36 y Figura 6.44 se presentan las concentraciones de metales en el API PAM 22 en comparación con los ECA para suelo 2017, uso agrícola; donde arsénico, cadmio, mercurio y plomo superaron en un 60 % (3/5 de puntos muestreados) los valores de 50 mg/kg PS, 1,4 mg/kg PS, 6,6 mg/kg PS, y 70 mg/kg PS respectivamente, siendo los puntos CS-P22-03 y CS-P22-05 que no superaron esos valores, establecidos en la norma en mención; bario presentó concentraciones por debajo del valor de la norma antes indicada (750 mg/kg PS), en todos los puntos muestreados.

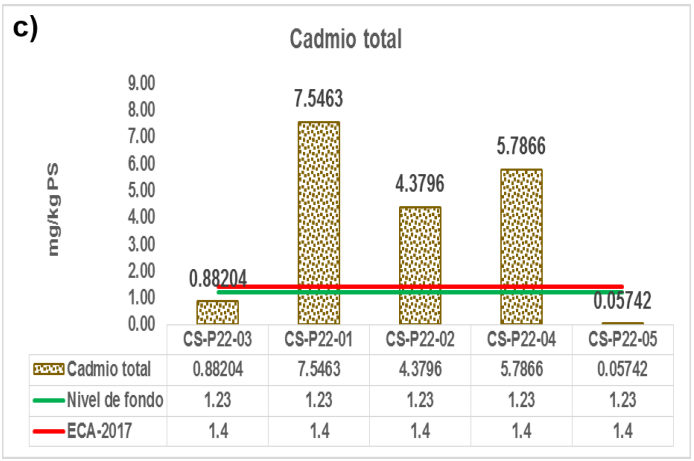
Tabla 6.36. Resultados de parámetros de metales totales del API PAM 22 comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola

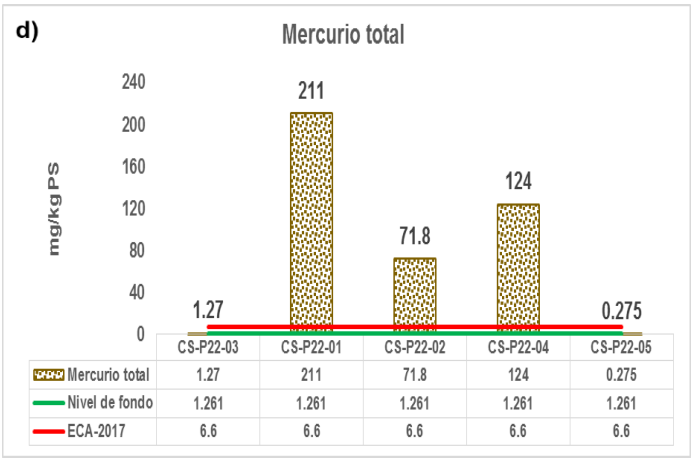
Código	Arsénico Total (mg/kg PS)	Bario Total (mg/kg PS)	Cadmio Total (mg/kg PS)	Mercurio Total (mg/kg PS)	Plomo Total (mg/kg PS)
CS-P22-03	23,4	293,2	0,88204	1,27	48,5
CS-P22-01	2 183	567,8	7,5463	211	6 140
CS-P22-02	1 452	185,6	4,3796	71,8	2 655
CS-P22-04	582	187,7	5,7866	124	1 717
CS-P22-05	3,48	23,72	0,05742	0,275	7,266
ECA para suelo, uso agrícola (D.S. N.° 011-2017-MINAM)	50	750	1,4	6,6	70

: Concentración que supera el valor del Estándar de calidad ambiental 2017 para suelo de uso agrícola









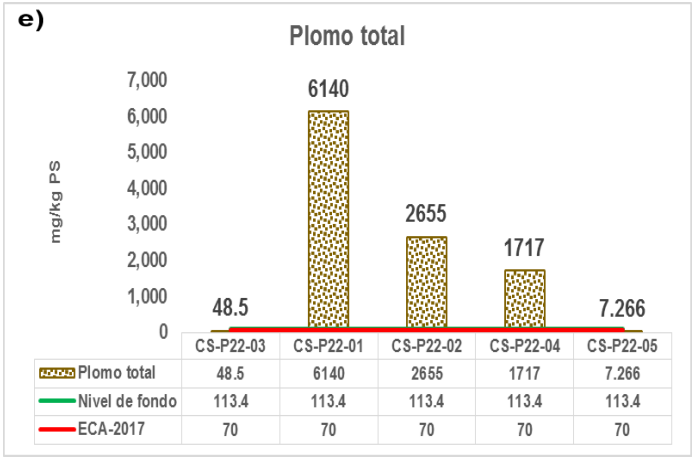


Figura 6.44. Concentraciones de a) arsénico, b) bario, c) cadmio, d) mercurio y e) plomo en el API PAM 22, comparados con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores del nivel de fondo

Además, en la Tabla 6.37 y Figura 6.45 de manera referencial se compararon las concentraciones de elementos de interés de las muestras del API PAM 22, con la guía canadiense de suelo, uso agrícola; donde el cobre, plata, selenio y zinc excedieron el 60 % (3/5 de puntos muestreados) los valores de 63 mg/kg PS, 20 mg/kg PS, 1 mg/kg PS y 250 mg/kg PS respectivamente; cabe precisar que, el punto CS-P22-05 no excedió ningún valor de los parámetros; establecidos en la guía en mención.

Tabla 6.37. Resultados de parámetros de metales totales del API PAM 22 comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

Área de potencial interés	Código	Cobre Total (mg/kg PS)	Plata Total (mg/kg PS)	Selenio Total (mg/kg PS)	Zinc Total (mg/kg PS)
PAM 22	CS-P22-03	32	3,12	5,168	45
	CS-P22-01	1 390	205,2	2,017	1 313
	CS-P22-02	729	117,8	0,790	799
	CS-P22-04	310	88,22	3,013	801
	CS-P22-05	2,2	3,046	0,311	10,0
	Guía canadiense de suelo, uso agrícola	63	20	1	250

: Concentraciones que superan los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

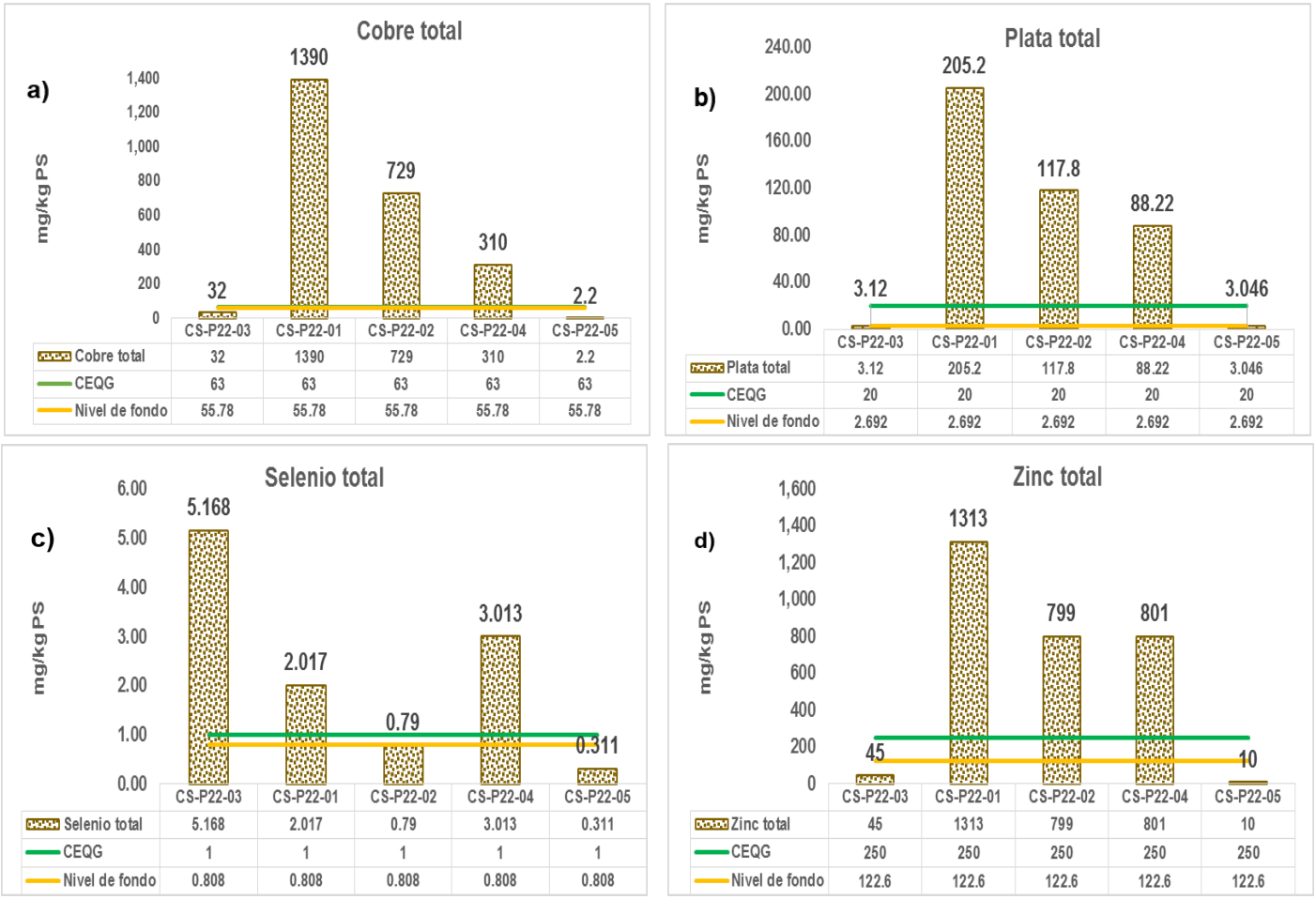


Figura 6.45. Concentraciones de a) cobre, b) plata, c) selenio y d) zinc en el API PAM 20, comparados con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y valores del nivel de fondo

b) Índices NDVI y NDRE

En esta API PAM 22 se hizo un sobrevuelo de un área de 10,615 ha (Figura 6.46), que conforma la formación de cobertura vegetal mixta o alterada en la que se realizó el análisis de los índices de vegetación de NDVI y NDRE. Obteniéndose una media de -0,77 de NDVI y -0,206 de NDRE (Tabla 6.38 y Figura 6.47).

Tabla 6.38. Información estadística de los índices de vegetación NDVI y NDRE

Estadísticos	NDVI	NDRE
count	15951290	15953488
sum	6154053,13	1648255,61
mean	0,771606	0,206632
stdev	0,231436	0,053194
min	-0,54164	-0,891366
max	1,552678	1,265038

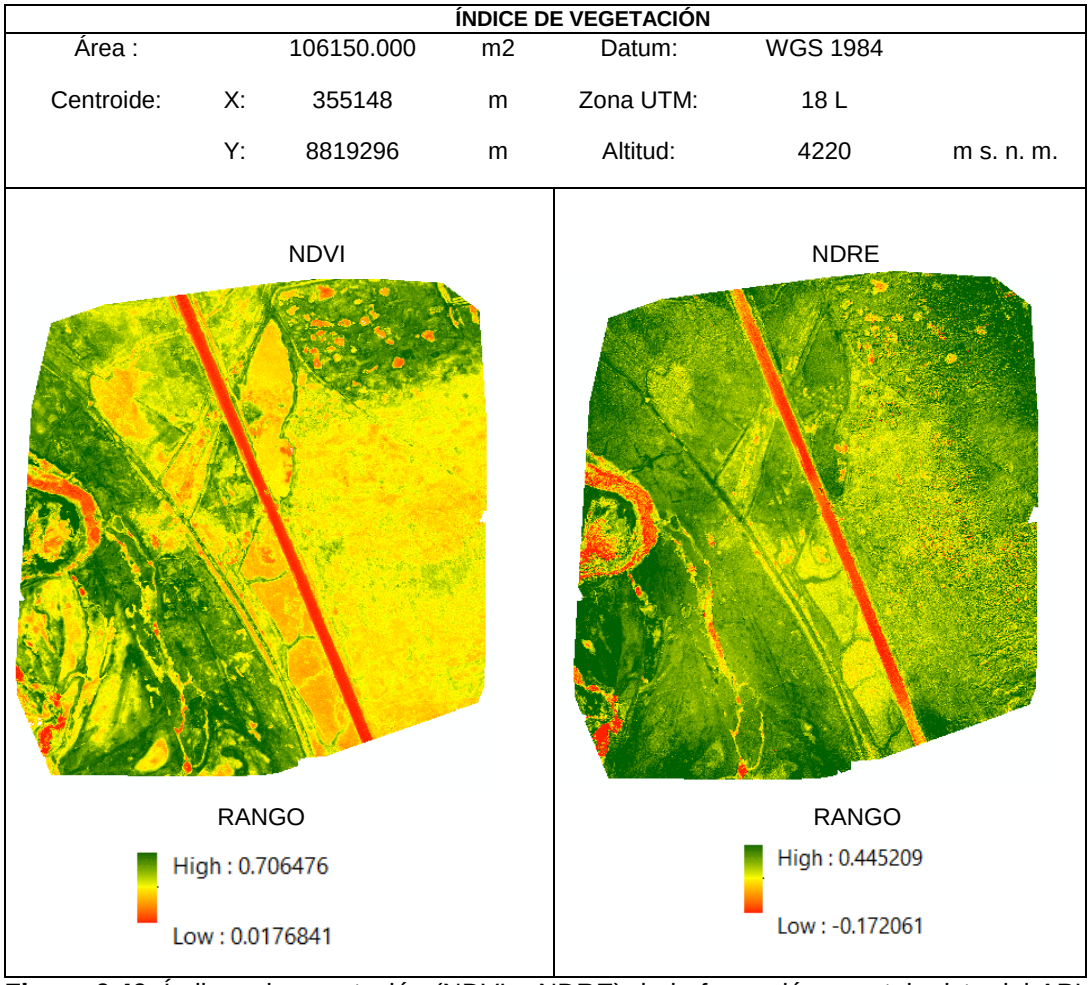


Figura 6.46. Índices de vegetación (NDVI y NDRE) de la formación vegetal mixta del API PAM 22

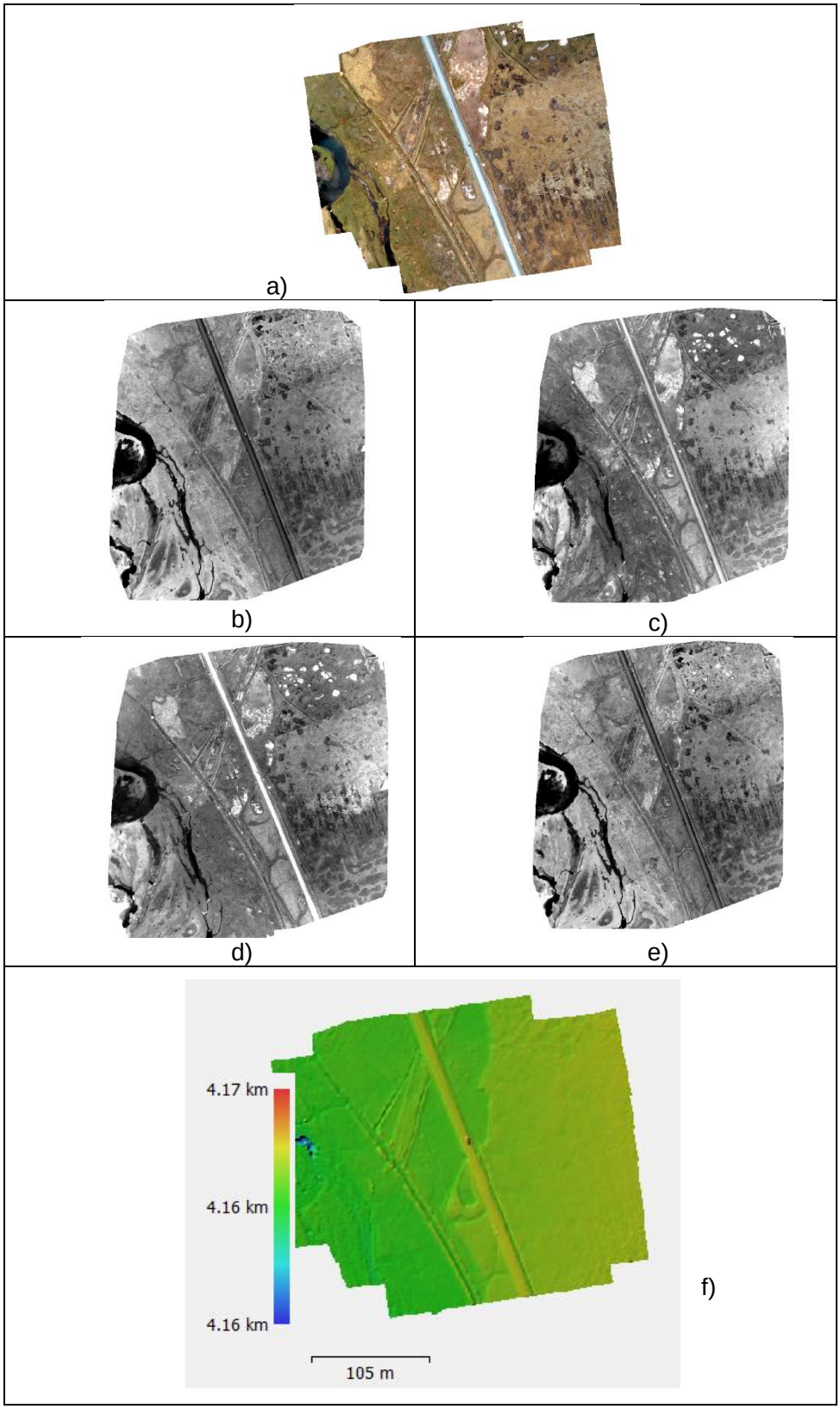


Figura 6.47. a) Ortofoto RGB, b) NIR c) Red, d) Green, e) Red Edge) y f) DEM del API PAM 22

- **Correlación de raster**

Con los datos estandarizados se realizó la primera aproximación del análisis de correlación entre los índices de vegetación del sensor Parrot Sequoia y los datos de parámetros de suelo; se presenta esta información en las Tablas 6.48 y 6.49 y Figuras 6.47 y 6.48.

Tabla 6.39. Índice de vegetación (NDVI) y muestreo de suelo

Código	API	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18 L		Altitud (m s. n. m.)	Fecha	NDVI
		Este (m)	Norte (m)			
CS-P22-01	PAM 22	355153	8819262	4222	19/09/2020	0.291144
CS-P22-02	PAM 22	355130	8819298	4222	19/09/2020	0.394543
CS-P22-03	PAM 22	355161	8819295	4220	19/09/2020	0.438218
CS-P22-04	PAM 22	355132	8819326	4221	19/09/2020	0.491389
CS-P22-05	PAM 22	355148	8819337	4220	19/09/2020	0.530223

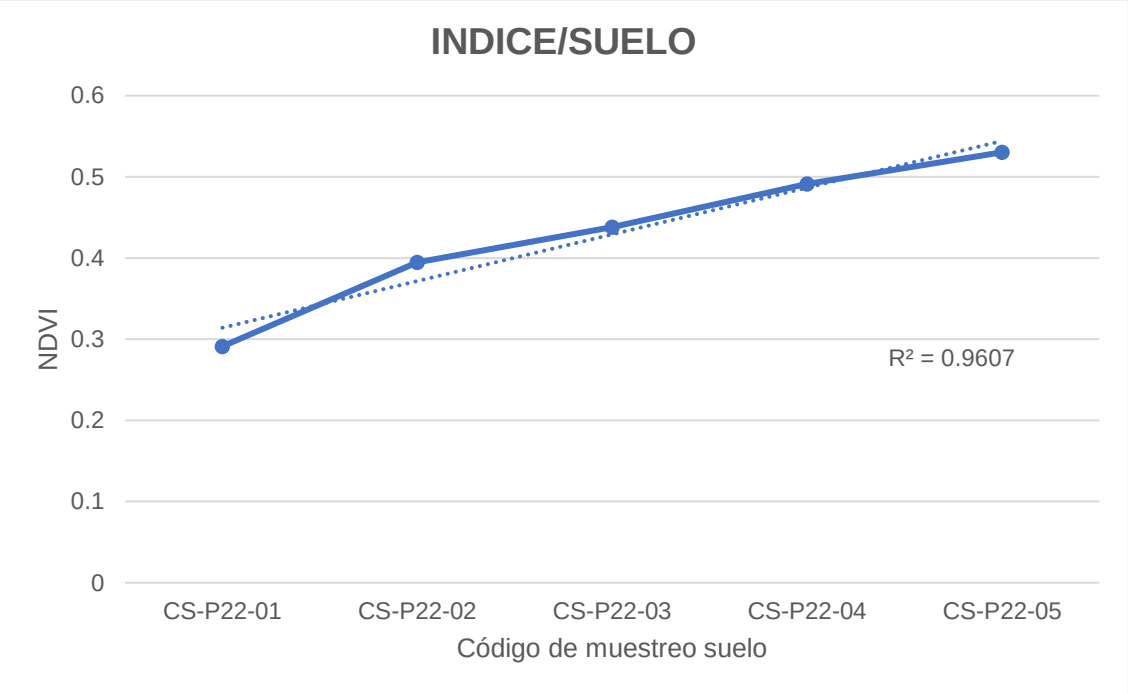


Figura 6.48. Índice de vegetación (NDVI) y muestreo de suelo

Tabla 6.40. Índice de vegetación (NDRE) y muestreo de suelo

Código	API	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18 L		Altitud (m s. n. m.)	Fecha	NDRE
		Este (m)	Norte (m)			
CS-P22-01	PAM 22	355153	8819262	4222	19/09/2020	0.072353
CS-P22-02	PAM 22	355130	8819298	4222	19/09/2020	0.104752
CS-P22-03	PAM 22	355161	8819295	4220	19/09/2020	0.108812
CS-P22-04	PAM 22	355132	8819326	4221	19/09/2020	0.126057
CS-P22-05	PAM 22	355148	8819337	4220	19/09/2020	108222

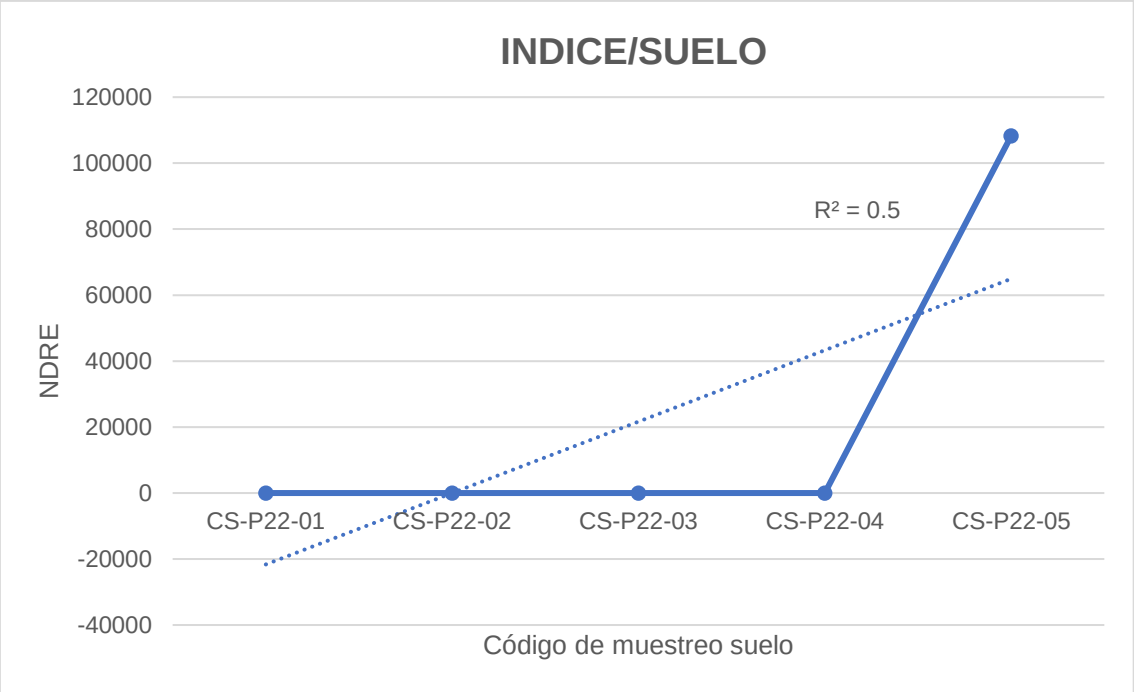


Figura 6.49. Índice de vegetación (NDRE) y muestreo de suelo

6.4.1.4 API PRS

6.4.1.4.1 Muestreo superficial

a) Metales totales

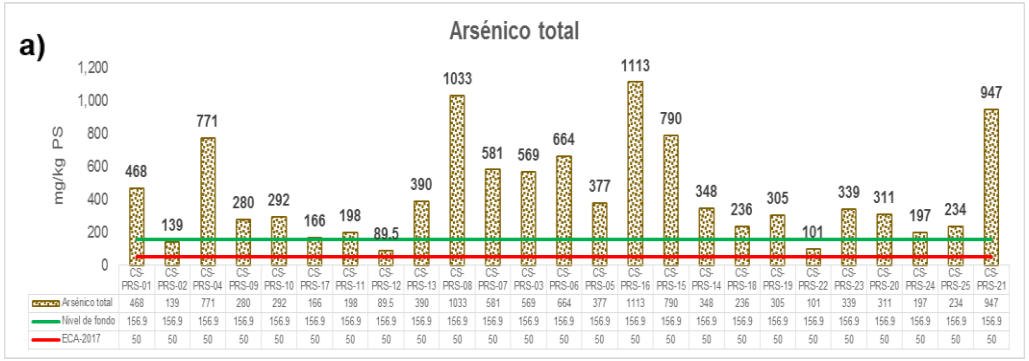
Las concentraciones de metales totales en las muestras del API PRS se presentan en la Tabla 6.41 y Figura 6.50, las cuales se compararon con los ECA para suelo 2017, uso agrícola; donde el arsénico, mercurio y plomo superaron en un 100 % (25/25 de puntos muestreados) los valores de 50 mg/kg PS, 6,6 mg/kg PS y 70 mg/kg PS respectivamente, encontrándose las máximas concentraciones de 1113 mg/kg PS, 178 mg/kg PS y 21064 mg/kg PS respectivamente; bario superó en 12 % (3/25 de puntos muestreados) el valor de 750 mg/kg PS, siendo su máximo valor 1330 mg/kg PS; cadmio superó en 88 % (22/25 de puntos muestreados) el valor de 1,4 mg/kg PS, su valor máximo es de 22,623 mg/kg PS; establecidos en la norma en mención.

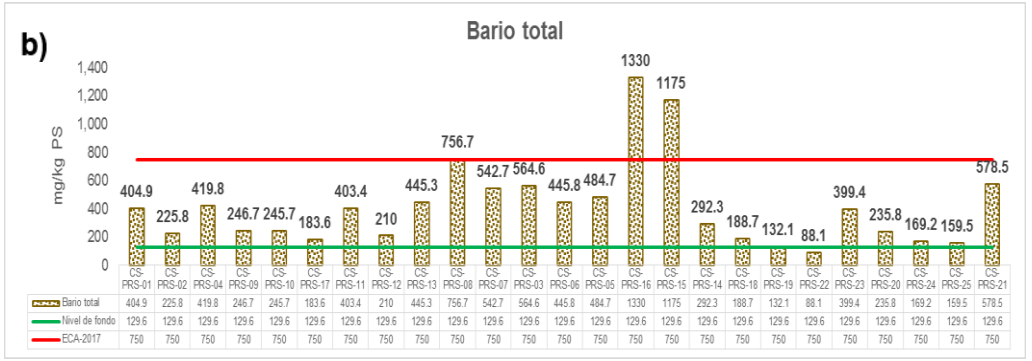
Tabla 6.41. Resultados de parámetros de metales totales del API PRS comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola

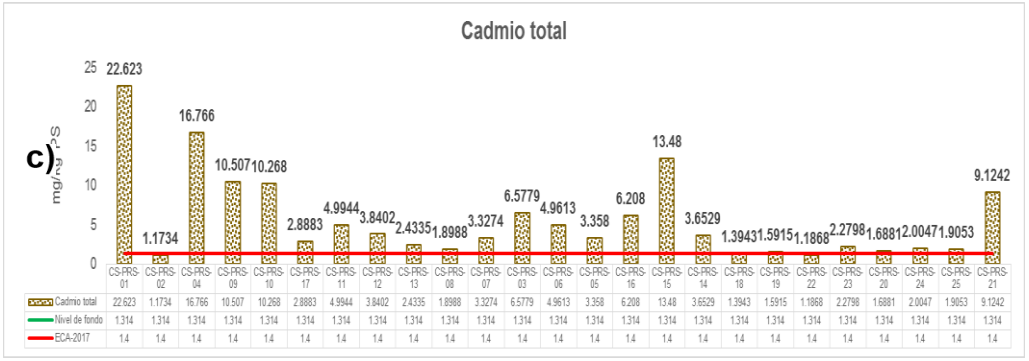
Código	Arsénico Total (mg/kg PS)	Bario Total (mg/kg PS)	Cadmio Total (mg/kg PS)	Mercurio Total (mg/kg PS)	Plomo Total (mg/kg PS)
CS-PRS-01	468	404,9	22,623	25,4	2 368
CS-PRS-02	139	225,8	1,1734	16,1	1489
CS-PRS-04	771	419,8	16,766	24,2	2 891
CS-PRS-09	280	246,7	10,507	49,1	1 584
CS-PRS-10	292	245,7	10,268	25,4	1 488
CS-PRS-17	166	183,6	2,8883	14,1	674
CS-PRS-11	198	403,4	4,9944	37,2	1 896
CS-PRS-12	89,5	210	3,8402	7,15	515
CS-PRS-13	390	445,3	2,4335	60,1	2 548
CS-PRS-08	1 033	756,7	1,8988	72,9	4 742
CS-PRS-07	581	542,7	3,3274	91,4	3 278
CS-PRS-03	569	564,6	6,5779	169	4 452
CS-PRS-06	664	445,8	4,9613	108	3 340

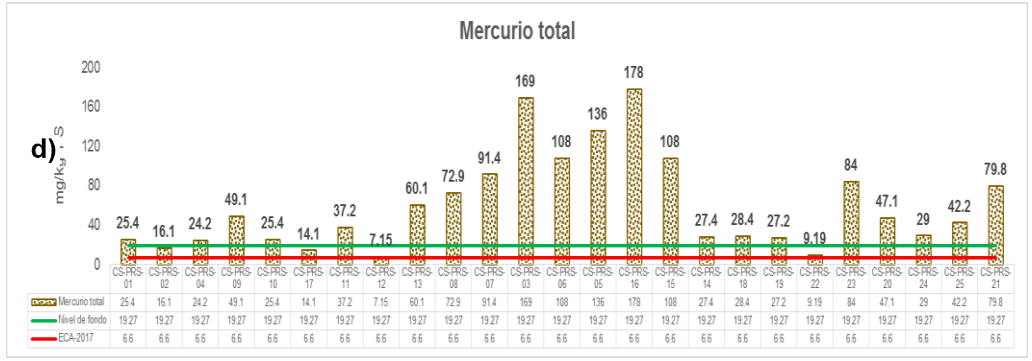
Código	Arsénico Total (mg/kg PS)	Bario Total (mg/kg PS)	Cadmio Total (mg/kg PS)	Mercurio Total (mg/kg PS)	Plomo Total (mg/kg PS)
CS-PRS-05	377	484,7	3,3580	136	3 159
CS-PRS-16	1 113	1 330	6,2080	178	21 064
CS-PRS-15	790	1 175	13,480	108	5 359
CS-PRS-14	348	292,3	3,6529	27,4	2 165
CS-PRS-18	236	188,7	1,3943	28,4	1 039
CS-PRS-19	305	132,1	1,5915	27,2	621
CS-PRS-22	101	88,10	1,1868	9,19	310
CS-PRS-23	339	399,4	2,2798	84,0	2 323
CS-PRS-20	311	235,8	1,6881	47,1	1 098
CS-PRS-24	197	169,2	2,0047	29,0	789
CS-PRS-25	234	159,5	1,9053	42,2	775
CS-PRS-21	947	578,5	9,1242	79,8	3 703
ECA para suelo, uso agrícola (D.S. N.° 011-2017-MINAM)	50	750	1,4	6,6	70

: Concentración que supera el valor del Estándar de calidad ambiental 2017 para suelo de uso agrícola









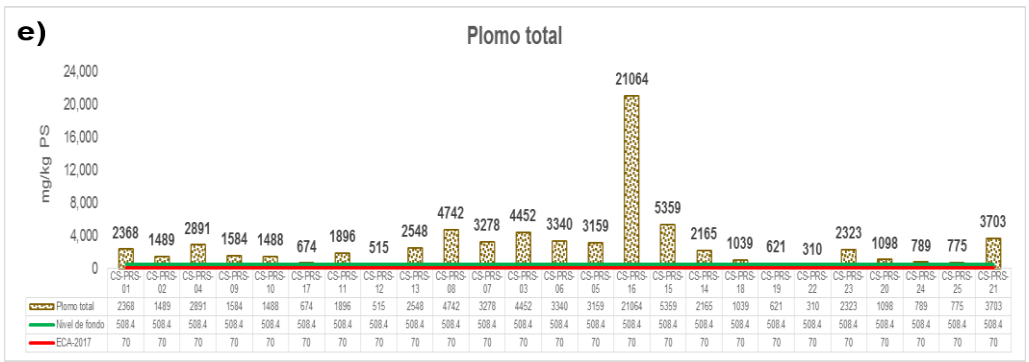


Figura 6.50. Concentraciones de a) arsénico, b) bario, c) cadmio, d) mercurio y e) plomo en el API PRS (superficial), comparados con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores del nivel de fondo

Además, la Tabla 6.42 y Figura 6.51 muestran las concentraciones de elementos de interés de las muestras del API PRS comparados de manera referencial con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola; donde el cobre y zinc excedieron en 100 % (25/25 de puntos muestreados) los valores de 63 mg/kg PS y 250 mg/kg PS respectivamente, con concentraciones de 2965 mg/kg PS y 5757 mg/kg PS respectivamente; plata excedío en 76 % (19/25 de puntos muestreados) el valor de 20 mg/kg PS, que presentó una concentración máxima de 245,3 mg/kg PS; selenio excedió en 84 % (21/25 de puntos muestreados) el valor de 1 mg/kg PS, siendo su máxima concentración 5,735 mg/kg PS; establecidos en la guía en mención

Tabla 6.42. Resultados de parámetros de metales totales del API PRS comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

Código	Cobre Total (mg/kg PS)	Plata Total (mg/kg PS)	Selenio Total (mg/kg PS)	Zinc Total (mg/kg PS)
CS-PRS-01	733	24,56	1,444	5 757
CS-PRS-02	381	17,83	0,881	770
CS-PRS-04	543	41,24	1,491	4 060
CS-PRS-09	564	33,55	1,307	2 837
CS-PRS-10	460	30,36	1,142	3 076
CS-PRS-17	162	9,057	0,920	1 150
CS-PRS-11	414	29,36	1,726	1 575
CS-PRS-12	84	10,01	0,85	845
CS-PRS-13	861	60,26	1,464	667
CS-PRS-08	503	162,0	2,634	413
CS-PRS-07	1 071	86,74	2,290	777
CS-PRS-03	997	108,8	3,556	1 528
CS-PRS-06	1 732	117,4	3,255	754
CS-PRS-05	619	79,46	2,707	897
CS-PRS-16	2 965	245,3	5,735	1 856
CS-PRS-15	1 137	122,5	3,985	3 316
CS-PRS-14	361	37,74	1,705	629
CS-PRS-18	261	20,41	1,367	413
CS-PRS-19	149	18,84	1,156	468
CS-PRS-22	74	10,74	0,751	326
CS-PRS-23	447	56,07	2,291	629
CS-PRS-20	229	41,54	1,527	494
CS-PRS-24	151	14,20	1,253	537
CS-PRS-25	169	35,30	1,454	528
CS-PRS-21	1 019	59,25	2,577	2 254
Guía canadiense de suelo, uso agrícola	63	20	1	250

: Concentraciones que superan los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

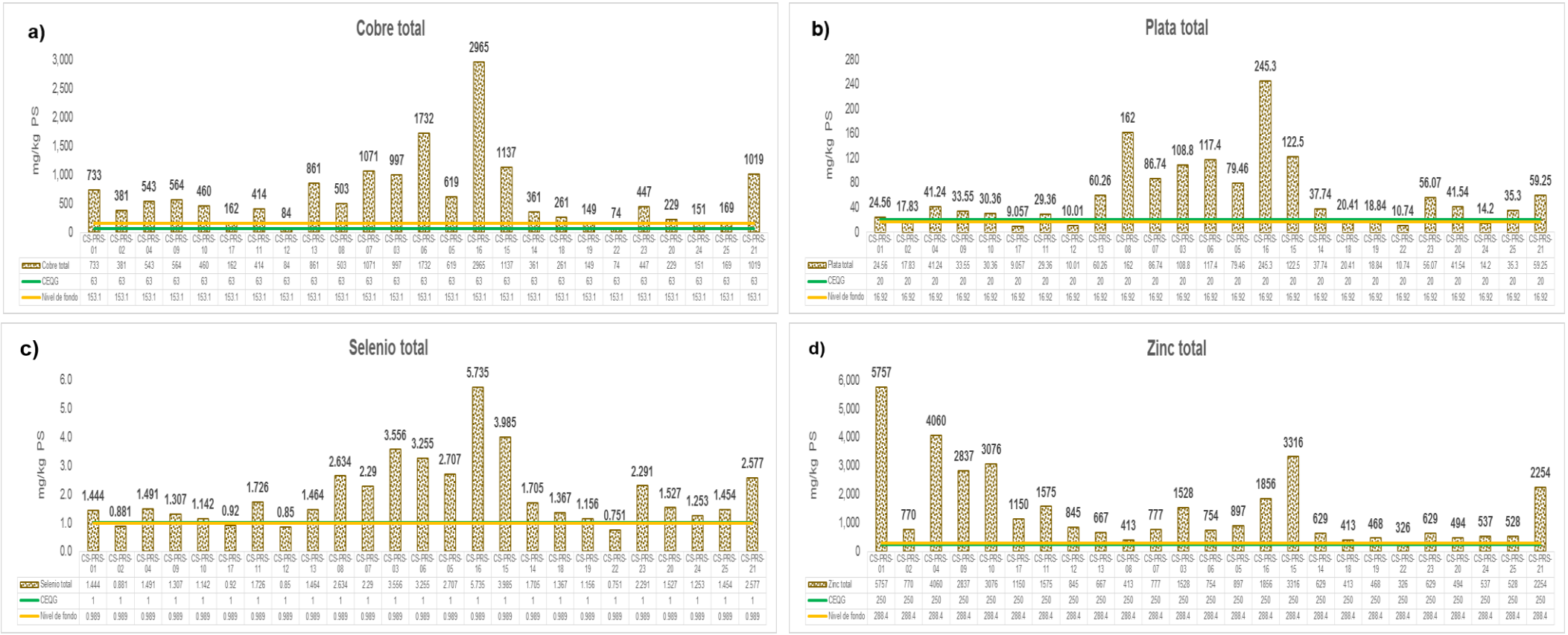


Figura 6.51. Concentraciones de a) cobre, b) plata, c) selenio y d) zinc en el API PAM 20, comparados con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y valores del nivel de fondo

b) Disponibilidad de metales pesados

En la Tabla 6.43 y Figura 6.52 se muestran la concentración de los metales del punto de muestreo CS-PRS-05A, que es una muestra compuesta conformada por los puntos de muestreo CS-PRS-01, CS-PRS-02, CS-PRS-04, CS-PRS-05, CS-PRS-14, CS-PRS-15, CS-PRS-16 y CS-PRS-18.

Arsénico, bario, y mercurio se presentan en la etapa 6 (residual) con valores 516,3 mg/kg, 133,6 mg/kg y 175,4 mg/kg respectivamente; cadmio al igual que plomo presenta concentraciones máximas en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro) con concentraciones 1,870 mg/kg y 1596 mg/kg respectivamente; además, plomo presenta concentraciones elevadas en las etapas 3, 5 y 6.

Cobre presenta las concentraciones más altas en las etapas 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro) con 197,1 mg/kg y 5 (ligado a materia orgánica) con 414,8 mg/kg; plata y selenio cuentan con las concentraciones más altas en la etapa 6 (residual), pero cabe mencionar que selenio cuenta con concentraciones por debajo del límite de detección en las primeras 4 etapas; zinc tiene una máxima concentración en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro) y la mínima concentración en la etapa 1 (extraíbles).

Del mismo modo, en la Tabla 6.43 y Figura 6.53 se muestran la concentración de los metales del punto de muestreo CS-PRS-11A, que es una muestra compuesta conformada por los puntos de muestreo CS-PRS-09, CS-PRS-10, CS-PRS-11 y CS-PRS-17.

Arsénico presenta en la etapa 1 y 2 concentraciones por debajo del límite de detección siendo en la etapa 6 (residual) su máxima concentración 264,7 mg/kg; la máxima concentración de bario es en la etapa 3 (ligado a carbonatos) con 53,75 mg/kg, pero presentan concentraciones similares en las etapas 4, y 6; la concentración máxima de cadmio se da en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro); mercurio tiene su concentración máximo 55,02 mg/kg en la etapa 6 (residual) y su concentración mínima 0,027 mg/kg en la etapa 3 (ligado a carbonatos); por su parte plomo presenta su máxima concentración en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro); luego presenta concentraciones de 245,6 mg/kg y 345,1 mg/kg en las etapas 5 y 6 respectivamente.

Cobre presenta su máxima concentración en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro) 133,8 mg/kg; plata presenta su concentración máxima de 20,6 mg/kg en la etapa 6 (residual); la concentración de selenio en las primeras 4 etapas están por debajo del límite de detección; zinc presenta la concentración máxima de 876,7 mg/kg en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro) y la concentración mínima está por debajo límite de detección en la etapa 1 (extraíbles).

Tabla 6.43. Resultados de parámetros de disponibilidad de metales pesados por la metodología de Tessier en el API PRS (muestreo superficial)

Código		CS-PRS-05A						CS-PRS-11A					
Parámetro	Unidad	Tessier – Extraíbles (Etapa 1)	Tessier – Intercambiable y adsorbidas (Etapa 2)	Tessier – Ligado a carbonato (Etapa 3)	Tessier – Fácilmente reducibles y óxidos de hierro (Etapa 4)	Tessier – ligado a materia orgánica (Etapa 5)	Tessier – Residual (Etapa 6)	Tessier – Extraíbles (Etapa 1)	Tessier – Intercambiable y adsorbidas (Etapa 2)	Tessier – Ligado a carbonato (Etapa 3)	Tessier – Fácilmente reducibles y óxidos de hierro (Etapa 4)	Tessier – ligado a materia orgánica (Etapa 5)	Tessier – Residual (Etapa 6)
Arsénico (As)	mg/kg	0,47	< 0,300	0,90	23,49	30,53	516,3	< 0,30	< 0,300	0,52	10,79	4,97	264,7
Bario (Ba)	mg/kg	1,36	45,77	45,21	63,92	45,23	133,6	0,31	12,00	53,75	53,63	39,08	52,90
Cadmio (Cd)	mg/kg	< 0,050	2,507	0,932	1,870	0,339	1,137	< 0,050	1,397	1,907	1,968	0,226	0,748
Cobre (Cu)	mg/kg	3,57	2,05	80,63	197,1	414,8	148,3	0,63	0,73	73,74	133,8	129,0	57,11
Mercurio (Hg)	mg/kg	0,064	0,041	0,056	0,575	24,35	175,4	0,027	0,017	0,013	0,215	20,20	55,02
Plata (Ag)	mg/kg	0,029	8,499	0,0179	0,233	0,122	57,75	< 0,007	1,043	0,0071	0,216	2,697	20,60
Plomo (Pb)	mg/kg	9,34	69,30	612,8	1596	961,1	1184	0,58	0,81	144,0	637,3	245,6	345,1
Selenio (Se)	mg/kg	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	1,14	2,15	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	0,51	0,74
Zinc (Zn)	mg/kg	< 5,0	94,7	275,9	707,4	279,6	693,4	< 5,0	9,5	447,9	876,7	256,4	602,1

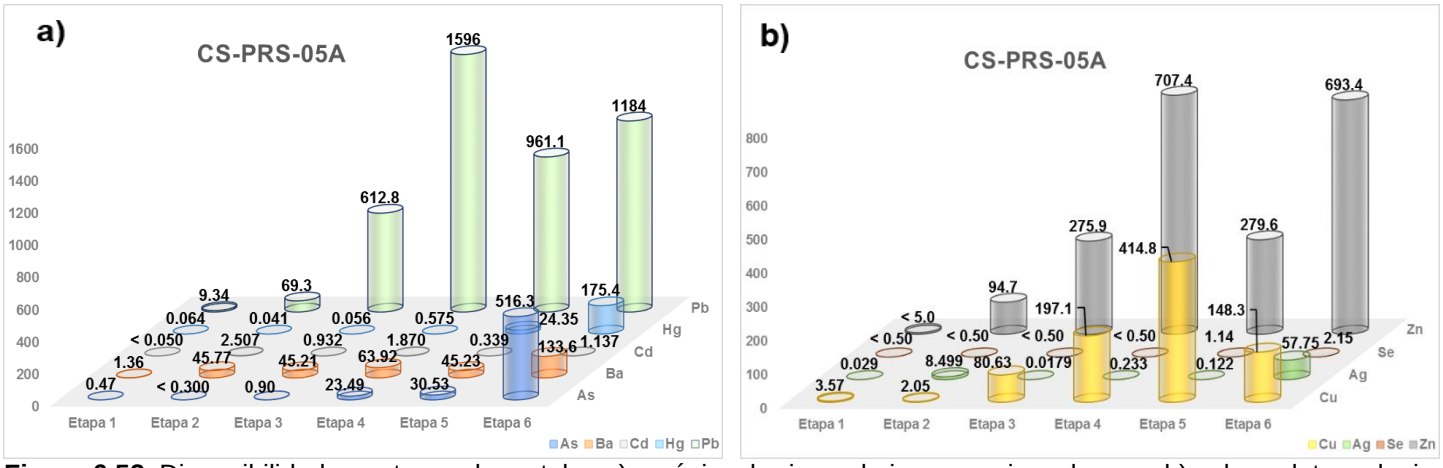


Figura 6.52. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-PRS-05A (muestreo superficial) del API PRS

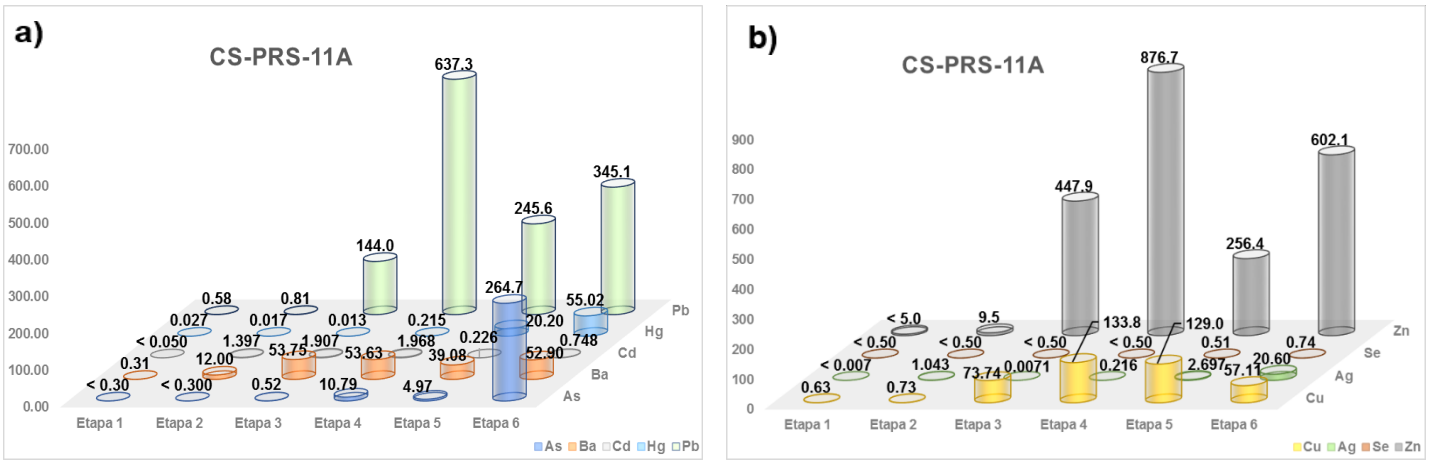


Figura 6.53. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-PRS-11A (muestreo superficial) del API PRS

Además, en la Tabla 6.44 y Figura 6.54 se muestran la concentración de los metales del punto de muestreo CS-PRS-25A, que es una muestra compuesta conformada por los puntos de muestreo CS-PRS-19, CS-PRS-20, CS-PRS-22, CS-PRS-23, CS-PRS-24 y CS-PRS-25.

Arsénico presenta en la etapa 6 (residual) su máxima concentración 440,3 mg/kg y la concentración mínima donde no supera el límite de detección en la etapa 2 (intercambiables y absorbibles); bario y mercurio presentan concentraciones de 172,2 mg/kg y 164,1 mg/kg respectivamente, ambas concentraciones se encuentran en la etapa 6 (residual); cadmio presenta su máxima concentración en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro) y la concentración mínima en la etapa 1 (extraíbles) donde la concentración no supera el límite de detección; plomo presenta las máximas concentraciones en las etapas 4 y 6 con concentraciones de 651,6 mg/kg y 856,0 mg/kg respectivamente.

Cobre tiene una concentración de 199,0 mg/kg que es su máxima concentración en la etapa 5 (ligada a materia orgánica); plata cuenta con una máxima concentración 61,37 mg/kg en la etapa 6 (residual); selenio en las primeras 4 etapas las concentraciones no superan el límite de detección; zinc presenta sus concentraciones máximas en la etapa 4 y 6 con concentraciones de 381,2 mg/kg y 422,3 mg/kg respectivamente, mientras que las concentraciones mínimas se encuentra en la etapa 1 y 2 con concentraciones que no superan el límite de detección.

De la misma manera en la Tabla 6.44 y Figura 6.55 se muestra la concentración de los metales del punto de muestreo CS-PRS-21A que es una muestra compuesta conformada por los puntos de muestreo CS-PRS-06, CS-PRS-07, CS-PRS-08, CS-PRS-12, CS-PRS-13 y CS-PRS-21.

Arsénico presenta la máxima concentración 840,7 mg/kg en la etapa 6 (residual) y la mínima concentración que está por debajo del límite de detección en la etapa 3 (ligado a carbonato); bario presenta sus máximas concentraciones 92,55 mg/kg y 165,5 mg/kg en las etapas 5 y 6 respectivamente; cadmio presenta su máxima concentración de 1,860 mg/kg en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro); mercurio presenta sus máximas concentraciones en las etapas 5 y 6 con concentraciones de 30,88 mg/kg y 256,6 mg/kg respectivamente; plomo presenta concentración mínima en la etapa 1 (extraíbles) y la concentración máxima en la etapa 6 (residual) 1,98 mg/kg y 1731 mg/kg respectivamente.

Cobre presenta una concentración máxima de 463,5 mg/kg en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro) y la concentración mínima de 3,20 mg/kg en la etapa 1 (extraíbles); plata presenta concentraciones mínimas de 0,031 mg/kg y máximas de 76,50 mg/kg en las etapas 1 y 6 respectivamente; selenio en las primeras 4 etapas las concentraciones no superan el límite de detección; zinc presenta sus concentraciones máximas en la etapa 4 y 6 con concentraciones de 392,4 mg/kg y 586,7 mg/kg respectivamente, mientras que las concentración mínima se encuentra en la etapa 1 (extraíbles) con concentraciones que no superan el límite de detección.

Tabla 6.44. Resultados de parámetros de disponibilidad de metales pesados por la metodología de Tessier en el API PRS (muestreo superficial)

Código		CS-PRS-25A						CS-PRS-21A					
Parámetro	Unidad	Tessier – Extraíbles (Etapa 1)	Tessier – Intercambiable y adsorbidas (Etapa 2)	Tessier – Ligado a carbonato (Etapa 3)	Tessier – Fácilmente reducibles y óxidos de hierro (Etapa 4)	Tessier – ligado a materia orgánica (Etapa 5)	Tessier – Residual (Etapa 6)	Tessier – Extraíbles (Etapa 1)	Tessier – Intercambiable y adsorbidas (Etapa 2)	Tessier – Ligado a carbonato (Etapa 3)	Tessier – Fácilmente reducibles y óxidos de hierro (Etapa 4)	Tessier – ligado a materia orgánica (Etapa 5)	Tessier – Residual (Etapa 6)
Arsénico (As)	mg/kg	0,34	< 0,300	1,24	22,21	19,86	440,3	< 0,30	0,322	1,66	33,07	31,27	840,7
Bario (Ba)	mg/kg	0,49	7,94	40,55	44,34	48,46	172,2	0,79	20,53	53,44	62,53	92,55	165,5
Cadmio (Cd)	mg/kg	< 0,050	0,602	0,690	1,161	0,176	0,723	< 0,050	0,975	0,910	1,860	0,308	1,022
Cobre (Cu)	mg/kg	2,00	1,17	38,31	128,1	199,0	107,6	3,20	2,35	193,7	463,5	275,8	220,7
Mercurio (Hg)	mg/kg	0,036	0,027	0,022	0,268	36,61	164,1	0,108	0,11	0,077	1,361	30,88	256,6
Plata (Ag)	mg/kg	0,011	1,156	0,0061	0,269	0,268	61,37	0,031	5,947	0,0155	0,653	2,024	76,50
Plomo (Pb)	mg/kg	2,49	1,87	227,4	651,6	353,4	856,0	1,98	6,82	307,6	1091	563,6	1731
Selenio (Se)	mg/kg	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	0,98	1,95	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	0,61	3,32
Zinc (Zn)	mg/kg	< 5,0	< 5,0	121,6	381,2	132,1	422,3	< 5,0	8,2	147,6	392,4	137,2	586,7

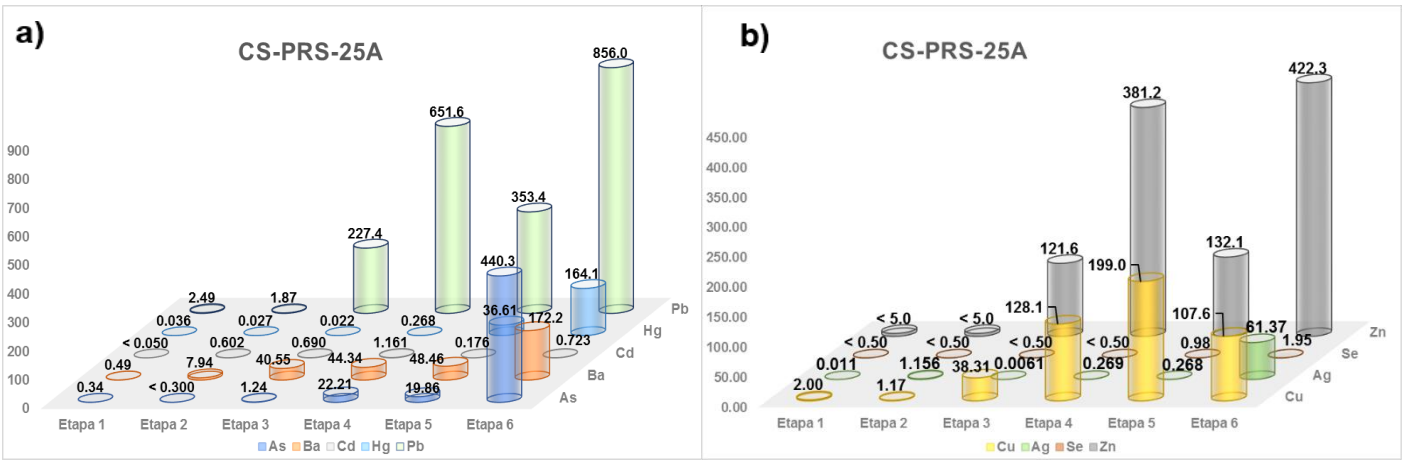


Figura 6.54. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-PRS-25A (muestreo superficial) del API PRS

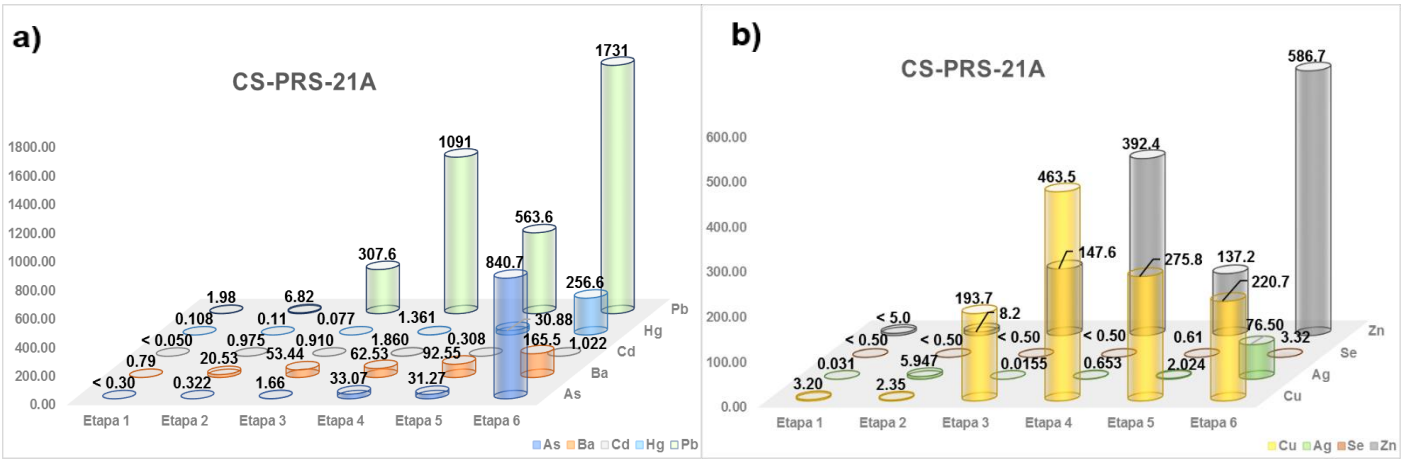


Figura 6.55. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-PRS-21A (muestreo superficial) del API PRS

c) ABA

Para definir la generación de acidez, se consideró el primer y segundo criterio de análisis de la prueba ABA, donde la muestra compuesta CS-PRS-11A está conformada por los puntos de muestreo CS-PRS-09, CS-PRS-10, CS-PRS-11 y CS-PRS-17; en la Tabla 6.45 se observa que dicha muestra compuesta no es generadora de acidez.

Tabla 6.45. Resultados obtenidos en la prueba estática de balance ácido-base de la muestra CS-PRS-11A del API PRS (muestreo superficial)

Código		CS-PRS-11A
Fisicoquímicos (ABA)		
Grado de Efervescencia	-	2
pH en Pasta	Unidades pH	7,580
Potencial de Acidez Máximo (PA)	t CaCO3/1000t	4,69
Potencial de Neutralización Neto (PN)	t CaCO3/1000 t	17,67
Potencial de Neutralización	t CaCO3/1000 t	22,36
Relación NP/MPA	-	4,77
Azufre Total	%	0,15
*Criterio 1: Para un NNP menor a cero, la muestra es «generadora neta de ácido». Sin embargo, para un NNP que varía entre -20 y +20 Kg CaCo3/Ton de muestra, corresponde a un rango de «incertidumbre». Para valores mayores		

Código	CS-PRS-11A
Fisicoquímicos (ABA)	
a +20 Kg CaCo3/Ton, se considera a la muestra es «potencial no generador de ácido»; mientras que, para valores menores a -20 Kg CaCo3/Ton se considera «potencial generador de ácido». **Criterio 2: Proporción entre PN y PA = RNP, para un PN/PA < 1:1 es probable que se genere acidez, mientras que para el rango de PN/PA entre 1:1 y 3:1 corresponde a una zona de «incertidumbre». Cuando el PN/PA >3:1, la muestra es «potencial no generador de acidez».	

6.4.1.4.2 Muestreo a profundidad

a) Metales totales

En la Tabla 6.46 y Figura 6.56, para el muestreo de profundidad (0,15 m – 0,30 m), se muestran las concentraciones de metales totales en el API PRS en comparación con los ECA para suelo 2017, uso agrícola; donde arsénico, cadmio, mercurio y plomo superaron en un 100 % (6/6 de puntos muestreados) los valores de 50 mg/kg PS, 1,4 mg/kg PS, 6,6 mg/kg PS y 70 mg/kg PS respectivamente; bario solo superó el valor de 750 mg/kg PS en 2 puntos (CS-PRS-19.2 y CS-PRS-23.2) que representó el 33,33 % (2/6 de puntos muestreados); establecidos en la norma en mención.

Tabla 6.46. Resultados de parámetros de metales totales del API PRS comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola

Código	Arsénico Total (mg/kg PS)	Bario Total (mg/kg PS)	Cadmio Total (mg/kg PS)	Mercurio Total (mg/kg PS)	Plomo Total (mg/kg PS)
CS-PRS-19.2	640	1 632	6,1659	67,6	3 964
CS-PRS-22.2	281	304,2	6,9653	17,5	1 393
CS-PRS-23.2	667	936,0	4,4847	119	5 378
CS-PRS-20.2	393	472,0	3,6918	72,8	2 207
CS-PRS-24.2	371	358,3	4,9831	46,4	1 840
CS-PRS-25.2	324	314,8	2,8493	92,5	4 641
ECA para suelo, uso agrícola (D.S. N.° 011-2017-MINAM)	50	750	1,4	6,6	70

: Concentración que supera el valor del Estándar de calidad ambiental 2017 para suelo de uso agrícola

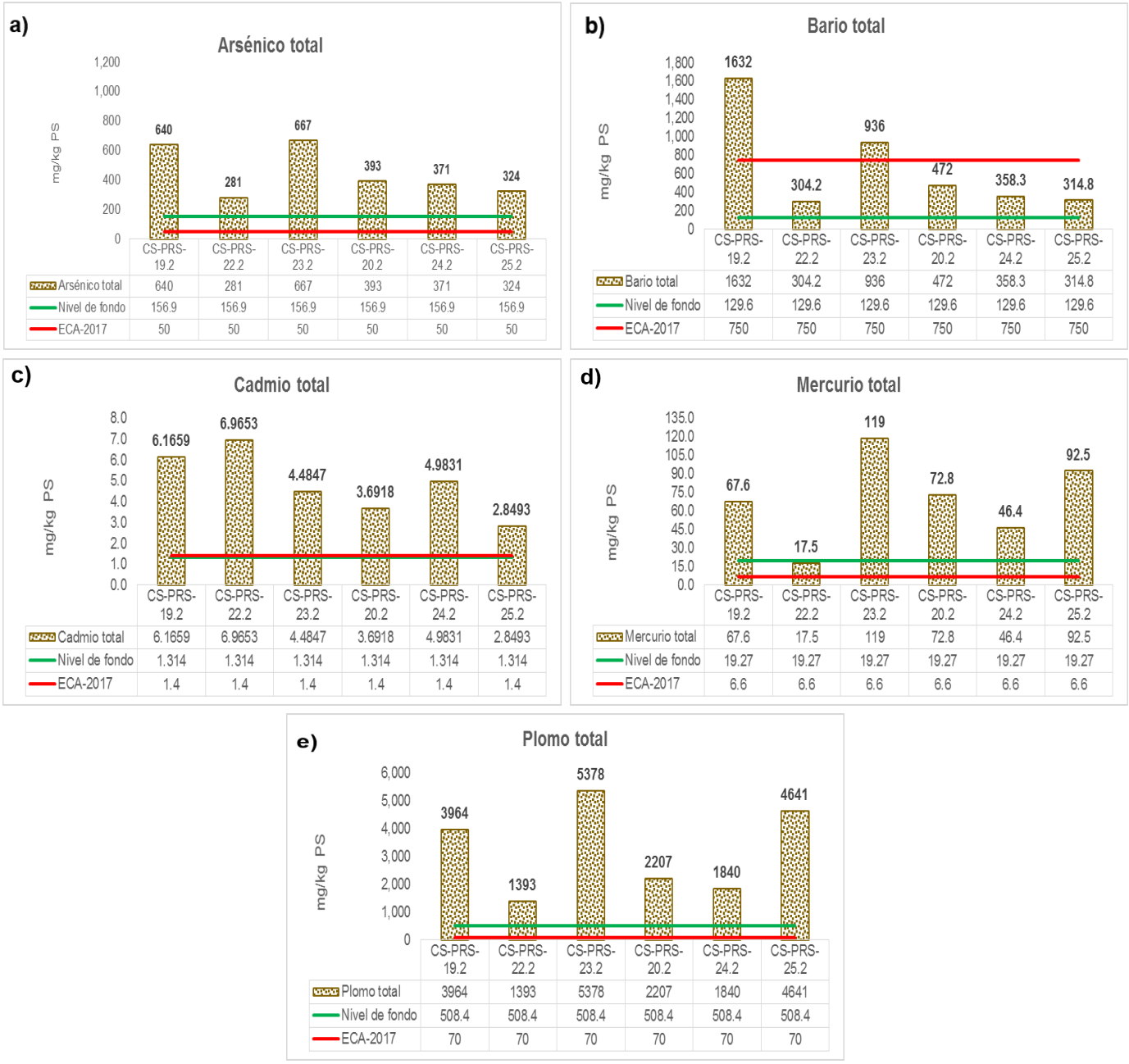


Figura 6.56. Concentraciones de a) arsénico, b) bario, c) cadmio, d) mercurio y e) plomo en el API PRS (profundidad), comparados con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores del nivel de fondo

La Tabla 6.47 y Figura 6.57 muestran los metales de interés comparados de manera referencial con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola; donde el cobre, selenio y zinc excedieron en un 100 % (6/6 de puntos muestreados) los valores de 63 mg/kg PS, 1 mg/kg PS y 250 mg/kg PS respectivamente; la plata excedió en un 83,33 % (5/6 de puntos muestreados) el valor de 20 mg/kg PS, solo sin superarlo en el punto CS-PRS-22.2, establecidos en la guía en mención.

Tabla 6.47. Resultados de parámetros de metales totales del API PRS comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

Código	Cobre Total (mg/kg PS)	Plata Total (mg/kg PS)	Selenio Total (mg/kg PS)	Zinc Total (mg/kg PS)
CS-PRS-19.2	727	72,88	2,832	1 909
CS-PRS-22.2	246	17,67	1,080	2 062
CS-PRS-23.2	948	138,0	3,251	1 198
CS-PRS-20.2	521	63,95	2,100	1 163
CS-PRS-24.2	367	40,07	1,876	1 240
CS-PRS-25.2	263	51,27	2,161	794
Guía canadiense de suelo, uso agrícola	63	20	1	250

: Concentraciones que superan los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

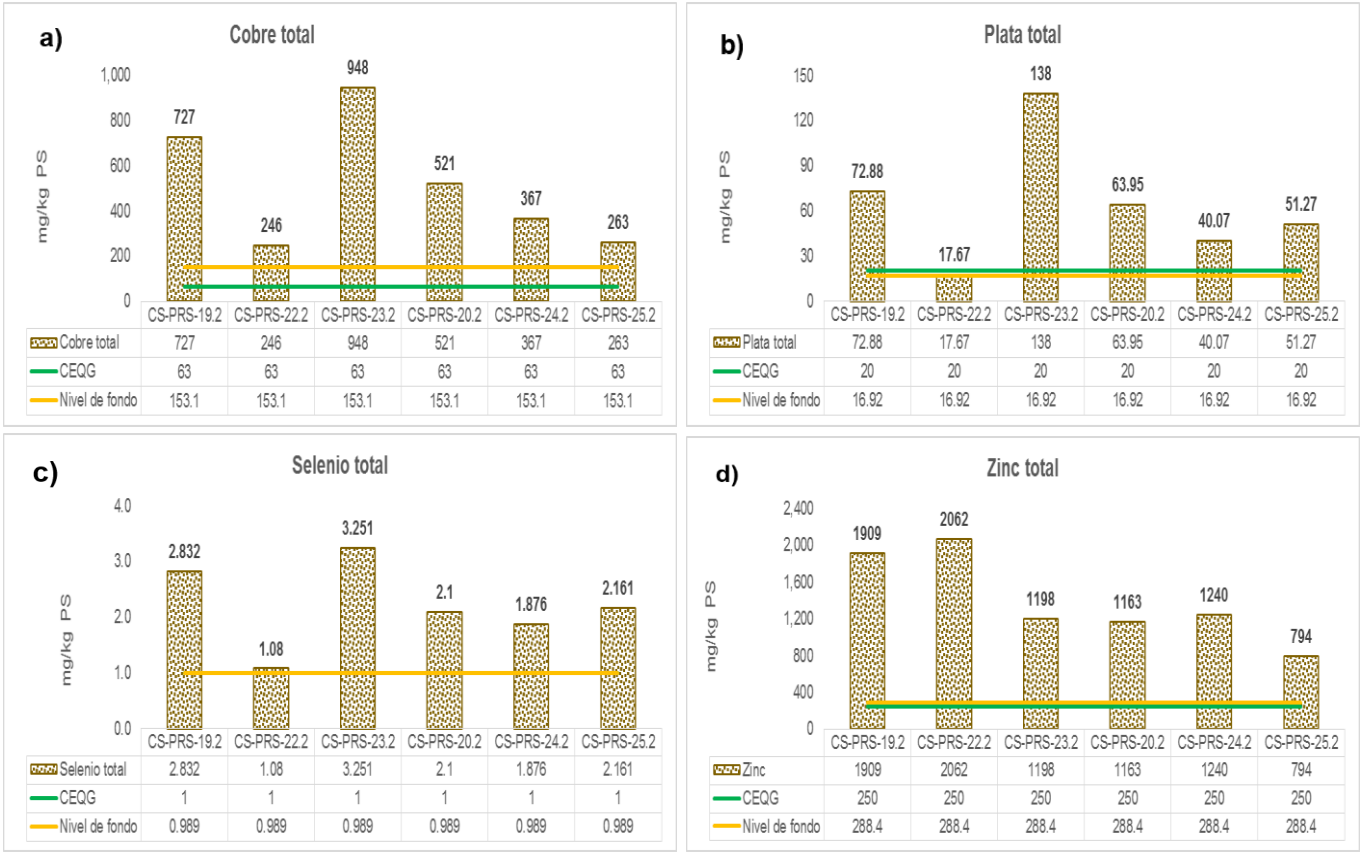


Figura 6.57. Concentraciones de a) cobre, b) plata, c) selenio y d) zinc en el API PAM 20, comparados con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y valores del nivel de fondo

b) Disponibilidad de metales pesados

En la Tabla 6.48 y Figura 6.58 se muestran la concentración de los metales del punto de muestreo CS-PRS-25.2A, que es una muestra compuesta conformada por los puntos de muestreo CS-PRS-19.2, CS-PRS-20.2, CS-PRS-22.2, CS-PRS-23.2, CS-PRS-24.2 y CS-PRS-25.2; esta muestra fue colectada a una profundidad de 0,15 m a 0,30 m.

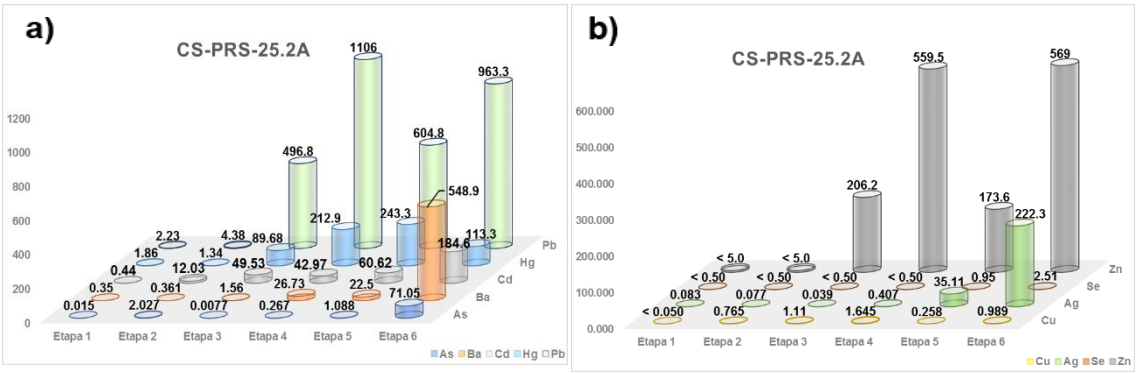
Arsénico presenta su máxima concentración en la etapa 6 (residual) de 71,05 mg/kg y su valor mínimo en la etapa 3 (ligado a carbonato) de 0.0077 mg/kg; bario y cadmio presentan sus máximas concentraciones en la etapa 6 (residual) de 548,9 mg/kg y 184,6 mg/kg respectivamente; mercurio presentan sus máximas concentraciones en las etapas 4 y 5 con concentraciones de 212,9 mg/kg y 243,3 mg/kg respectivamente; plomo presenta su máxima concentración en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro) de 1106 mg/kg y su concentración mínima en la etapa 1 (extraíbles) de 2,23 mg/kg.

Cobre presenta una concentración que no supera el límite de detección en la etapa 1 (extraíbles) y tiene una concentración de 1,645 mg/kg que es su máxima concentración en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro); plata cuenta con una máxima concentración 222,3 mg/kg en la etapa 6 (residual); selenio en las primeras 4 etapas las concentraciones no superan el límite de detección; zinc presenta sus concentraciones máximas en la etapa 4 y 6 con concentraciones de 559,5 mg/kg y 569 mg/kg respectivamente, mientras que las concentraciones mínimas se encuentra en la etapa 1 y 2 con concentraciones que no superan el límite de detección.

Tabla 6.48. Resultados de parámetros de disponibilidad de metales pesados por la metodología de Tessier en el API PRS (muestreo a profundidad)

Código		CS-PRS-25.2A					
Parámetro	Unidad	Tessier – Extraíbles (Etapa 1)	Tessier – Intercambiable y adsorbidas (Etapa 2)	Tessier – Ligado a carbonato (Etapa 3)	Tessier – Fácilmente reducibles y óxidos de hierro (Etapa 4)	Tessier – ligado a materia orgánica (Etapa 5)	Tessier – Residual (Etapa 6)
Arsénico (As)	mg/kg	0,35	0,361	1,56	26,73	22,50	548,9
Bario (Ba)	mg/kg	0,44	12,03	49,53	42,97	60,62	184,6
Cadmio (Cd)	mg/kg	< 0,050	0,765	1,110	1,645	0,258	0,989
Cobre (Cu)	mg/kg	1,86	1,34	89,68	212,9	243,3	113,3
Mercurio (Hg)	mg/kg	0,083	0,077	0,039	0,407	35,11	222,3
Plata (Ag)	mg/kg	0,015	2,027	0,0077	0,267	1,088	71,05
Plomo (Pb)	mg/kg	2,23	4,38	496,8	1106	604,8	963,3
Selenio (Se)	mg/kg	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	0,95	2,51
Zinc (Zn)	mg/kg	< 5,0	< 5,0	206,2	559,5	173,6	569,0

Figura 6.58. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-PRS-21A (muestreo a profundidad) del API PRS



- **Profundidad en calicata**

a) Metales totales

En la Tabla 6.49 se presenta las concentraciones de metales totales de las muestras CA-04A, CA-04B, CA-04C y CA-04D, que son muestras a profundidad en calicata, comparadas con los ECA para suelo 2017, uso agrícola; donde el arsénico y plomo superaron en un 100 % (4/4 de muestras colectadas) los valores de 50 mg/kg PS y 70 mg/kg PS respectivamente; cadmio superó en un 75 % (3/4 muestras colectadas) el valor de 1,4 mg/kg PS; mercurio superó el valor de 6,6 mg/kg PS en un 25 % (1/4 muestras colectadas) en la muestra más superficial; establecidos en la norma en mención.

Tabla 6.49. Resultados de parámetros de metales totales de la calicata CA-04 en el API PRS comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola

Código de Calicata	Código de muestra	Horizonte	Arsénico Total (mg/kg PS)	Bario Total (mg/kg PS)	Cadmio Total (mg/kg PS)	Mercurio Total (mg/kg PS)	Plomo Total (mg/kg PS)
CA-04	CA-04A	Cg1	1 427	654,7	2,8624	37,6	4 332
	CA-04B	Cg2	700	166,4	1,1445	3,34	2 166

Código de Calicata	Código de muestra	Horizonte	Arsénico Total (mg/kg PS)	Bario Total (mg/kg PS)	Cadmio Total (mg/kg PS)	Mercurio Total (mg/kg PS)	Plomo Total (mg/kg PS)
	CA-04C	Cg3	60,2	103,5	1,4400	0,810	336
	CA-04D	Cr	300	142,6	1,6344	6,33	1 243
ECA para suelo, uso agrícola (D.S. N.° 011-2017-MINAM)			50	750	1,4	6,6	70-

: Concentración que supera el valor del Estándar de calidad ambiental 2017 para suelo de uso agrícola

Además, en la Tabla 6.50 se compara de manera referencial las concentraciones de los elementos de interés de las muestras de la calicata CA-04 del API PRS, con la guía canadiense de suelo, uso agrícola; donde el cobre y zinc excedieron el 100 % (4/4 de muestras colectadas) los valores de 63 mg/kg PS y 250 mg/kg PS respectivamente; plata y selenio excedieron en 25 % (1/4 muestras colectadas) en la muestra CA-04A los valores de 20 mg/kg PS y 1 mg/kg PS respectivamente; establecidos en la guía en mención.

Tabla 6.50. Resultados de parámetros de metales totales de la calicata CA-04 en el API PRS, comparados de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

Código de Calicata	Código de muestra	Horizonte	Cobre Total (mg/kg PS)	Plata Total (mg/kg PS)	Selenio Total (mg/kg PS)	Zinc Total (mg/kg PS)
CA-04	CA-04A	Cg1	703	75,80	1,863	994
	CA-04B	Cg2	762	18,00	0,634	572
	CA-04C	Cg3	228	8,111	0,705	295
	CA-04D	Cr	301	4,200	0,816	597
Guía canadiense de suelo, uso agrícola			63	20	1	250

: Concentraciones que superan los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

b) Disponibilidad de metales pesados

En la Tabla 6.51 y Figura 6.59 se aprecian las concentraciones de los metales del punto de muestreo CA-04B, ubicado en el API PRS que se representa en el punto de muestreo CS-PRS-04.

Arsénico y plomo presentan concentraciones máximas de 653,9 mg/kg 1540 mg/kg respectivamente en la etapa 6 (residual), además del arsénico presenta concentraciones por debajo del límite de detección , las demás etapas 1 al 5 la concentración está por debajo del límite de detección en las primeras 5 etapas y el plomo presenta en la etapa 1(extraíbles) concentraciones por debajo del límite de detección; bario presenta su máxima concentración de 73,86 mg/kg en la etapa 5 (ligado a materia orgánica) y su mínima concentración que se encuentra por debajo del límite de detección en la etapa 2 (intercambiables y adsorbidas); cadmio presenta concentraciones por debajo del límite de detección en la etapa 1 (extraíbles) y la máxima concentración de 0,370 mg/kg en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro); mercurio se encuentra en mayores concentraciones en la etapa 5 y 6 con concentraciones de 5,819 mg/kg y 5,009 mg/kg respectivamente y presenta concentraciones por debajo de límite de detección en las 3 primeras etapas.

Cobre y plata varían sus concentraciones por las distintas etapas siendo la concentración máxima de 442,1 mg/kg y 2,256 mg/kg en la etapa 6 (residual), la concentración mínima de 0,08 mg/kg de arsénico se encuentra en la etapa 1 (extraíbles) y la de plata está por debajo del límite de detección en la etapa 1 (extraíbles); selenio presenta concentraciones por debajo del límite de detección en las primeras 5 etapas; zinc presenta concentraciones por debajo del límite de detección en las etapa 1 (extraíbles) la concentración máxima es de 378,6 mg/kg en la etapa 6 (residual).

Tabla 6.51. Resultados de parámetros de disponibilidad de metales pesados por la metodología de Tessier en la calicata CA-04B del API PRS (muestreo a profundidad)

Calicata		Calicata 04					
Código		CA-04B					
Parámetro	Unidad	Tessier – Extraíbles (Etapa 1)	Tessier – Intercambiable y adsorbidas (Etapa 2)	Tessier – Ligado a carbonato (Etapa 3)	Tessier – Fácilmente reducibles y óxidos de hierro (Etapa 4)	Tessier – ligado a materia orgánica (Etapa 5)	Tessier – Residual (Etapa 6)
Arsénico (As)	mg/kg	< 0,30	< 0,300	< 0,30	< 0,30	< 0,30	653,9
Bario (Ba)	mg/kg	0,25	< 0,50	24,99	6,13	73,86	34,61
Cadmio (Cd)	mg/kg	< 0,050	0,308	0,162	0,370	0,057	0,110
Cobre (Cu)	mg/kg	0,08	0,52	21,06	259,2	94,49	442,1
Mercurio (Hg)	mg/kg	< 0,010	< 0,010	< 0,010	0,284	5,819	5,009
Plata (Ag)	mg/kg	< 0,007	1,802	0,0053	0,270	1,384	2,256
Plomo (Pb)	mg/kg	< 0,50	5,63	46,90	255,8	418,9	1540
Selenio (Se)	mg/kg	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	0,53
Zinc (Zn)	mg/kg	< 5,0	6,7	11,24	171,8	58,71	378,6

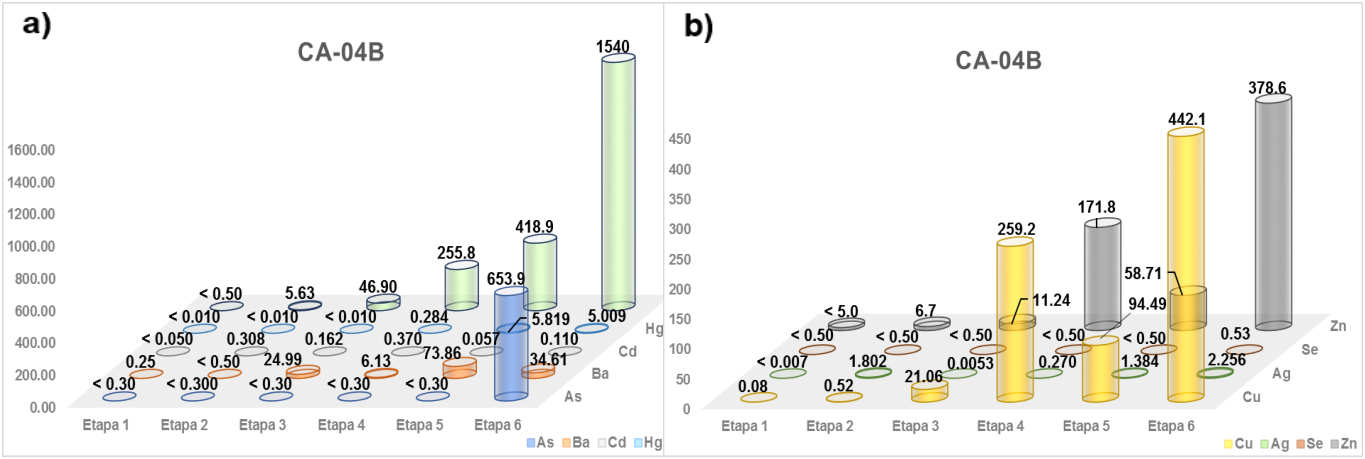


Figura 6.59. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CA-04B (muestreo a profundidad) del API PRS

c) Análisis mineralógico por difracción de rayos X

Se realizó el análisis de difracción de rayos X a una muestra puntual tomada de una calicata (CA-04) que está dentro del API PRS exactamente en el punto de muestreo CS-PRS-04, la muestra fue tomada en un horizonte Cg2, en el análisis se encontraron minerales como: cuarzo, plagioclasa, clorita, jarosita; tal y como se detalla en la Tabla 6.52.

Tabla 6.52. Resultados obtenidos de difracción de rayos X en calicata CA-04

Código	CA-04B	
Nombre del mineral	Formula general	Resultado aproximado (%)
Cuarzo	SiO2	72
Mica (Muscovita)	KAl2(Si3Al)O10(OH,F)2	10

Código	CA-04B	
Nombre del mineral	Formula general	Resultado aproximado (%)
Plagioclasa (Albita)	Na(Al,Si)4O8	9
Clorita (Clinocloro)	(Mg,Fe)5Al(Si3Al)O10(OH)8	4
Caolinita	Al2Si2O5(OH)4	2
Jarosita	KFe3(SO4)2(OH)6	2

d) Análisis mineralógico por microscopia electrónica de barrido

Los resultados del análisis mineralógico de barrido electrónico de la muestra CA-04D, corresponde a una muestra puntual colectada en el horizonte Cgr, que presenta una predominancia de hierro, con presencia de calcio, además presenta minerales como la pirita, calcopirita y galena portadores de azufre y zinc, en algunos de estos minerales con aportes de plomo producto de la presencia de galena y fosfato_Pb, tal y como se detalla en la Tabla 6.53.

Tabla 6.53. Resultados obtenidos de microscopia electrónica de barrido en calicata CA-04 (profundidad)

Código	CA-04D												
Minerales	Composición química (%) en peso												Total
	Fe	Ti	Zn	Zr	Si	Cr	Pb	Ce	La	S	P	O	
Goethita	65,47		0,41									34,13	100
Aleación Fe-Cr	98,15					1,86							100
Llmenita	34,12	31,51										34,37	100
Rutilo	1,47	59,34										39,39	100
Pirita	46,80									53,2			100
Zircón				55,475	14,935							29,59	100
Galena							87,02			12,98			100
Rabdophana-Ce	5,57							43,96	20.21		20.46	9,80	100
Esfalerita	3,32		61,16							35,52			100

6.4.1.5 API DR

6.4.1.5.1 Muestreo superficial

a) Metales totales

Las concentraciones de metales totales en las muestras del API DR se presentan en la Tabla 6.54 y Figura 6.60, las cuales se compararon con los ECA para suelo 2017, uso agrícola; donde arsénico, cadmio y plomo superaron en un 100 % (30/30 de puntos muestreados) los valores de 50 mg/kg PS, 1,4 mg/kg PS y 70 mg/kg PS respectivamente, presentando concentraciones máximas de 1926 mg/kg PS, 37,664 mg/kg PS y 11665 mg/kg PS respectivamente; la concentración de bario superó en 66,67 % (20/30 de puntos muestreados) el valor de 750 mg/kg PS, donde presenta una concentración máxima de 3528 mg/kg PS; mercurio superó el valor de 6,6 mg/kg PS en un 93,33 % (28/30 de puntos muestreados), solo los puntos CS-DR-14 y CS-DR-13 no superan ese valor, asimismo, la concentración máxima de mercurio fue de 288 mg/kg PS en el punto CS-DR08; establecidos en la norma en mención.

Tabla 6.54. Resultados de parámetros de metales totales del API DR comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola

Código	Arsénico Total (mg/kg PS)	Bario Total (mg/kg PS)	Cadmio Total (mg/kg PS)	Mercurio Total (mg/kg PS)	Plomo Total (mg/kg PS)
CS-DR-30	829	2 100	5,6181	52,5	4 291
CS-DR-28	381	1 520	23,005	34,4	3 536
CS-DR-29	401	657,4	7,0316	7,19	7 339
CS-DR-27	897	2 676	21,040	39,0	6 048
CS-DR-24	1 013	3 528	17,036	14,2	8 005
CS-DR-20	645	2 602	4,3844	16,7	7 409
CS-DR-16	129	229,4	2,7770	13,1	579
CS-DR-12	1 187	2 188	20,591	17,5	6 785
CS-DR-11	1 049	736,6	11,922	172	4 418
CS-DR-15	149	191	5,5356	16,1	711
CS-DR-14	94,3	164,8	1,9523	6,16	331
CS-DR-13	140	242,1	3,6637	5,78	603
CS-DR-18	288	543,7	22,535	23,3	1 870
CS-DR-19	178	214,4	2,6678	9,53	668
CS-DR-23	943	2 065	4,9855	21,8	6 532
CS-DR-17	902	1 647	4,3326	17,1	11 665
CS-DR-21	1 388	1 636	4,2988	10,9	6 809
CS-DR-22	379	2 148	4,1981	11,0	9 897
CS-DR-26	448	934,7	5,165	16,4	6 309
CS-DR-25	592	1 322	4,3936	14,5	8 310
CS-DR-08	1 926	1 227	37,664	288	10 233
CS-DR-07	1 308	1 557	3,3779	15,9	7 607
CS-DR-09	1 140	1 707	5,0823	10,8	6 778
CS-DR-10	1 247	1 291	4,5205	15,4	7 519
CS-DR-06	1 116	1 517	3,5445	14,8	6 725
CS-DR-05	617	2 043	3,6299	22,6	7 440
CS-DR-02	952	1 981	4,9938	19,3	7 593
CS-DR-03	200	296,7	5,5171	6,67	951
CS-DR-04	249	378,3	6,1827	15,8	1 342
CS-DR-01	1 232	1198	6,4803	22,0	5 879
ECA para suelo, uso agrícola (D.S. N.° 011-2017-MINAM)	50	750	1,4	6,6	70

: Concentración que supera el valor del Estándar de calidad ambiental 2017 para suelo de uso agrícola

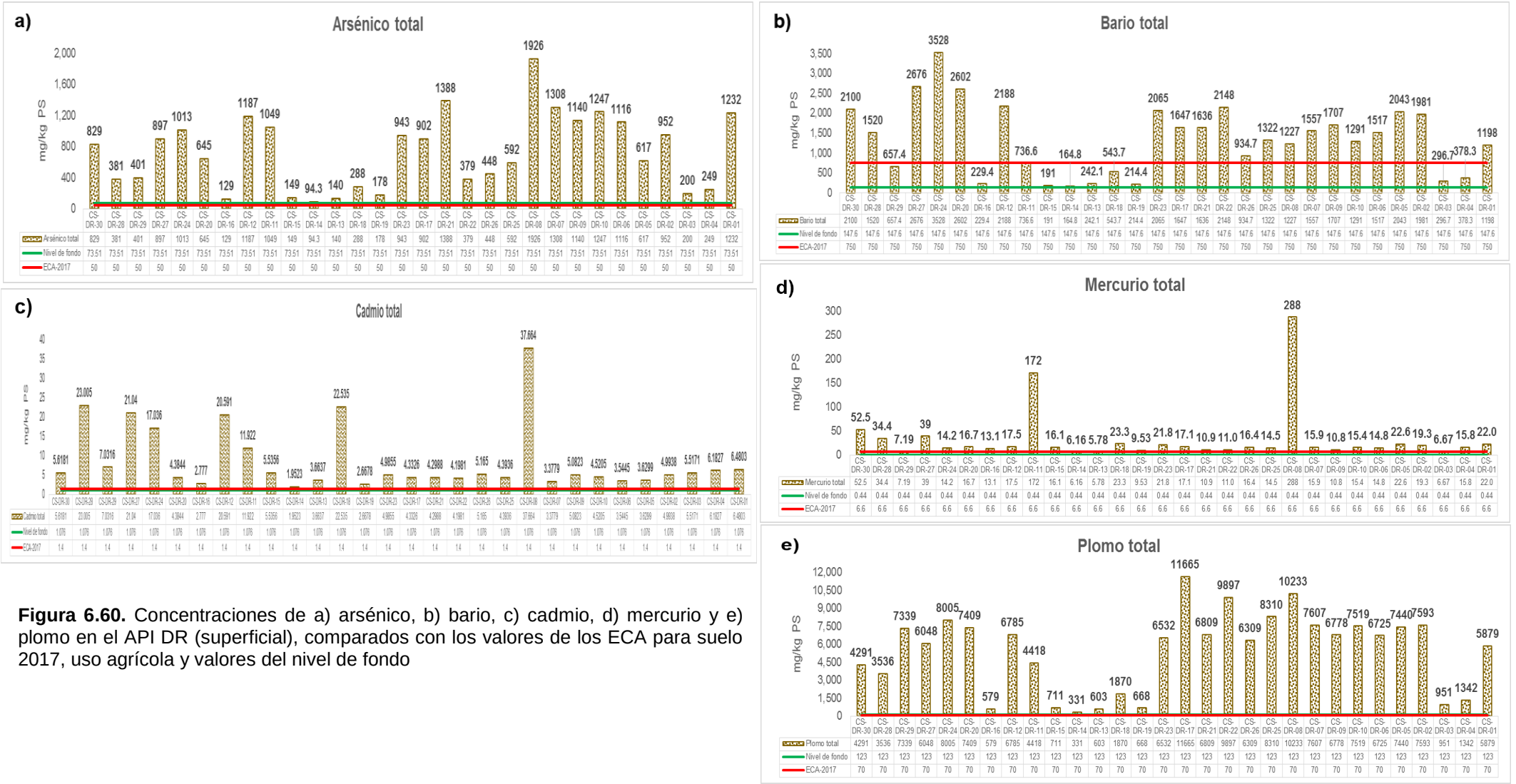


Figura 6.60. Concentraciones de a) arsénico, b) bario, c) cadmio, d) mercurio y e) plomo en el API DR (superficial), comparados con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores del nivel de fondo

De igual manera, en la Tabla 6.55 y Figura 6.61 de manera referencial se compara los resultados de las concentraciones de elementos de interés con la guía canadiense de suelo, donde como cobre, selenio y zinc donde el 100 % (30/30 de puntos muestreados) exceden la guía canadiense para suelo (63 mg/kg PS, 1 mg/kg PS y 250 mg/kg PS respectivamente), plata excede en un 76,67 % (23/30 de puntos muestreados) la guía canadiense (20 mg/kg PS) para suelos de uso agrícola.

Tabla 6.55. Resultados de parámetros de metales totales del API DR comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

Código	Cobre Total (mg/kg PS)	Plata Total (mg/kg PS)	Selenio Total (mg/kg PS)	Zinc Total (mg/kg PS)
CS-DR-30	4 436	138,1	2,510	3 686
CS-DR-28	1 836	92,05	1,702	12 240
CS-DR-29	703	124,0	1,268	4 477
CS-DR-27	2 275	107,1	2,118	8 030
CS-DR-24	1 335	72,05	2,228	9 265
CS-DR-20	758	84,03	1,570	3 314
CS-DR-16	265	11,20	1,502	637
CS-DR-12	4 010	47,89	2,173	8 065
CS-DR-11	1 691	121,9	3,044	4 369
CS-DR-15	394	11,64	1,568	1 159
CS-DR-14	153	6,186	1,355	360
CS-DR-13	258	4,793	1,332	1 002
CS-DR-18	909	20,30	1,548	4 750
CS-DR-19	311	8,046	1,538	469
CS-DR-23	1 460	69,67	2,133	3 187
CS-DR-17	1 452	132,0	2,344	3 100
CS-DR-21	1 303	64,29	2,269	4 322
CS-DR-22	1 271	109,2	1,207	3 563
CS-DR-26	1 001	85,70	1,263	2 874
CS-DR-25	1 136	90,65	1,218	2 784
CS-DR-08	3 143	277,0	4,550	5 663
CS-DR-07	1 433	78,27	2,730	3 550
CS-DR-09	1 219	78,18	2,187	4 174
CS-DR-10	1 197	80,13	2,921	3 516
CS-DR-06	1 277	75,57	1,990	3 171
CS-DR-05	1 181	90,86	1,726	2 801
CS-DR-02	2 073	85,62	2,606	4 344
CS-DR-03	393	9,371	1,315	1 404
CS-DR-04	566	15,60	1,548	1 580
CS-DR-01	2 324	63,49	2,675	5 405
Guía canadiense de suelo, uso agrícola	63	20	1	250

: Concentraciones que superan los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

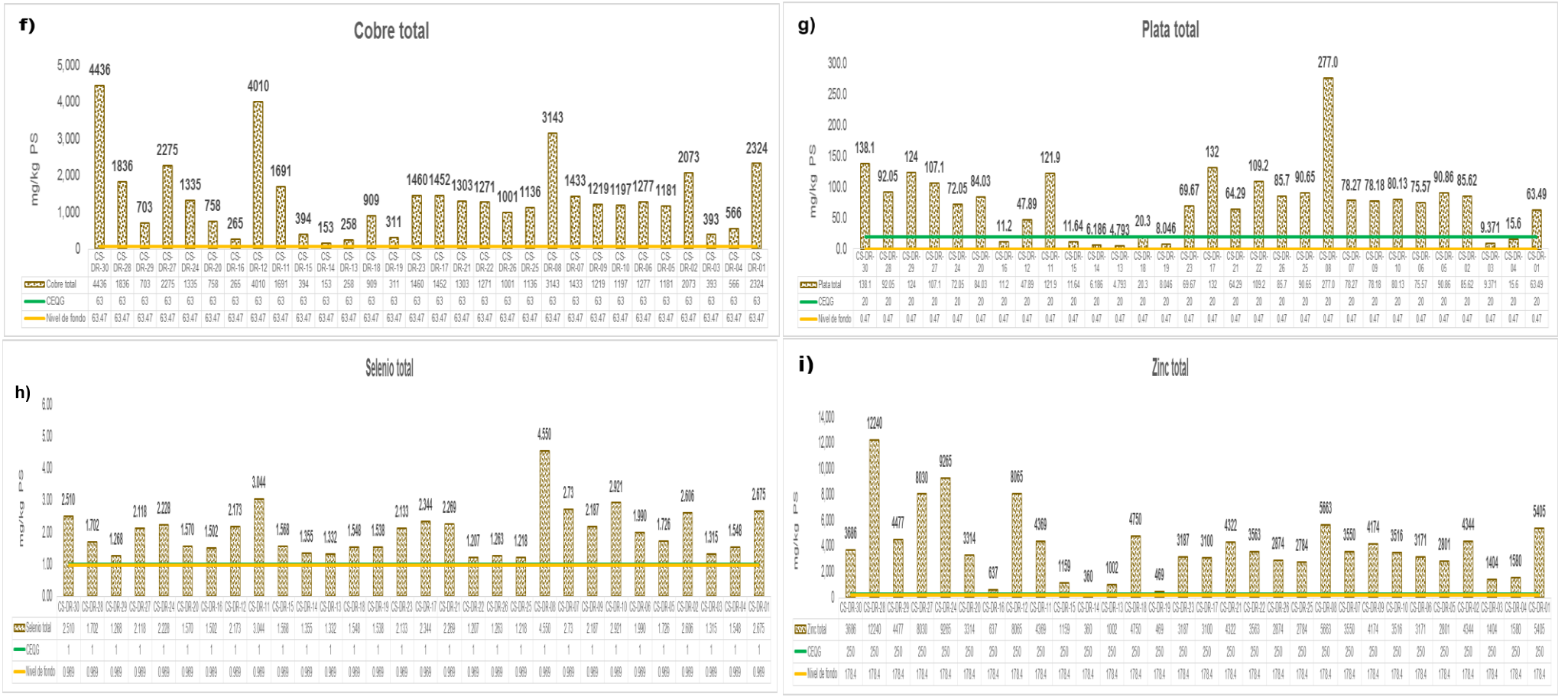


Figura 6.61. Concentraciones de f) cobre, g) plata, h) selenio y i) zinc en el API DR (superficial) comparados con el valor del ECA-2017 para suelo y el valor del nivel de fondo

a) Disponibilidad de metales

En la Tabla 6.56 y Figura 6.62 se muestra la concentración de los metales del punto de muestreo CS-DR-23A que es una muestra compuesta conformada por los puntos de muestreo CS-DR-12, CS-DR-20, CS-DR-23, CS-DR-24 y CS-DR-27.

Las mayores concentraciones de arsénico, bario y mercurio se presentan en la etapa 6 (residual) con concentraciones de 754,0 mg/kg, 214,0 mg/kg y 120,0 mg/kg respectivamente; mientras que cadmio presenta su máxima concentración 0,303 mg/kg en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro); plomo presenta una máxima de concentración de 2783 mg/kg en la etapa 6 (residual).

Cobre presenta su máxima concentración de 633,9 en la etapa 5 (ligado a materia orgánica); plata presenta su máxima concentración en la etapa 6 (residual) con concentración de 37,19 mg/kg, además la plata presenta una concentración mínima en la etapa 1 (extraíbles) con 0,019 mg/kg; selenio presenta concentraciones por debajo del límite de detección en las primeras 4 etapas y presentan su máxima concentración en la etapa 6 (residual); la concentración máxima de zinc está en la etapa 6 (residual) y en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro) con concentraciones de 1769 mg/kg y 1478 mg/kg respectivamente.

De igual manera en la Tabla 6.57 y Figura 6.63 se muestra la concentración de los metales del punto de muestreo CS-DR-25A que es una muestra compuesta conformada por los puntos de muestreo CS-DR-21, CS-DR-22, CS-DR-25, CS-DR-28, CS-DR-29 y CS-DR-30

Arsénico en las 5 primeras etapas se encuentran por debajo del límite de detección; bario en las 2 primeras etapas se encuentra por debajo del límite de detección y su concentración máxima 159,7 mg/kg se encuentra en la etapa 6 (residual); la mayor concentración de cadmio se encuentra en la etapa 2 (intercambiable y adsorbida); mercurio se encuentran las mayores concentraciones en las etapas 5 y 6 con concentraciones de 22,50 mg/kg y 44,83 mg/kg respectivamente; plomo se presenta con mayores concentraciones en las etapas 4, 5 y 6 siendo esta última donde se encuentra la máxima concentración 1975 mg/kg.

Cobre presenta sus máximas concentraciones en la etapa 5 y 6 con concentraciones de 457,7 mg/kg y 522,7 mg/kg respectivamente; plata presenta su máxima concentración en la etapa 6 (residual) con una concentración de 36,80 mg/kg y la mínima concentración que se encuentra por debajo del límite de detección en la etapa 1 (extraíbles); selenio presenta valores por debajo del límite de detección en las 5 primeras etapas; el zinc presenta valores de 322,1 mg/kg y 229,2 mg/kg en las etapas 1 y 2 respectivamente mientras que en las etapas 4 y 6 presentan valores de 674,4 mg/kg y 1975 mg/kg respectivamente.

Tabla 6.56. Resultados de parámetros de disponibilidad de metales pesados por la metodología de Tessier API DR (superficial)

Código		CS-DR-23A						CS-DR-25A					
Parámetro	Unidad	Tessier – Extraíbles (Etapa 1)	Tessier – Intercambiable y adsorbidas (Etapa 2)	Tessier – Ligado a carbonato (Etapa 3)	Tessier – Fácilmente reducibles y óxidos de hierro (Etapa 4)	Tessier – ligado a materia orgánica (Etapa 5)	Tessier – Residual (Etapa 6)	Tessier – Extraíbles (Etapa 1)	Tessier – Intercambiable y adsorbidas (Etapa 2)	Tessier – Ligado a carbonato (Etapa 3)	Tessier – Fácilmente reducibles y óxidos de hierro (Etapa 4)	Tessier – ligado a materia orgánica (Etapa 5)	Tessier – Residual (Etapa 6)
Arsénico (As)	mg/kg	0,30	< 0,300	< 0,30	1,17	< 0,30	754,0	< 0,30	< 0,300	< 0,30	< 0,30	< 0,30	616,4
Bario (Ba)	mg/kg	0,58	< 0,50	21,34	25,84	73,68	214,0	< 0,25	< 0,50	3,37	5,03	58,86	159,7
Cadmio (Cd)	mg/kg	0,162	4,509	1,369	2,055	0,303	1,529	1,035	1,602	0,184	0,505	0,181	1,542
Cobre (Cu)	mg/kg	10,79	3,90	217,5	378,6	633,9	486,3	7,07	16,08	133,0	228,9	457,7	522,7
Mercurio (Hg)	mg/kg	< 0,010	0,038	0,060	0,978	10,03	120,0	< 0,010	0,173	0,046	0,286	22,50	44,83
Plata (Ag)	mg/kg	0,019	12,86	0,0243	0,209	0,061	37,19	< 0,007	17,35	0,0075	0,232	1,656	36,80
Plomo (Pb)	mg/kg	12,12	35,12	478,4	1644	873,0	2783	1,76	78,82	121,1	809,6	920,9	4800
Selenio (Se)	mg/kg	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	0,50	2,65	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	1,86
Zinc (Zn)	mg/kg	42,9	285,7	642,7	1478	305,6	1769	322,1	229,2	134,9	674,4	208,1	1975

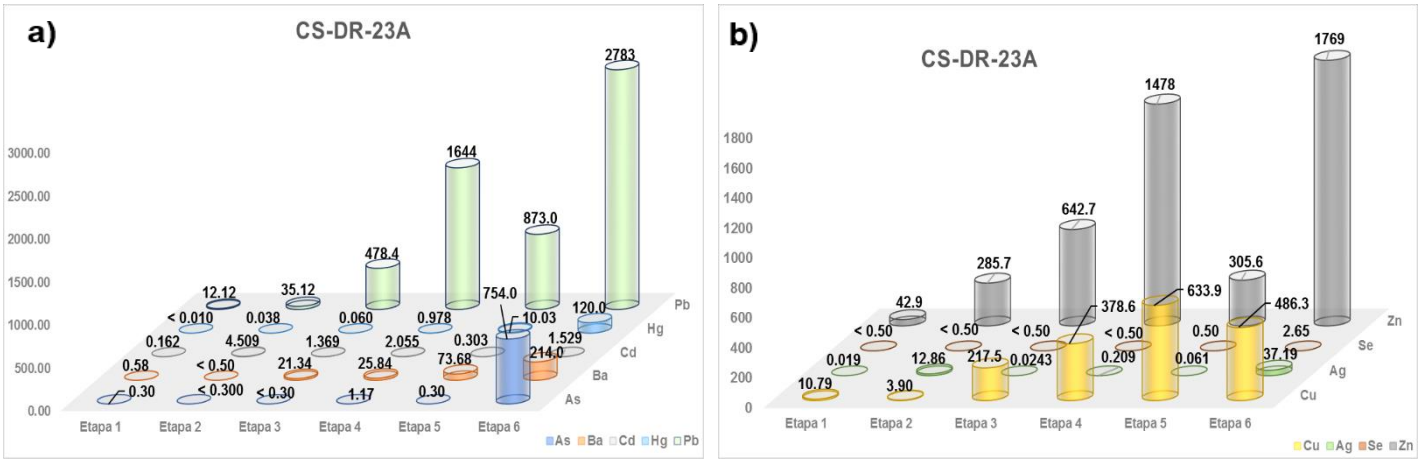


Figura 6.62. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio, y plomo; y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-DR-23A (muestreo superficial) del API DR

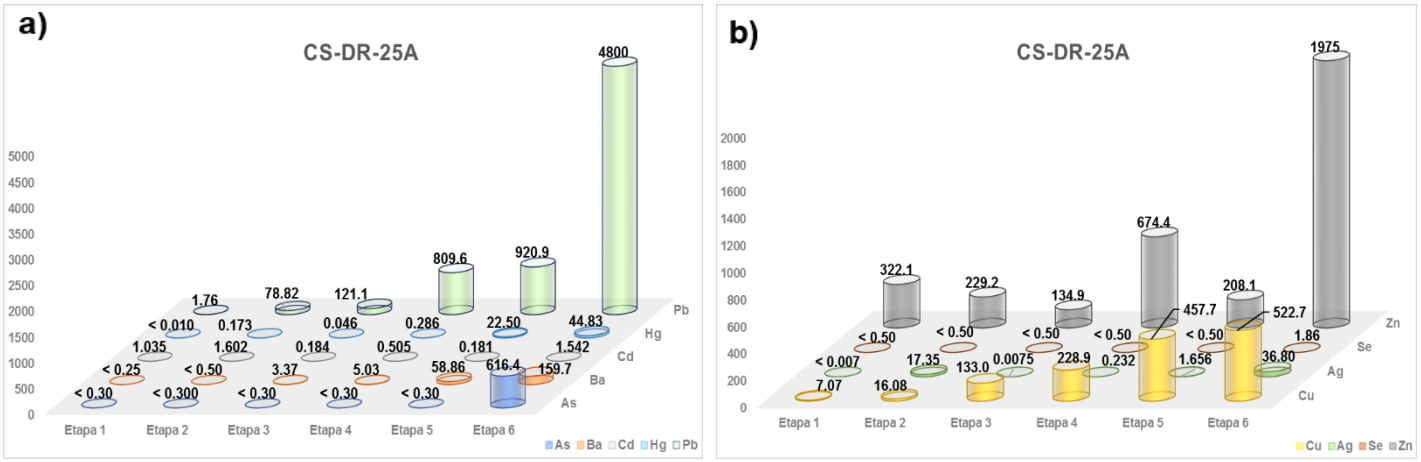


Figura 6.63. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio, y plomo; y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-DR-25A (muestreo superficial) del API DR

En la Tabla 6.57 y Figura 6.64 se aprecia la concentración de las 6 etapas de la extracción secuencial por el método de Tessier del punto de muestreo CS-DR-04A que es una muestra compuesta conformada por los puntos de muestreo CS-DR-03, CS-DR-04, CS-DR-11, CS-DR-13, CS-DR-14, CS-DR-15, CS-DR-16, CS-DR-18 y CS-DR-19.

Las mayores concentraciones de arsénico, bario y mercurio se presentan en la etapa 6 (residual) con concentraciones de 197,2 mg/kg, 169,1 mg/kg y 32,78 mg/kg respectivamente; mientras que cadmio presenta la máxima concentración en la etapa 2 (intercambiable y absorbible) con valor de 2,763 mg/kg; plomo presenta las concentraciones máximas desde la etapa 3 hasta la 6, siendo en esta última donde se encuentra la máxima concentración 483,2 (mg/kg).

Cobre presenta valores de 238,3 mg/kg y 124,5 mg/kg en las etapas 5 (ligado a carbonatos) y 6 (residual) respectivamente; plata presenta mayor concentración en la etapa 6 (residual); en las 4 primeras etapas de las concentraciones de selenio los valores están por debajo del límite de detección; zinc presenta sus mayores concentraciones desde la etapa 4 hasta la 6, siendo la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro) en esta última presenta la mayor concentración 675,8 mg/kg.

En la Tabla 6.58 y Figura 6.65 se aprecia la concentración de los metales del punto de muestreo CS-DR-01A que es una muestra compuesta conformada por los puntos de muestreo CS-DR-01, CS-DR-02, CS-DR-05, CS-DR-06, CS-DR-07, CS-DR-08, CS-DR-09, CS-DR-10 y CS-DR-17.

Las concentraciones de arsénico, bario, cadmio y mercurio se presentan en la etapa 6 (residual) con concentraciones de 9,466 mg/kg, 111,1 mg/kg, 1129 mg/kg y 37,72 mg/kg respectivamente, cabe precisar que arsénico en las 3 primeras etapas presenta valores por debajo del límite de detección; plomo presenta su máxima concentración de 2889 mg/kg en la etapa 6 (residual), además presentan concentraciones altas desde la etapa 2 hasta la etapa 5.

Cobre presenta sus máximas concentraciones en las 5 y 6 con concentraciones de 653,9 mg/kg y 861,7 mg/kg respectivamente; plata en la etapa 1 (extraíbles) presenta concentraciones por debajo del límite de detección y su máxima concentraciones etapa en la etapa 6 (residual) 20,92 mg/kg; selenio presenta concentraciones por debajo del límite de detección en las 5 primeras etapas y zinc presentan su máxima concentración en la etapa 6 (residual) 2889 mg/kg y su mínima concentración en la etapa 3 (ligado a carbonatos) 44,23 mg/kg.

Tabla 6.57. Resultados de parámetros de disponibilidad de metales pesados por la metodología de Tessier API DR (superficial)

Código		CS-DR-04A						CS-DR-01A					
Parámetro	Unidad	Tessier – Extraíbles (Etapa 1)	Tessier – Intercambiable y adsorbidas (Etapa 2)	Tessier – Ligado a carbonato (Etapa 3)	Tessier – Fácilmente reducibles y óxidos de hierro (Etapa 4)	Tessier – ligado a materia orgánica (Etapa 5)	Tessier – Residual (Etapa 6)	Tessier – Extraíbles (Etapa 1)	Tessier – Intercambiable y adsorbidas (Etapa 2)	Tessier – Ligado a carbonato (Etapa 3)	Tessier – Fácilmente reducibles y óxidos de hierro (Etapa 4)	Tessier – ligado a materia orgánica (Etapa 5)	Tessier – Residual (Etapa 6)
Arsénico (As)	mg/kg	0,30	< 0,300	1,01	18,41	8,56	197,2	< 0,30	< 0,300	< 0,30	5,83	2,02	1129
Bario (Ba)	mg/kg	1,73	27,61	44,08	43,45	49,04	169,1	0,26	< 0,50	4,17	12,34	99,74	111,1
Cadmio (Cd)	mg/kg	0,156	2,763	1,589	1,655	0,241	0,418	0,598	1,398	0,212	1,592	0,382	1,986
Cobre (Cu)	mg/kg	16,05	2,65	18,55	66,23	238,3	124,5	14,51	32,77	111,7	405,9	653,9	861,7
Mercurio (Hg)	mg/kg	< 0,010	< 0,010	< 0,010	0,204	9,473	32,78	< 0,010	0,083	0,046	0,655	9,466	37,72
Plata (Ag)	mg/kg	0,009	0,919	< 0,0012	0,173	0,077	19,46	< 0,007	14,31	0,0291	0,197	0,098	20,92
Plomo (Pb)	mg/kg	13,31	2,44	108,0	299,9	274,4	483,2	4,17	199,7	235,5	1174	638,8	3574
Selenio (Se)	mg/kg	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	0,62	0,79	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	2,41
Zinc (Zn)	mg/kg	22,3	41,8	404,3	675,8	206,9	254,0	134,5	115,2	44,23	932,7	325,3	2889

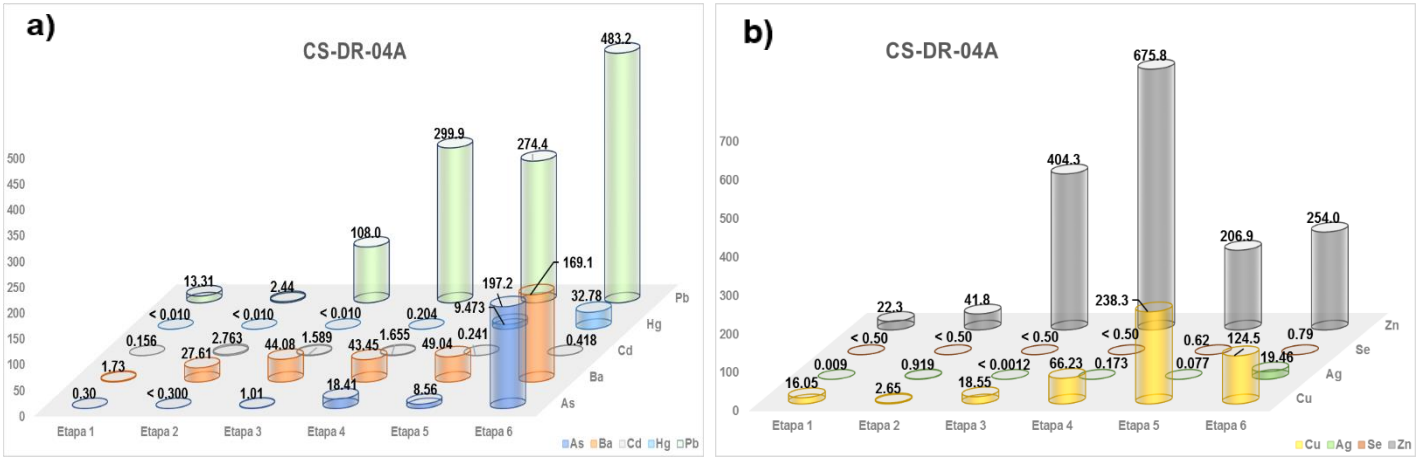


Figura 6.64. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo; y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-DR-04A (muestreo superficial) del API API DR

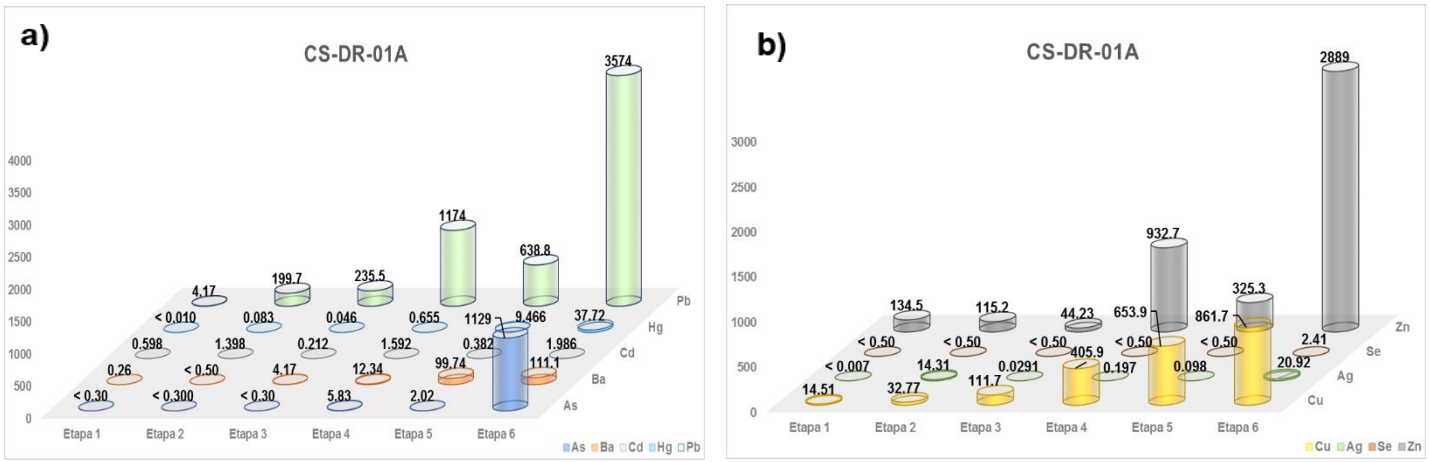


Figura 6.65. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo; y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-DR-01A (muestreo superficial) del API DR

De igual forma en la Tabla 6.58 y Figura 6.66 se aprecia la concentración de los metales del punto de muestreo CS-DR-26 (muestra puntual), arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo presentan sus máximas concentraciones en la etapa 6 (residual) con concentraciones de 440,0 mg/kg, 128,3 mg/kg, 1,715 mg/kg, 45,12 mg/kg y 4677 mg/kg respectivamente, cabe precisar que arsénico en las 5 primeras etapas presenta valores por debajo del límite de detección; plomo presenta también concentraciones altas en las etapas 4 y 5 de 541,0 mg/kg y 638,7 mg/kg respectivamente.

Cobre, plata y zinc presentan las concentraciones máximas en la etapa 6 (residual) 467,8 mg/kg, 31,05 mg/kg y 2078 mg/kg respectivamente; plata presenta concentraciones por debajo del límite de detección en la etapa 1 (extraíbles); selenio presenta en las 5 primeras etapas de las concentraciones por debajo del límite de detección.

Tabla 6.58. Resultados de parámetros de extracción secuencial por la metodología de Tessier API DR (superficial)

Código		CS-DR-26					
Parámetro	Unidad	Tessier – Extraíbles (Etapa 1)	Tessier – Intercambiable y adsorbidas (Etapa 2)	Tessier – Ligado a carbonato (Etapa 3)	Tessier – Fácilmente reducibles y óxidos de hierro (Etapa 4)	Tessier – ligado a materia orgánica (Etapa 5)	Tessier – Residual (Etapa 6)
Arsénico (As)	mg/kg	< 0,30	< 0,300	< 0,30	< 0,30	< 0,30	440,0
Bario (Ba)	mg/kg	< 0,25	< 0,50	0,85	3,34	59,49	128,3
Cadmio (Cd)	mg/kg	1,044	0,325	0,101	0,226	0,142	1,715
Cobre (Cu)	mg/kg	39,36	27,46	22,43	115,9	186,2	467,8
Mercurio (Hg)	mg/kg	< 0,010	0,066	0,019	0,154	19,56	45,12
Plata (Ag)	mg/kg	0,010	5,450	0,0067	0,319	1,884	31,05
Plomo (Pb)	mg/kg	1,75	38,63	15,00	541,0	638,7	4677
Selenio (Se)	mg/kg	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	1,39
Zinc (Zn)	mg/kg	196,8	40,1	8,52	214,1	111,1	2078

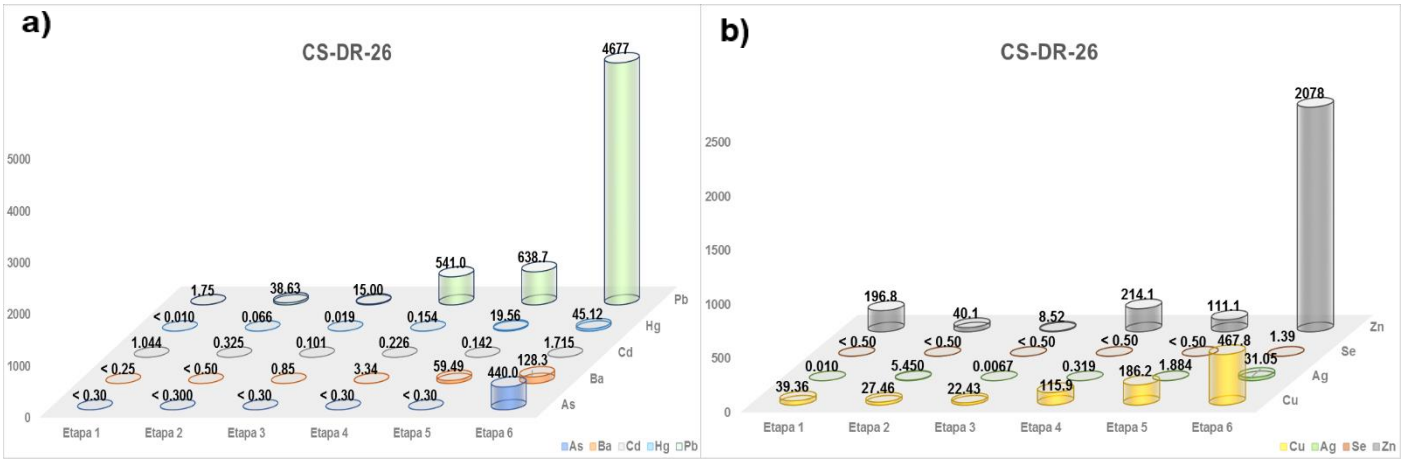
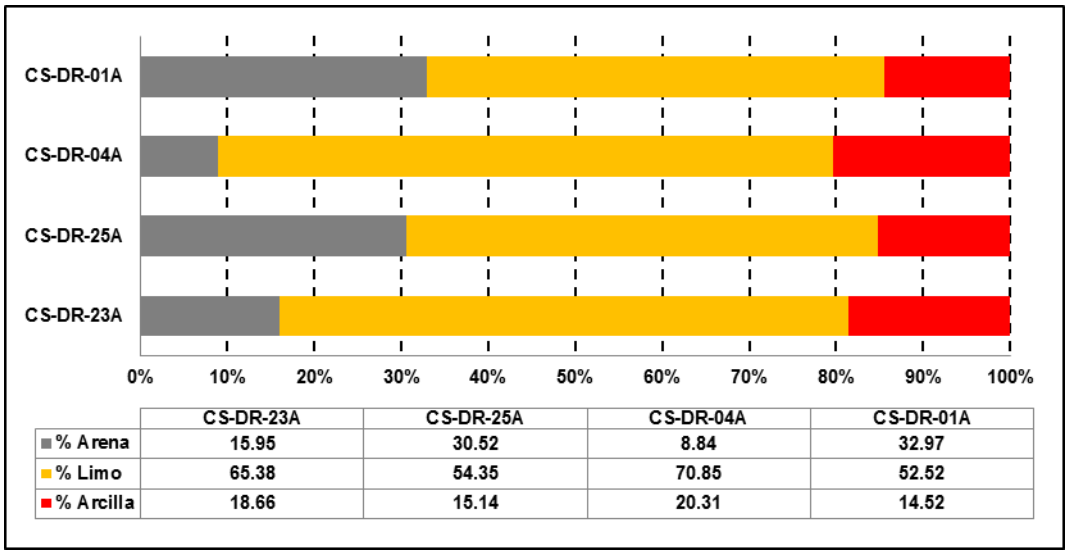


Figura 6.66. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo; y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto CS-DR-26 (muestreo superficial) del API DR

a) Análisis granulométrico

En la Figura 6.67, se aprecia que los porcentajes de Las partículas de suelo predominantes del API DR, se realizó muestreo compuesto en cuatro puntos, la muestra CS-DR-23A compuestas por los puntos de muestreo CS-DR-12, CS-DR-20, CS-DR-23, CS-DR-24, y CS-DR-27; la muestra CS-DR-25A compuesta por los puntos CS-DR-21, CS-DR-22, CS-DR-25, CS-DR-28, CS-DR-29 y CS-DR-30; la muestra CS-DR-04A compuesta por los puntos CS-DR-03, CS-DR-04, CS-DR-11, CS-DR-13, CS-DR-14, CS-DR-15, CS-DR-16, CS-DR-18 y CS-DR-19 y la muestra CS-DR-01A compuesta por los puntos CS-DR-01, CS-DR-02, CS-DR-05, CS-DR-06, CS-DR-07, CS-DR-08, CS-DR-09, CS-DR-10 y CS-DR-17.



	CS-DR-23A	CS-DR-25A	CS-DR-04A	CS-DR-01A
% Arena	15.95	30.52	8.84	32.97
% Limo	65.38	54.35	70.85	52.52
% Arcilla	18.66	15.14	20.31	14.52

Figura 6.67. Resultados del análisis granulométrico de las muestras del API DR

La representación de los porcentajes de las partículas predominantes en la textura del suelo del API DR se presenta en la Figura 6.68., donde se aprecia que la predominancia en el API es la textura Franca limoso.

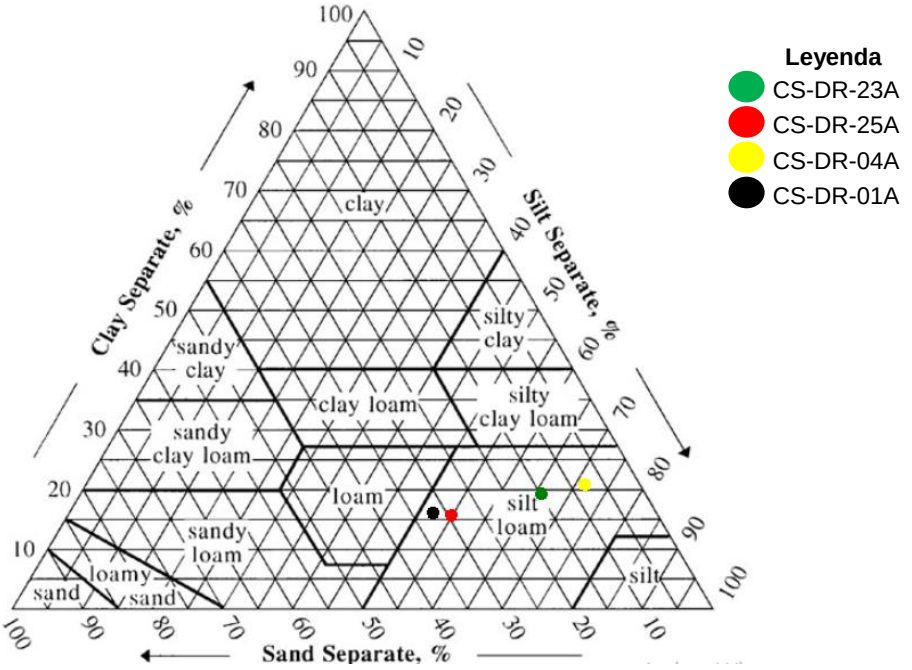


Figura 6.68. Triangulo textural de las muestras obtenidas del análisis granulométrico del API DR

b) ABA

De acuerdo a los resultados de laboratorio de la prueba ABA, para definir la generación de acidez, se consideró el primer y segundo criterio de análisis de la prueba ABA, donde la muestra compuesta CS-DR-23A está conformada por los puntos de muestreo CS-DR-12, CS-DR-20, CS-DR-23, CS-DR-24, y CS-DR-27; la muestra CS-DR-25A está conformada por los puntos CS-DR-21, CS-DR-22, CS-DR-25, CS-DR-28, CS-DR-29 y CS-DR-30; la muestra CS-DR-04A está conformada por los puntos CS-DR-03, CS-DR-04, CS-DR-11, CS-DR-13, CS-DR-14, CS-DR-15, CS-DR-16, CS-DR-18 y CS-DR-19 y la muestra CS-DR-01A está conformada por los puntos CS-DR-01, CS-DR-02, CS-DR-05, CS-DR-06, CS-DR-07, CS-DR-08, CS-DR-09, CS-DR-10 y CS-DR-17, en la Tabla 6.59 se observa que dichas muestras compuestas no son generadoras de acidez.

Tabla 6.59. Resultados obtenidos en la prueba estática de balance ácido-base de las muestras del API DR

Código		CS-DR-23A	CS-DR-25A	CS-DR-04A	CS-DR-01A
Fisicoquímicos (ABA)					
Grado de Efervescencia	-	2	1	3	1
pH en Pasta	Unidades pH	5,89	4,93	7,4	4,48
Potencial de Acidez Máximo (PA)	t CaCO3/1000t	11,56	< 0,30	2,5	13,44
Potencial de Neutralización Neto (PN)	t CaCO3/1000 t	-11,56	0,00	41,04	-13,44
Potencial de Neutralización	t CaCO3/1000 t	< 1,00	< 1,00	43,54	< 1,00
Relación NP/MPA	-	< 0,01	No Aplica	17,42	< 0,01
Azufre Total	%	0,91	2,94	0,11	1,4
*Criterio 1: Para un NNP menor a cero, la muestra es «generadora neta de ácido». Sin embargo, para un NNP que varía entre -20 y +20 Kg CaCo3/Ton de muestra, corresponde a un rango de «incertidumbre». Para valores mayores a +20 Kg CaCo3/Ton, se considera a la muestra es «potencial no generador de ácido»; mientras que, para valores menores a -20 Kg CaCo3/Ton se considera «potencial generador de ácido». **Criterio 2: Proporción entre PN y PA = RNP, para un PN/PA < 1:1 es probable que se genere acidez, mientras que para el rango de PN/PA entre 1:1 y 3:1 corresponde a una zona de «incertidumbre». Cuando el PN/PA >3:1, la muestra es «potencial no generador de acidez».					

c) Análisis mineralógico por difracción de rayos X

Se realizó el análisis de difracción de rayos X a muestras compuestas en el caso de la muestra CS-DR-25A está comformada por los puntos CS-DR-21, CS-DR-22, CS-DR-25, CS-DR-28, CS-DR-29 y CS-DR-30 y la muestra CS-DR-25A está conformada por los puntos CS-DR-01, CS-DR-02, CS-DR-05, CS-DR-06, CS-DR-07,CS-DR-08, CS-DR-09, CS-DR-10 y CS-DR-17, en el análisis se encontraron minerales como: cuarzo, goethita, jarosita, yeso, entre otros minerales más, tal ty como se detalla en la Tabla 6.60.

Tabla 6.60. Resultados de difracción de rayos X en el API DR

Código	CS-DR-01[a]	
Nombre del mineral	Formula general	Resultado aproximado (%)
Cuarzo	SiO2	75
Goethita	FeO(OH)	8
Plagioclasa (Albita)	Na(Al,Si)4O8	6
Jarosita	KFe3(SO4)2(OH)6	4
Caolinita	Al2Si2O5(OH)4	3
Mica (Muscovita)	KAl2(Si3Al)O10(OH,F)2	2
Clorita (Clinocloro)	(Mg,Fe)5Al(Si3Al)O10(OH)8	< L.D.

Código	CS-DR-01ª	
Nombre del mineral	Formula general	Resultado aproximado (%)
Rutilo	TiO2	< L.D.
Código	CS-DR-25ª	
Nombre del mineral	Formula general	Resultado aproximado (%)
Cuarzo	SiO2	60
Plagioclasa (Albita)	Na(Al,Si)4O8	16
Yeso	CaSO4-2(H2O)	12
Jarosita	KFe3(SO4)2(OH)6	7
Caolinita	Al2Si2O5(OH)4	3
Mica (Muscovita)	KAl2(Si3Al)O10(OH,F)2	< L.D.

d) Análisis mineralógico por microscopia de barrido electrónico

Los resultados del análisis mineralógico de barrido electrónico de la muestra CS-DR-25A corresponde a una muestra compuesta, donde los resultados nos arrojan la presencia de compuestos predominantes de hierro, con presencia nula de calcio y magnesio, además presenta minerales como la pirita, galena y esfalerita portadores de azufre y zinc en alguno de estos minerales con aportes de plomo producto de la presencia de galena, en la tabla 6.61 se presenta los resultados obtenidos.

Tabla 6.61. Resultados obtenidos de difracción electrónica de barrido en la muestra CS-DR-25A

Código	CS-DR-25ª												
Minerales	Composición química (%) en peso												Total
	Fe	Ti	Zn	Ca	Sn	Cu	Al	Pb	P	Ba	S	O	
Pirita	46.80										53.20		100
Galena								86.23			13.77		100
Goethita	66.78		0.42									32.80	100
Fosfato_Pb	1.88			1.14			17.33	36.39	5.41			37.87	100
Esfalerita	3.72		61.90								34.38		100
Calcopirita	30.00					33.34					36.66		100
Baritina										58.60	13.55	27.7	100
Rutilo	2.44	60.12										37.44	100
Casiterita					78.15						21.85		100

e) Índices NDVI y NDRE

En este API DR se hizo un sobrevuelo de un área de 19,23 ha (Figura 6.69) que conforma la formación de cobertura vegetal mixta o alterada en la que se realizó el análisis de los índices de vegetación de NDVI y NDRE. Obteniéndose una media de 0,222534 de NDVI y -0,097 de NDRE (Tabla 6.62 y Figura 6.70).

Tabla 6.62. Información estadística de los índices de vegetación

Estadísticos	NDVI	NDRE
Count	21571032	21571909
Sum	4800290,79255	2093533,27555
mean	0,222534	0,097049
stdev	0,100487	0,037958
min	-0,379406	-0,268796
max	1,75281	1,78605

INDICE DE VEGETACIÓN

Área :		192300.000	m2	Datum:	WGS 1984	
Centroide:	X:	361844	m	Zona UTM:	18 L	
	Y:	8799235	m	Altitud:	4130	m s. n. m.

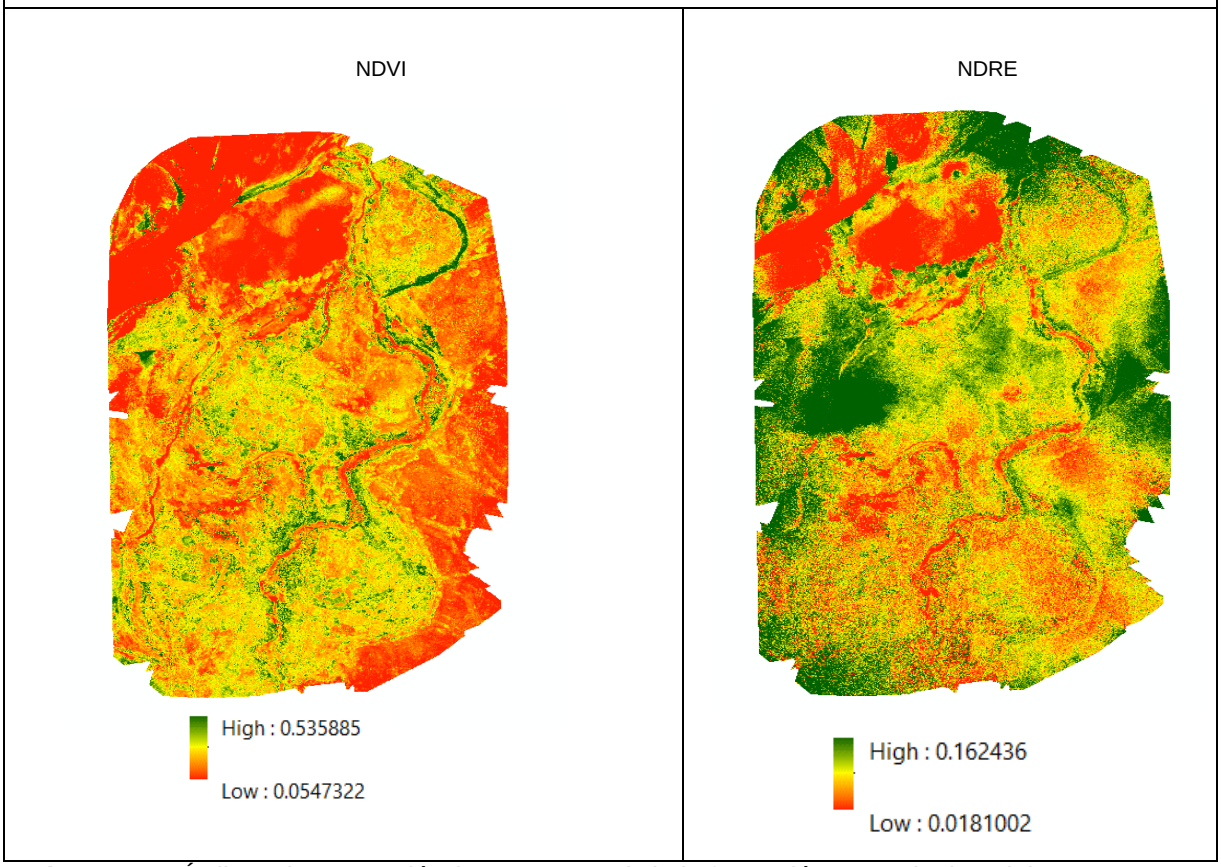


Figura 6.69. Índices de vegetación (NDVI y NDRE) de la formación vegetal mixta del API DR

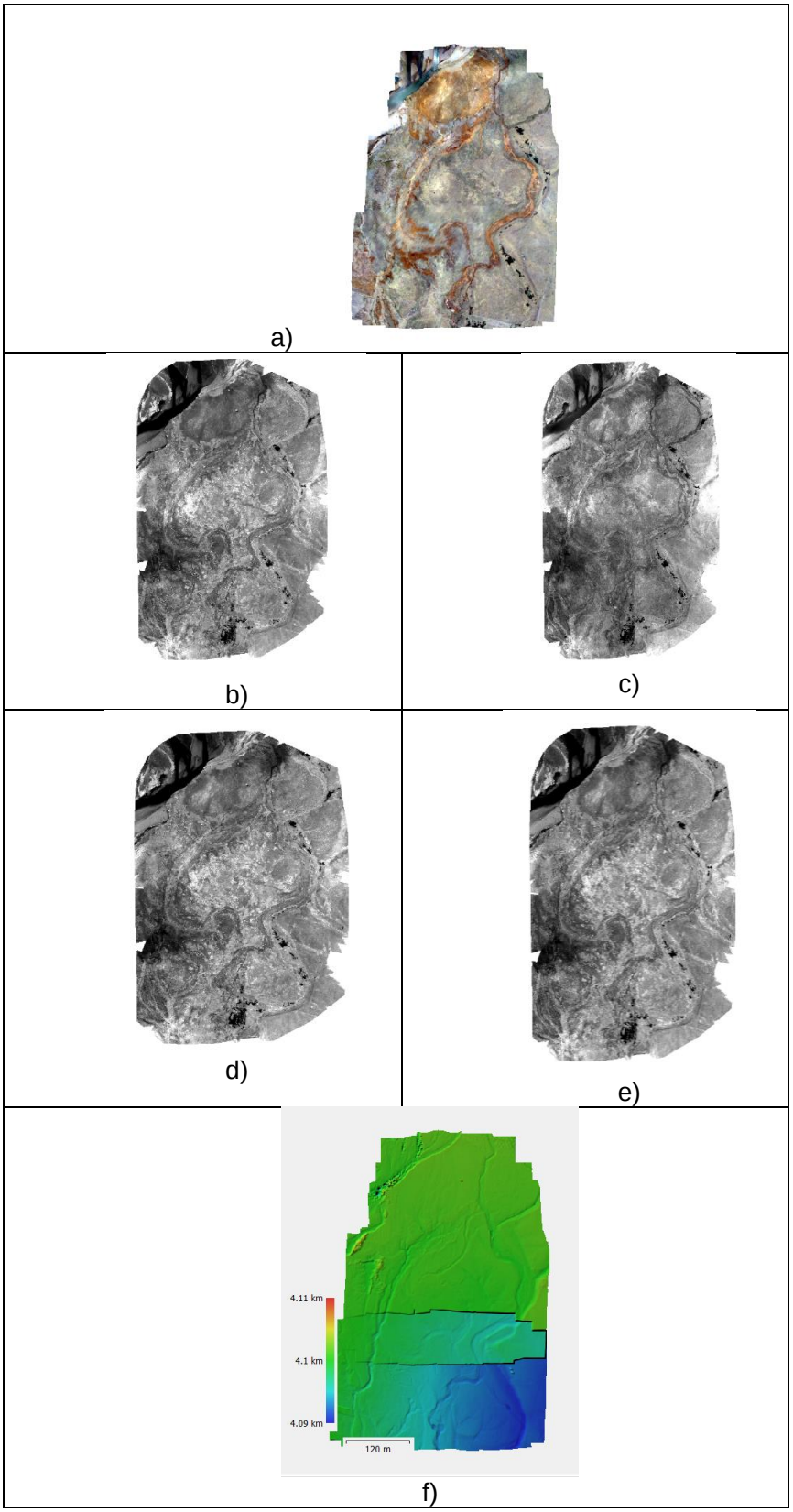


Figura 6.70. a) Ortofoto RGB, b) NIR c) Red, d) Green, e) Red Edge), y f) DEM del API DR

- **Correlación de raster**

Con los datos estandarizados se realizó la primera aproximación del análisis de correlación entre los índices de vegetación del sensor Parrot Sequoia y los datos de parámetros de suelo, que se presentan en las Tablas 6.64 y 6.59 y Figuras 6.71 y 6.72.

Tabla 6.63. Índice de vegetación (NDVI) y muestreo de suelo

Cobertura vegetal	Código	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18 L		Altitud m s. n. m.	Mean_ NDVI	Stdev_ NDVI	Min_ NDVI	Max_ NDVI
		Este (m)	Norte (m)					
Vegetacion mixta	CS-DR-30	361897	8799527	4122	0.191	0.012	0.171	0.224
Escasa o nula vegetación	CS-DR-28	361839	8799460	4117	0.130	0.010	0.108	0.150
Escasa o nula vegetación	CS-DR-29	361890	8799464	4140	0.187	0.020	0.146	0.240
Vegetacion mixta	CS-DR-27	361906	8799386	4204	0.169	0.009	0.141	0.197
Vegetacion mixta	CS-DR-24	361946	8799336	4137	0.231	0.032	0.206	0.332
Vegetacion mixta	CS-DR-20	361955	8799286	4137	0.175	0.070	0.136	0.423
Vegetacion mixta	CS-DR-16	361959	8799214	4137	0.253	0.015	0.239	0.307
Escasa o nula vegetación	CS-DR-12	361952	8799162	4136	0.166	0.009	0.151	0.193
Vegetacion mixta	CS-DR-11	361902	8799146	4138	0.357	0.029	0.307	0.424
Vegetacion mixta	CS-DR-15	361900	8799206	4139	0.213	0.009	0.194	0.244
Vegetacion mixta	CS-DR-14	361836	8799209	4139	0.214	0.021	0.191	0.275
Vegetacion mixta	CS-DR-13	361773	8799204	4139	0.261	0.018	0.222	0.305
Vegetacion mixta	CS-DR-18	361828	8799267	4140	0.272	0.026	0.211	0.315
Vegetacion mixta	CS-DR-19	361894	8799270	4140	0.165	0.012	0.157	0.208
Vegetacion mixta	CS-DR-23	361900	8799345	4146	0.180	0.029	0.137	0.264
Vegetacion mixta	CS-DR-17	361781	8799281	4095	0.161	0.004	0.149	0.168
Vegetacion mixta	CS-DR-21	361771	8799335	4098	0.158	0.018	0.122	0.196
Vegetacion mixta	CS-DR-22	361847	8799338	4100	0.157	0.014	0.143	0.194
Escasa o nula vegetación	CS-DR-26	361829	8799392	4102	0.095	0.008	0.087	0.126
Escasa o nula vegetación	CS-DR-25	361781	8799396	4103	0.130	0.005	0.123	0.147
Vegetacion mixta	CS-DR-08	361917	8799067	4107	0.356	0.067	0.309	0.552
Vegetacion mixta	CS-DR-07	361838	8799082	4107	0.238	0.041	0.164	0.355
Escasa o nula vegetación	CS-DR-09	361769	8799143	4109	0.285	0.032	0.260	0.368
Escasa o nula vegetación	CS-DR-10	361832	8799141	4109	0.172	0.016	0.153	0.222
Escasa o nula vegetación	CS-DR-06	361776	8799085	4111	0.149	0.013	0.121	0.172
Vegetacion mixta	CS-DR-05	361725	8799085	4112	0.314	0.043	0.157	0.330
Vegetacion mixta	CS-DR-02	361708	8799027	4114	0.283	0.051	0.246	0.429
Vegetacion mixta	CS-DR-03	361772	8799019	4114	0.192	0.008	0.166	0.209
Vegetacion mixta	CS-DR-04	361831	8799022	4116	0.344	0.037	0.240	0.383
Vegetacion mixta	CS-DR-01	361845	8798959	4116	0.327	0.049	0.246	0.425

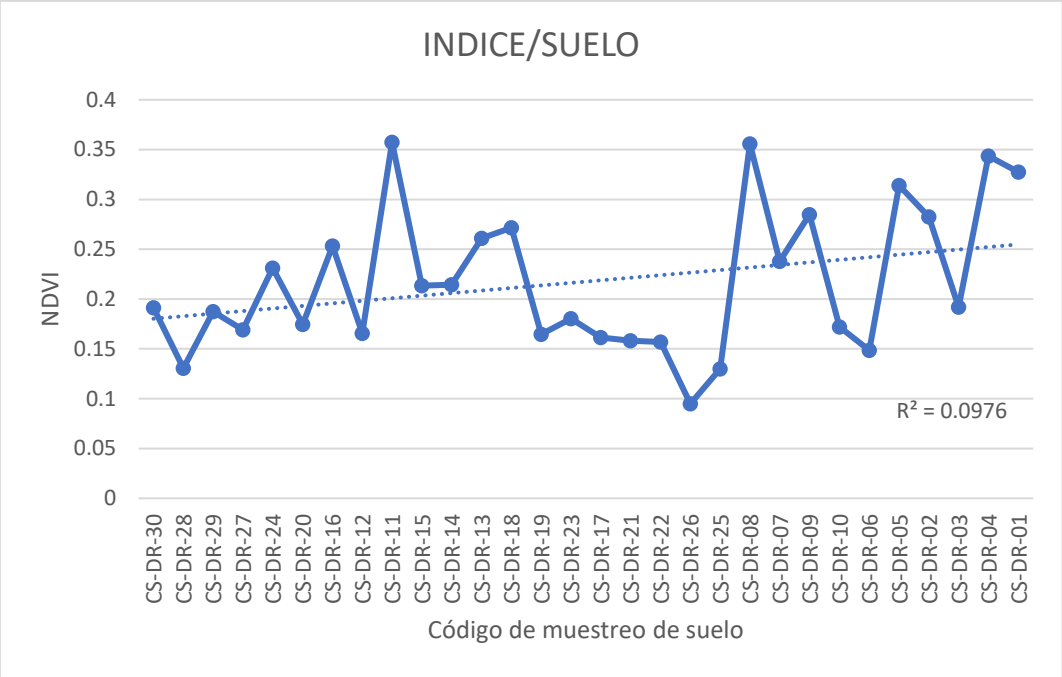


Figura 6.71. Índice de vegetación (NDVI) y muestreo de suelo

Tabla 6.64. Índice de vegetación (NDRE) y muestreo de suelo

Cobertura vegetal	Código	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18 L		Altitud m s. n. m.	Mean_ NDRE	Stdev_ NDRE	Min_ NDRE	Max_ NDRE
		Este (m)	Norte (m)					
Vegetacion mixta	CS-DR-30	361897	8799527	4122	0.182	0.019	0.133	0.224
Escasa o nula vegetación	CS-DR-28	361839	8799460	4117	0.068	0.006	0.051	0.081
Escasa o nula vegetación	CS-DR-29	361890	8799464	4140	0.064	0.014	0.027	0.090
Vegetacion mixta	CS-DR-27	361906	8799386	4204	0.056	0.008	0.035	0.077
Vegetacion mixta	CS-DR-24	361946	8799336	4137	0.105	0.011	0.083	0.125
Vegetacion mixta	CS-DR-20	361955	8799286	4137	0.087	0.013	0.068	0.123
Vegetacion mixta	CS-DR-16	361959	8799214	4137	0.102	0.009	0.079	0.119
Escasa o nula vegetación	CS-DR-12	361952	8799162	4136	0.065	0.004	0.054	0.075
Vegetacion mixta	CS-DR-11	361902	8799146	4138	0.107	0.010	0.082	0.132
Vegetacion mixta	CS-DR-15	361900	8799206	4139	0.092	0.008	0.076	0.108
Vegetacion mixta	CS-DR-14	361836	8799209	4139	0.101	0.005	0.092	0.113
Vegetacion mixta	CS-DR-13	361773	8799204	4139	0.230	0.011	0.190	0.251
Vegetacion mixta	CS-DR-18	361828	8799267	4140	0.099	0.007	0.082	0.116
Vegetacion mixta	CS-DR-19	361894	8799270	4140	0.106	0.005	0.094	0.120
Vegetacion mixta	CS-DR-23	361900	8799345	4146	0.101	0.012	0.066	0.121

Cobertura vegetal	Código	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18 L		Altitud m s. n. m.	Mean_ NDRE	Stdev_ NDRE	Min_ NDRE	Max_ NDRE
		Este (m)	Norte (m)					
Vegetacion mixta	CS-DR-17	361781	8799281	4095	0.086	0.004	0.074	0.095
Vegetacion mixta	CS-DR-21	361771	8799335	4098	0.077	0.010	0.050	0.098
Vegetacion mixta	CS-DR-22	361847	8799338	4100	0.088	0.008	0.071	0.105
Escasa o nula vegetación	CS-DR-26	361829	8799392	4102	0.040	0.004	0.030	0.047
Escasa o nula vegetación	CS-DR-25	361781	8799396	4103	0.050	0.006	0.037	0.066
Vegetacion mixta	CS-DR-08	361917	8799067	4107	0.109	0.023	0.055	0.153
Vegetacion mixta	CS-DR-07	361838	8799082	4107	0.077	0.019	0.045	0.150
Escasa o nula vegetación	CS-DR-09	361769	8799143	4109	0.091	0.015	0.053	0.130
Escasa o nula vegetación	CS-DR-10	361832	8799141	4109	0.072	0.006	0.057	0.088
Escasa o nula vegetación	CS-DR-06	361776	8799085	4111	0.054	0.008	0.033	0.070
Vegetacion mixta	CS-DR-05	361725	8799085	4112	0.120	0.030	0.069	0.193
Vegetacion mixta	CS-DR-02	361708	8799027	4114	0.120	0.016	0.078	0.160
Vegetacion mixta	CS-DR-03	361772	8799019	4114	0.076	0.011	0.055	0.099
Vegetacion mixta	CS-DR-04	361831	8799022	4116	0.068	0.018	0.032	0.106
Vegetacion mixta	CS-DR-01	361845	8798959	4116	0.086	0.019	0.047	0.130

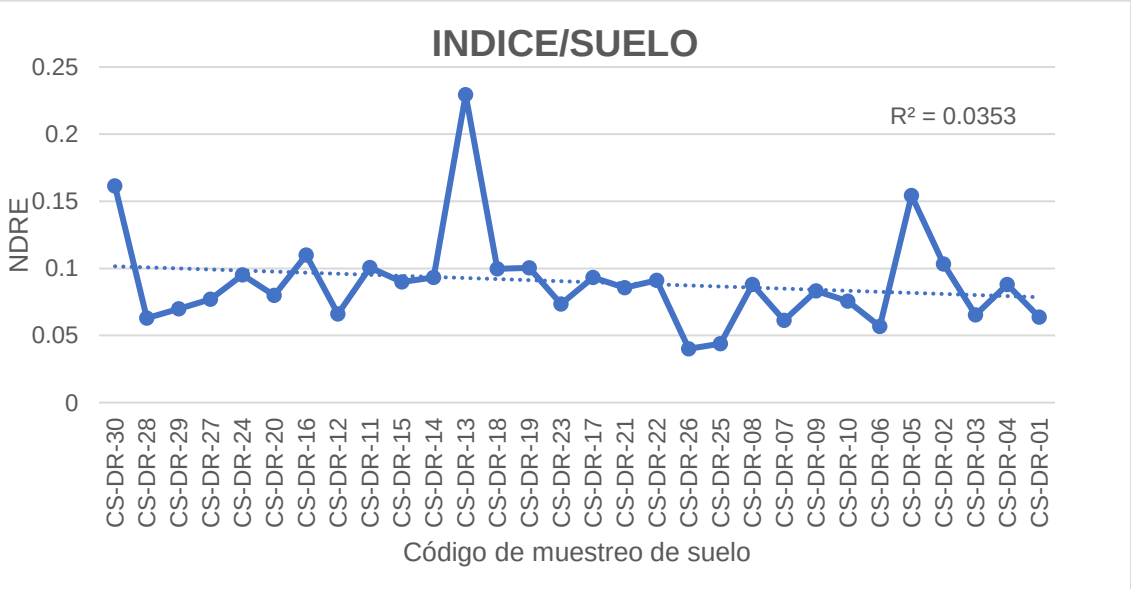


Figura 6.72. Índice de vegetación (NDRE) y muestreo de suelo

6.4.1.5.2 Muestreo en profundidad

a) Metales totales

Los resultados de las concentraciones de metales totales que se presentan en la Tabla 6.65, muestra las concentraciones de metales de la calicata CA-01 del API DR, las muestras CA-01 y CA-01A que compararadas con los ECA para suelo 2017, uso agrícola, las concentraciones de arsénico, cadmio, mercurio y plomo superan en un 100 % (2/2 de muestras colectadas) los valores de 50 mg/kg PS, 1,4 mg/kg PS, 6,6 mg/kg PS y 70 mg/kg PS respectivamente, en la segunda muestra colectada ninguna de las concentraciones superan el ECA.

Además la Tabla 6.66, de manera referencial se compara los resultados de las concentraciones de elementos de interés con la guía canadiense para suelos, donde el cobre, plata y zinc donde el 100 % (2/2 de muestras colectadas) exceden la guía canadiense para suelo (63 mg/kg PS, 20 mg/kg PS y 250 mg/kg PS respectivamente) con concentraciones de 4998 mg/kg PS, 86,59 mg/kg PS y 17920 mg/kg PS); eso correspondiente a la muestras más superficial; cobre, plata y zinc las concentraciones no exceden la guía canadiense en la muestra más profunda, selenio es el único parámetro que excede la guía canadiense (1 mg/kg PS) en todas las muestras

Tabla 6.65. Resultados de parámetros de metales totales en calicatas comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola, muestreo a profundidad

Código de Calicata	Código de muestra	Horizonte	Arsénico Total (mg/kg PS)	Bario Total (mg/kg PS)	Cadmio Total (mg/kg PS)	Mercurio Total (mg/kg PS)	Plomo Total (mg/kg PS)
CA-01	CA-01	Cg1	634	705,8	66,671	104	2 773
	CA-01A	Cg2	14,4	241,8	1,1817	0,625	31,2
ECA para suelo, uso agrícola (D.S. N.° 011-2017-MINAM)			50	750	1,4-	6,6-	70-

: Concentración que supera el valor del Estándar de calidad ambiental 2017 para suelo de uso agrícola

Tabla 6.66. Resultados de parámetros de metales totales en calicata comparados de manera referencial con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola, muestreo a profundidad

Código de Calicata	Código de muestra	Horizonte	Cobre Total (mg/kg PS)	Plata Total (mg/kg PS)	Selenio Total (mg/kg PS)	Zinc Total (mg/kg PS)
CA-01	CA-01	Cg1	4 998	86,59	3,628	17 920
	CA-01A	Cg2	23	11,22	1,045	171
Guía canadiense de suelo, uso agrícola			63	20	1	250

: Concentraciones que superan los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

6.4.1.6 API PAM 50

a) Metales totales

En la Tabla 6.67 y Figuras 6.73 se muestran las concentraciones de los resultados de laboratorio que se comparan con el ECA para suelo 2017en donde se aprecia que arsénico y plomo superan en un 100 % (8/8 de puntos muestreados) el ECA para suelo (50 mg/kg PS y 70 mg/kg PS respectivamente) siendo 1020 mg/kg PS la máxima concentración para arsénico y 8881 mg/kg PS la máxima concentración para plomo; la concentración de bario, cadmio y mercurio el 87,5 % (7/8 de puntos muestreados) superan el ECA (750 mg/kg PS, 1,4 mg/kg PS y 6,6 mg/kg PS), el único punto que no supera el ECA para estos 3 parámetros es el punto CS-P50-07.

Además, en la Tabla 6.68 y Figura 6.74 de manera referencial se compara con la guía canadiense para suelos los resultados de las concentraciones de elementos de interés, donde el cobre, selenio y zinc donde el 100 % (8/8 de puntos muestreados) exceden la guía canadiense para suelo (63 mg/kg PS, 1 mg/kg PS y 250 mg/kg PS respectivamente); plata excede en un 87,5 % (7/8 de puntos muestreados) la guía canadiense (20 mg/kg PS) para suelos de uso agrícola.

Tabla 6.67. Resultados de parámetros de metales totales del API PAM 50 comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola

Código	Arsénico Total (mg/kg PS)	Bario Total (mg/kg PS)	Cadmio Total (mg/kg PS)	Mercurio Total (mg/kg PS)	Plomo Total (mg/kg PS)
CS-P50-01	615	1 132	33,949	28,5	4 282
CS-P50-02	643	764,7	26,110	34,0	2 707
CS-P50-03	1 020	1 150	33,616	28,6	4 134
CS-P50-05	643	1 322	43,645	16,0	8 881
CS-P50-04	934	1 032	14,022	227	5 038
CS-P50-07	82,3	150,3	0,98096	6,26	247
CS-P50-06	550	1 315	29,433	34,8	7 390
CS-P50-08	835	1 690	26,058	74,2	6 580
ECA para suelo, uso agrícola (D.S. N.° 011-2017-MINAM)	50	750	1,4	6,6	70

: Concentración que supera el valor del ECA para suelo de uso agrícola (D.S. N.° 011-2017-MINAM)

Tabla 6.68. Resultados de parámetros de metales totales del API PAM 50 comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

Código	Cobre Total (mg/kg PS)	Plata Total (mg/kg PS)	Selenio Total (mg/kg PS)	Zinc Total (mg/kg PS)
CS-P50-01	1 317	58,09	1,971	14 992
CS-P50-02	1 474	40,82	1,879	10 026
CS-P50-03	1 870	61,45	2,000	13 993
CS-P50-05	1 308	110,4	2,050	24 422
CS-P50-04	1 733	129,4	3,108	5 087
CS-P50-07	72	6,313	1,290	380
CS-P50-06	1 853	132,6	2,215	15 426
CS-P50-08	2 122	112,8	2,567	12 458
Guía canadiense de suelo, uso agrícola	63	20	1	250

: Concentraciones que superan los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

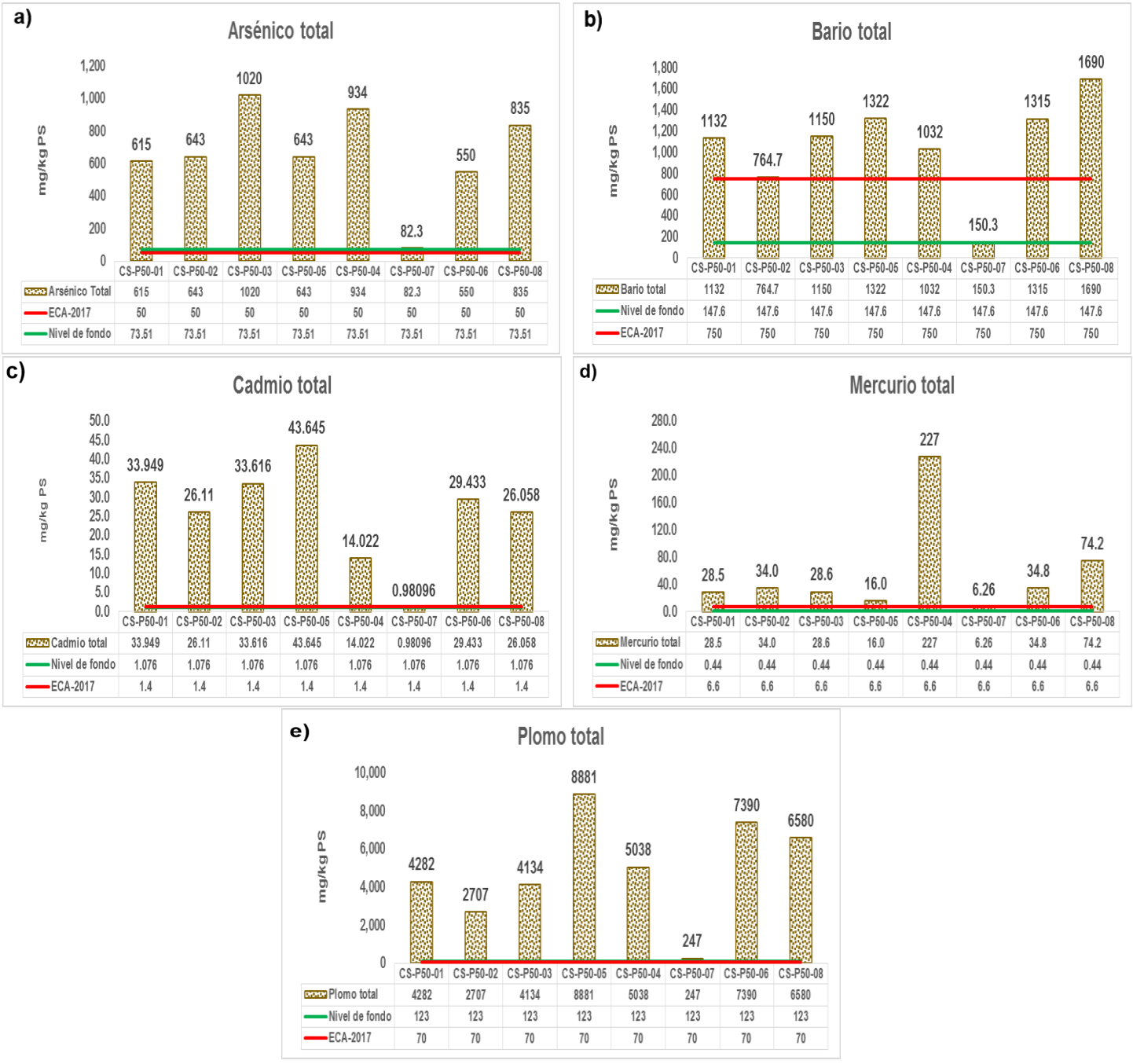


Figura 6.73. Concentraciones de a) arsénico, b) bario, c) cadmio, d) mercurio, y e) plomo en el API PAM 50 comparados con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores del nivel de fondo

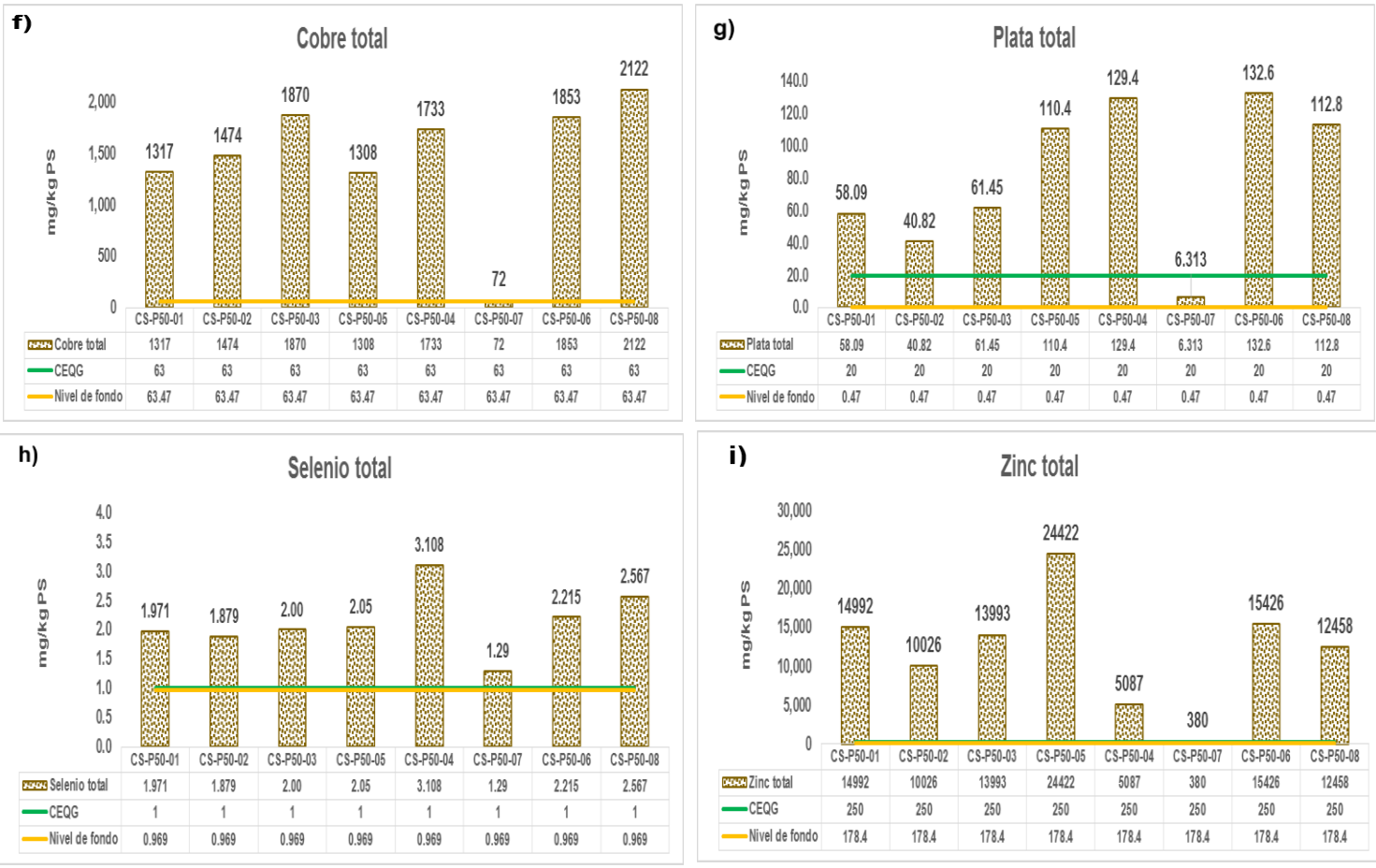


Figura 6.74. Concentraciones de f) cobre, g) plata, h) selenio y i) zinc en el API PAM 50 comparados con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y valores del nivel de fondo

b) Índices NDVI y NDRE

En esta API PAM 50 se hizo un sobrevuelo de un área de 16,355 ha (Figura 6.75 que conforma la formación de cobertura vegetal mixta y/o alterada en la que se realizó el análisis de los índices de vegetación de NDVI y NDRE. Obteniéndose una media de 0,407 de NDVI y -0,191 de NDRE (Tabla 6.69, Figura 6.76).

Tabla 6.69. Información estadística de los índices de vegetación NDVI y NDRE

Estadísticos	NDVI	NDRE
count	16177492	16177492
sum	3293281,35	3293281,35
mean	0,407144	0,19142
stdev	0,157798	0,04349
min	-0,196084	-0,51136
max	1,486172	0,880734

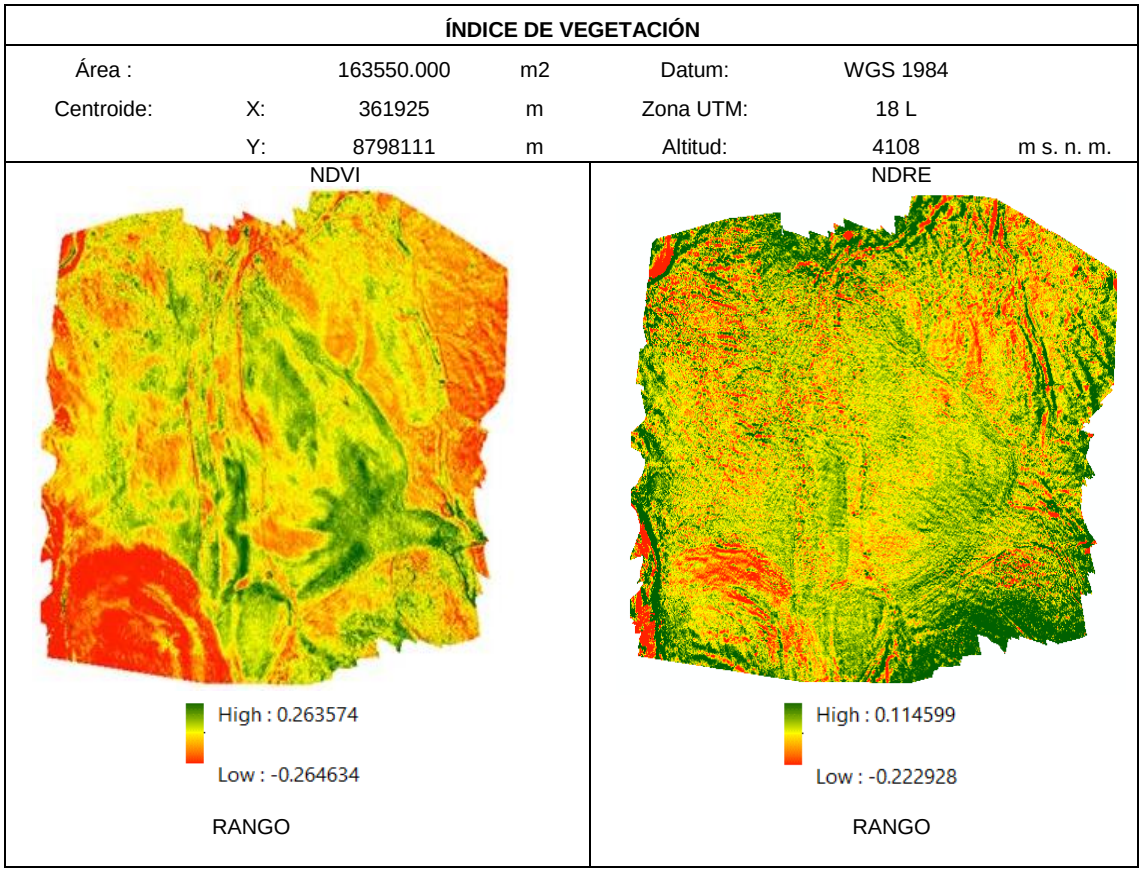


Figura 6.75. Índice de vegetación (NDVI y NDRE) de la formación vegetal mixta del API PAM 50

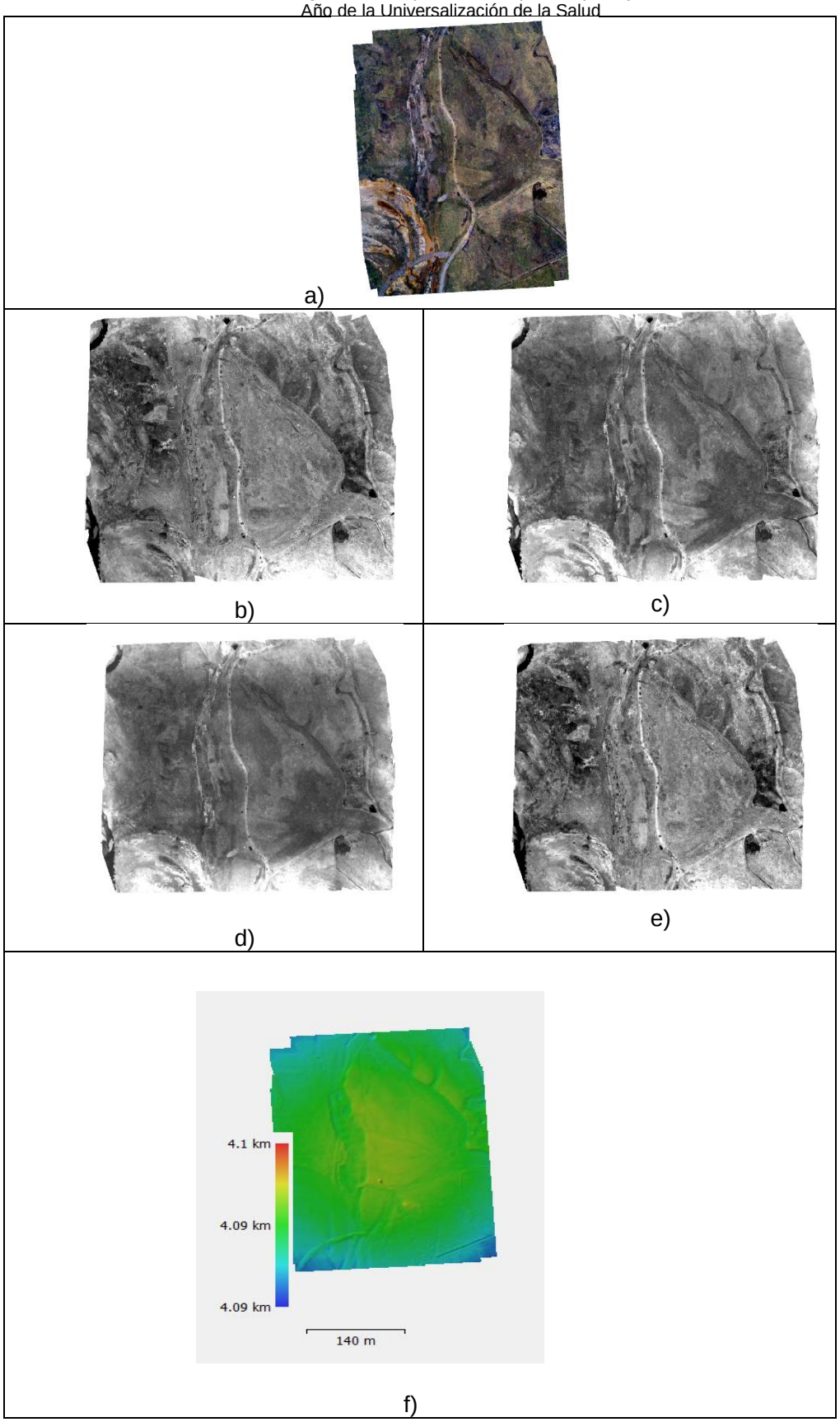


Figura 6.76. a) Ortofoto RGB, b) NIR c) Red, d) Green y e) Red Edge), f) DEM del API PAM 50

- **Correlación de raster**

Con los datos estandarizados se realizó la primera aproximación del análisis de correlación entre los índices de vegetación del sensor Parrot Sequoia y los datos de parámetros de suelo, los resultados son presentados en las Tablas 6.70 y 6.71 y Figuras 6.77 y 6.78

Tabla 6.70. Índice de vegetación (NDVI) y muestreo de suelo

Cobertura vegetal	Código	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18 L		Altitud m s. n. m.	Mean_ NDVI	Stdev_ NDVI	Min_ NDVI	Max_ NDVI
		Este (m)	Norte (m)					
Vegetacion mixta	CS-P50-01	361878	8798187	4067	0.266	0.032	0.201	0.343
Escasa o nula vegetación	CS-P50-02	361875	8798150	4103	0.219	0.027	0.176	0.287
Escasa o nula vegetación	CS-P50-03	361878	8798113	4103	0.220	0.024	0.169	0.261
Bofedal	CS-P50-04	361915	8798072	4099	0.413	0.017	0.361	0.445
Césped	CS-P50-05	361882	8798069	4111	0.337	0.029	0.268	0.381
Escasa o nula vegetación	CS-P50-06	361885	8798022	4057	0.200	0.047	0.080	0.278
Césped	CS-P50-07	361919	8798038	4109	0.294	0.044	0.206	0.370
Vegetacion mixta	CS-P50-08	361890	8797993	4111	0.316	0.049	0.203	0.379

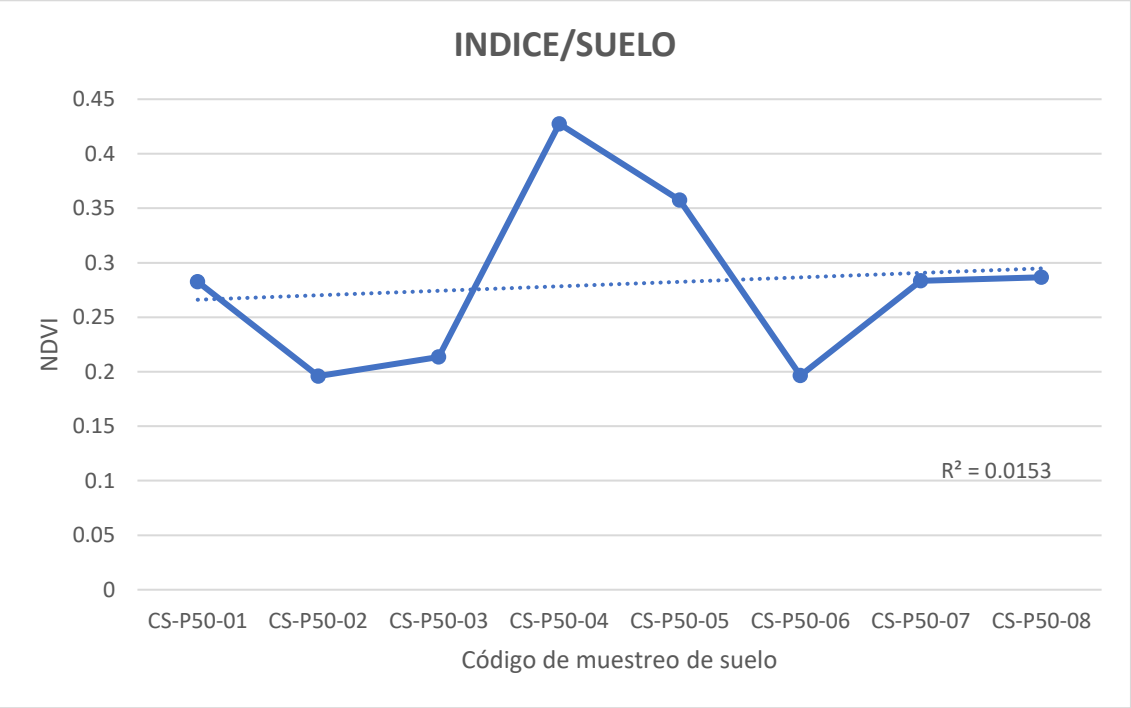


Figura 6.77. Índice de vegetación (NDVI) y muestreo de suelo

Tabla 6.71. Índice de vegetación (NDRE) y muestreo de suelo

Cobertura vegetal	Código	Coordenadas UTM WGS 84 - Zona 18 L		Altitud m s. n. m.	Mean_ NDRE	Stdev_ NDRE	Min_ NDRE	Max_ NDRE
		Este (m)	Norte (m)					
Vegetacion mixta	CS-P50-01	361878	8798187	4067	0.103	0.008	0.087	0.124
Escasa o nula vegetación	CS-P50-02	361875	8798150	4103	0.098	0.006	0.085	0.110
Escasa o nula vegetación	CS-P50-03	361878	8798113	4103	0.099	0.007	0.078	0.116
Bofedal	CS-P50-04	361915	8798072	4099	0.129	0.010	0.108	0.152
Césped	CS-P50-05	361882	8798069	4111	0.110	0.012	0.075	0.142
Escasa o nula vegetación	CS-P50-06	361885	8798022	4057	0.085	0.017	0.021	0.126
Césped	CS-P50-07	361919	8798038	4109	0.110	0.021	0.069	0.157
Vegetacion mixta	CS-P50-08	361890	8797993	4111	0.102	0.053	-0.016	0.246

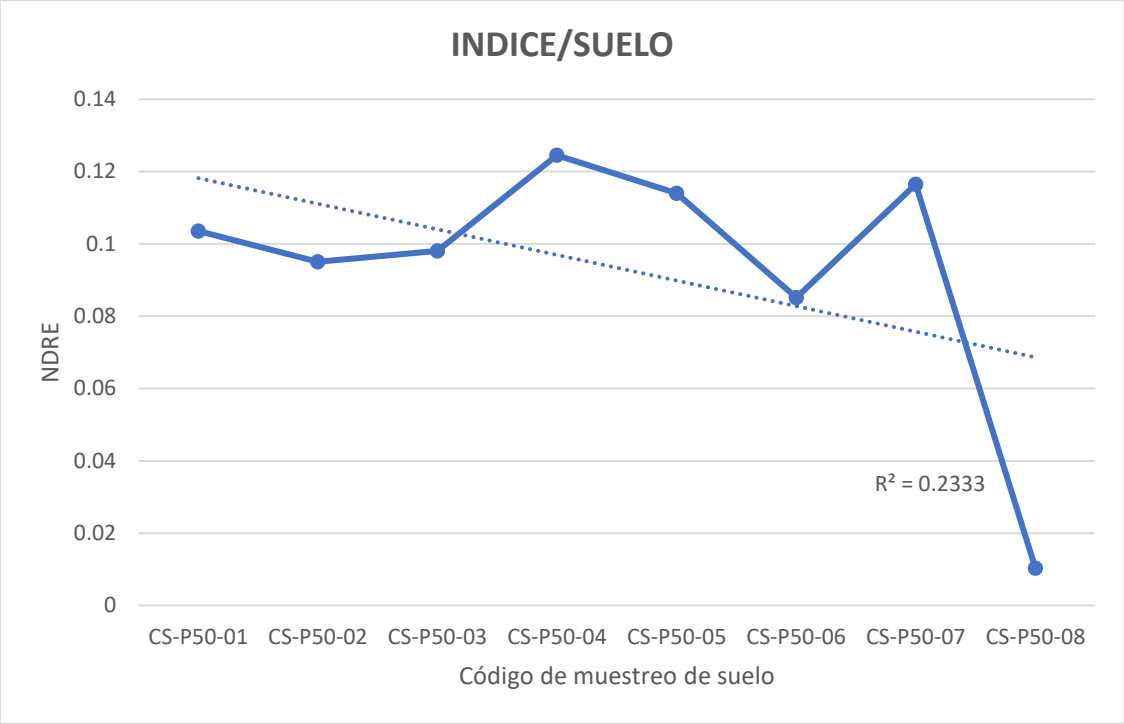


Figura 6.78. Índice de vegetación (NDRE) y muestreo de suelo

6.4.2 Nivel de fondo

6.4.2.1 Nivel de fondo A

a) Concentraciones de nivel de fondo

Luego del tratamiento de los resultados de las concentraciones reportadas por el laboratorio se realizó el análisis estadístico de todos los valores para poder determinar el valor de nivel de fondo en ese sector A. En la Tabla 6.72, se presenta los resultados del tratamiento estadístico a las concentraciones para determinar el valor de fondo.

Tabla 6.72. Concentraciones de nivel de fondo determinado estadísticamente

Nivel de fondo	Parámetro	Mínima	mediana	Media	Máximo	Varianza	Desviación Estándar	Nivel de fondo	Nivel de referencia
MF-A	Plata (Ag)	0,688	1,304	1,754	5,12	1,7424	1,32	2,692	4,384
	Arsénico (As)	18	48,65	55,1	132	1087,0209	32,97	72,2	145,3
	Bario (Ba)	113,5	184,4	186,8	250,4	2459,1681	49,59	212,5	322,5
	Cadmio (Cd)	0,723	0,987	1,082	1,677	0,073441	0,271	1,23	1,844
	Cobre (Cu)	23	45	45,58	87	386,9089	19,67	55,78	99,39
	Mercurio (Hg)	0,182	0,746	0,895	2,06	0,399424	0,632	1,261	2,734
	Plomo (Pb)	55,6	92,1	96,99	155	901,8009	30,03	113,4	181,5
	Selenio (Se)	0,18	0,437	0,614	1,094	0,126736	0,356	0,808	1,2
	Zinc (Zn)	52	114,5	106,9	142	909,6256	30,16	122,6	189,4

6.4.2.2 Nivel de fondo C

6.4.2.2.1 Muestreo superficial

a) Concentraciones de nivel de fondo

Luego del tratamiento de los resultados de las concentraciones reportadas por el laboratorio se realizó el análisis estadístico de todos los valores para poder determinar el valor de nivel de fondo en ese sector C. En la Tabla 6.73, se presenta los resultados del tratamiento estadístico a las concentraciones para determinar el valor de fondo.

Tabla 6.73. Concentraciones de nivel de fondo determinado estadísticamente

Nivel de fondo	Parámetro	Mínima	mediana	Media	Máximo	Varianza	Desviación Estándar	Nivel de fondo	Nivel de referencia
MF-C	Plata (Ag)	0,0689	0,298	0,345	0,806	0,0529	0,23	0,47	0,992
	Arsénico (As)	41,4	66,85	66,77	85,5	169,2601	13,01	73,51	102,4
	Bario (Ba)	120,2	144,8	141,4	164,4	143,5204	11,98	147,6	174,2
	Cadmio (Cd)	0,708	1,037	0,988	1,244	0,0289	0,17	1,076	1,454
	Cobre (Cu)	35	58,5	57,42	73	136,4224	11,68	63,47	89,38
	Mercurio (Hg)	0,268	0,406	0,396	0,547	0,007056	0,084	0,44	0,626
	Plomo (Pb)	73,6	115,5	112,4	142	423,1249	20,57	123	168,6
	Selenio (Se)	0,668	0,875	0,9	1,126	0,017689	0,133	0,969	1,264
	Zinc (Zn)	141	172,5	169,5	190	292,0681	17,09	178,4	216,3

b) Disponibilidad de metales

En la Tabla 6.74 y Figura 6.79 se consideran las concentraciones de los metales del punto de muestreo MF-12C-A, está es muestra compuesta de los puntos MF-01C, MF-02C, MF-03C, MF-04C, MF-05C, MF-06C, MF-07C, MF-08C, MF-09C, MF-10C, MF-11C y MF-12C.

Arsénico presenta concentraciones por debajo del límite de detección en las 3 primeras etapas y teniendo su máxima concentración en la etapa 6 (residual) 54,09 mg/kg; bario presenta su máxima concentración de 32,77 mg/kg en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro) y su mínima concentración 0,43 mg/kg en la etapa 1 (extraíbles); cadmio presenta concentraciones por debajo del límite de detección en la etapa 1 (extraíbles) y la

máxima concentración de 0,475 mg/kg en la etapa 2 (intercambiadas y adsorbidas); mercurio se encuentra en mayores concentraciones en la etapa 5 y 6 con concentraciones de 0,234 mg/kg y 0,781 mg/kg respectivamente y presenta concentraciones por debajo de límite de detección en las 3 primeras etapas; plomo presenta su máxima concentración en la etapa 5 (ligada a materia orgánica) 44,04 mg/kg y la mínima en la etapa 1 (extraíbles) que las concentraciones están por debajo del límite de detección.

Cobre varia sus concentraciones por las distintas etapas siendo la concentración máxima de 35,50 mg/kg en la etapa 5 (ligada a materia orgánica) y la concentración mínima de 0,37 mg/kg en la etapa 2 (intercambiable y adsorbidas), plata presenta concentraciones por debajo del límite de detección en la etapa 1 (extraíbles) y 3 (ligada a carbonato) mientras que la concentración máxima 0,323 mg/kg en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro); selenio presenta concentraciones por debajo del límite de detección en las 6 etapas; zinc presenta concentraciones por debajo del límite de detección en las etapas 1 y 3, la concentración máxima es de 89,9 mg/kg en la etapa 6 (residual).

Tabla 6.74. Resultados de parámetros de extracción secuencial por la metodología de Tessier en nivel de fondo C para la muestra MF-12C-A

Código		MF-12C-A					
Parámetro	Unidad	Tessier – Extraíbles (Etapa 1)	Tessier – Intercambiable y adsorbidas (Etapa 2)	Tessier – Ligado a carbonato (Etapa 3)	Tessier – Fácilmente reducibles y óxidos de hierro (Etapa 4)	Tessier – ligado a materia orgánica (Etapa 5)	Tessier – Residual (Etapa 6)
Arsénico (As)	mg/kg	< 0,30	< 0,300	< 0,30	3,03	9,63	54,09
Bario (Ba)	mg/kg	0,43	18,54	23,40	32,77	22,61	20,23
Cadmio (Cd)	mg/kg	< 0,050	0,475	0,076	0,293	0,078	0,090
Cobre (Cu)	mg/kg	0,56	0,37	2,007	7,876	35,30	18,01
Mercurio (Hg)	mg/kg	< 0,010	< 0,010	< 0,010	0,078	0,234	0,781
Plata (Ag)	mg/kg	< 0,007	0,203	< 0,0012	0,323	0,019	0,268
Plomo (Pb)	mg/kg	< 0,50	7,20	10,22	38,72	44,04	28,56
Selenio (Se)	mg/kg	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Zinc (Zn)	mg/kg	< 5,0	6,5	< 5,00	25,96	28,07	89,90

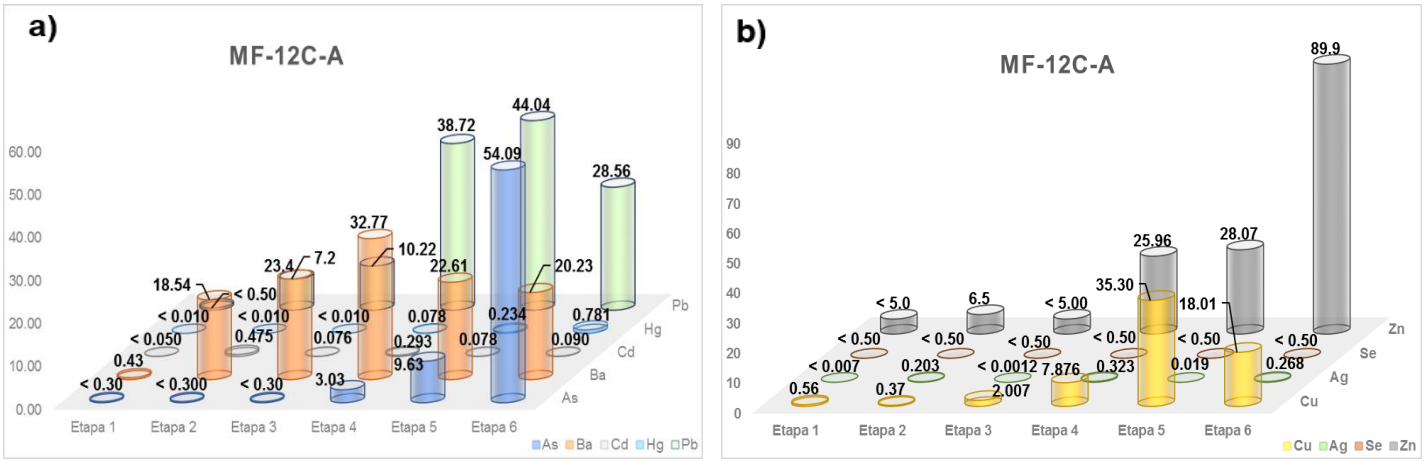
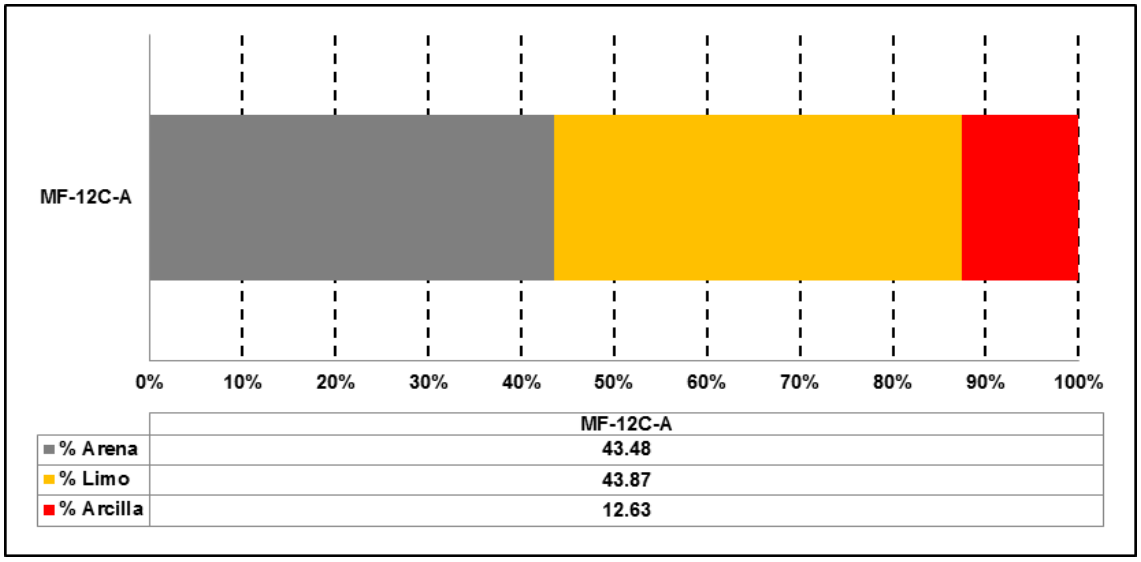


Figura 6.79. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto MF-12C-A (muestreo superficial) del nivel de fondo C

c) Análisis granulométrico

En la Figura 6.80, se oberva que los porcentajes de los materiales predominantes en el suelo del nivel de fondo C, para la muestra analizada MF-12C-A, que es compuesta de los puntos MF-01C, MF-02C, MF-03C, MF-04C, MF-05C, MF-06C, MF-07C, MF-08C, MF-09C, MF-10C, MF-11C y MF-12C; presentó una textura predomínate de Franco, ya que las proporciones de los materiales son equitativas entre sí.



	MF-12C-A
% Arena	43.48
% Limo	43.87
% Arcilla	12.63

Figura 6.80. Resultados del análisis granulométrico de la muestra de nivel de fondo MF-12C-A

En la Figura 6.81 se ubica las proporciones de partículas del suelo del nivel de fondo C, donde en el triángulo textural se identifica que el suelo es de textura Franca.

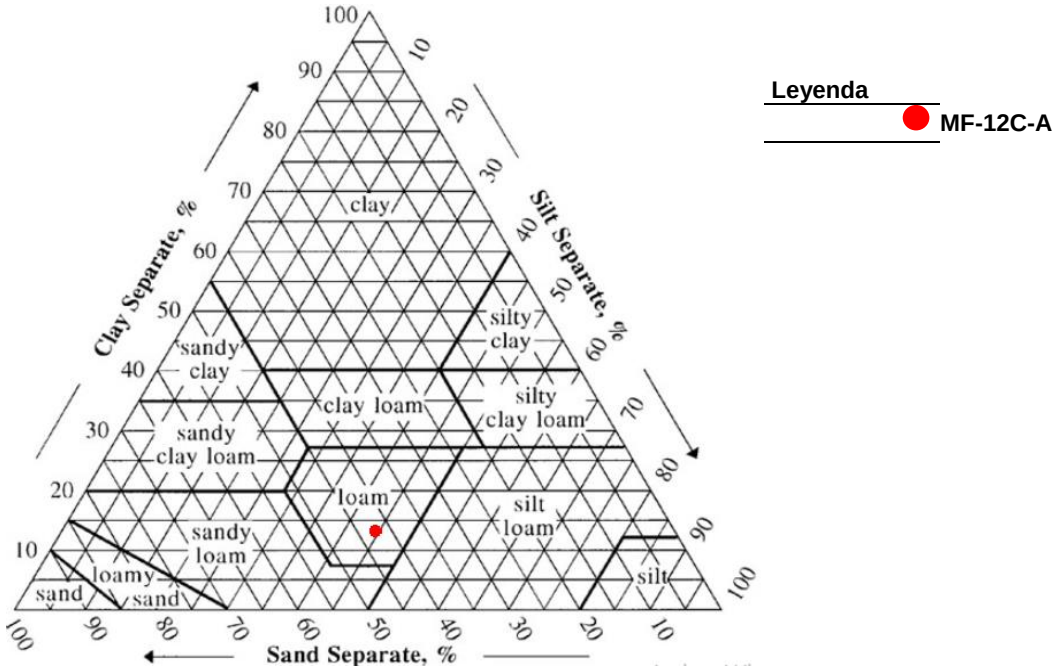


Figura 6.81. Triangulo textural de las muestras obtenidas del análisis granulométrico del nivel de fondo

d) ABA

De acuerdo a los resultados de laboratorio de la prueba ABA, para definir la generación de acidez, se consideró el primer y segundo criterio de análisis, para la muestra del punto MF-12C-A; en la Tabla 6.75 se observa que dicha muestra compuesta no es generadora de acidez.

Tabla 6.75. Resultados obtenidos en la prueba estática de balance ácido-base de las muestras de nivel de fondo MF-12C-A

Código		MF-12C-A
Fisicoquímicos (ABA)		
Grado de Efervescencia	-	1
pH en Pasta	Unidades pH	5,31
Potencial de Acidez Máximo (PA)	t CaCO3/1000t	1,88
Potencial de Neutralización Neto (PN)	t CaCO3/1000 t	-1,88
Potencial de Neutralización	t CaCO3/1000 t	< 1,00
Relación NP/MPA	-	< 0,01
Azufre Total	%	0,06
*Criterio 1: Para un NNP menor a cero, la muestra es «generadora neta de ácido». Sin embargo, para un NNP que varía entre -20 y +20 Kg CaCo3/Ton de muestra, corresponde a un rango de «incertidumbre». Para valores mayores a +20 Kg CaCo3/Ton, se considera a la muestra es «potencial no generador de ácido»; mientras que, para valores menores a -20 Kg CaCo3/Ton se considera «potencial generador de ácido». **Criterio 2: Proporción entre PN y PA = RNP, para un PN/PA < 1:1 es probable que se genere acidez, mientras que para el rango de PN/PA entre 1:1 y 3:1 corresponde a una zona de «incertidumbre». Cuando el PN/PA >3:1, la muestra es «potencial no generador de acidez».		

e) Análisis mineralógico por difracción de rayos X

En la Tabla 6.76, se detalla la distribución de los resultados de los minerales a través de difracción de rayos X, la muestra analizada fue MF-12C-A, que es una muestra compuesta de los puntos MF-01C, MF-02C, MF-03C, MF-04C, MF-05C, MF-06C, MF-07C, MF-08C, MF-09C, MF-10C, MF-11C y MF-12C; algunos minerales obtenidos de este análisis son el cuarzo, plagioclasa y feldespato – K.

Tabla 6.76. Resultados obtenidos de difracción de rayos X en el nivel de fondo C

Código	MF-12C-A	
Nombre del mineral	Formula general	Resultado aproximado (%)
Cuarzo	SiO2	48
Plagioclasa (Andesina)	(Ca,Na)(Al,Si)4O8	23
Plagioclasa (Albita)	Na(Al,Si)4O8	9
Feldespato - K (Ortoclasa)	KALSi3O8	8
Mica (Muscovita)	KAl2(Si3Al)O10(OH,F)2	5
Caolinita	Al2Si2O5(OH)4	2
Mineral Laminar*	-----	2
Clorita (Clinocloro)	(Mg,Fe)5Al(Si3Al)O10(OH)8	< L.D.
Anfibol (Actinolita)	Ca2(Mg,Fe)5Si8O22(OH)2	< L.D.

6.4.2.2.2 Muestreo a profundidad

Las concentraciones de metales totales para la calicata CA-03 se presentan en la Tabla 6.77, comparadas con los ECA para suelo del 2017, uso agrícola; donde la muestra CA-02

fue colectada en la calicata del nivel de fondo C; la cual no superó los valores establecidos en la norma mención.

Tabla 6.77. Resultados de parámetros de metales totales en la calicata CA-02 comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola

Código de Calicata	Código de muestra	Horizonte	Arsénico Total	Bario Total	Cadmio Total	Mercurio Total	Plomo Total
			mg/kg PS	mg/kg PS	mg/kg PS	mg/kg PS	mg/kg PS
CA-02	CA-02	C	25,8	146,1	1,1500	0,231	26,5
ECA para suelo, uso agrícola (D.S. N.° 011-2017-MINAM)			50	750	1,4	6,6	70

Además, en la Tabla 6.78 de manera referencial se compara las concentraciones de elementos de interés de la calicata CA-02, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola; donde la muestra CA-02 de la calicata corresponde al nivel de fondo C; registrándose que el selenio fue el único parámetro que excedió el valor de la guía señalada (1 mg/kg PS).

Tabla 6.78. Resultados de parámetros de metales totales en la calicata CA-02 comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

Código de Calicata	Código de muestra	Horizonte	Cobre Total (mg/kg PS)	Plata Total (mg/kg PS)	Selenio Total (mg/kg PS)	Zinc Total (mg/kg PS)
CA-02	CA-02	C	14	3,801	2,336	150
Guía canadiense de suelo, uso agrícola			63	20	1	250

: Concentración que excede el valor de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

6.4.2.3 Nivel de fondo D

6.4.2.3.1 Muestreo superficial

a) Concentraciones de nivel de fondo

Luego del tratamiento de los resultados de las concentraciones reportadas por el laboratorio se realizó el análisis estadístico de todos los valores para poder determinar el valor de nivel de fondo en ese sector D. En la Tabla 6.79, se presenta los resultados del tratamiento estadístico a las concentraciones para determinar el valor de fondo.

Tabla 6.79. Concentraciones de nivel de fondo determinado estadísticamente

Nivel de fondo	Parámetro	Mínima	mediana	Media	Máximo	Varianza	Desviación Estándar	Nivel de fondo	Nivel de referencia
MF-D	Plata (Ag)	1,527	12,65	12,47	24,51	73,839649	8,593	16,92	26,6
	Arsénico (As)	87,1	144,5	139,7	199	1107,5584	33,28	156,9	230,7
	Bario (Ba)	70,4	112,3	113,9	153,2	919,9089	30,33	129,6	196,8
	Cadmio (Cd)	0,7	1,32	1,185	1,433	0,061504	0,248	1,314	1,433
	Cobre (Cu)	69	133	130,1	210	1963,3761	44,31	153,1	251,3
	Mercurio (Hg)	2,58	12,75	14,55	36,4	82,6281	9,09	19,27	39,42
	Plomo (Pb)	179	421,5	428,8	671	23562,25	153,5	508,4	848,7
	Selenio (Se)	0,584	0,829	0,872	1,201	0,050625	0,225	0,989	1,488
	Zinc (Zn)	218	276	272,8	312	900	30	288,4	354,9

b) Disponibilidad de metales

En la Tabla 6.80 y Figura 6.82 se aprecian las concentraciones de los metales del punto de muestreo MF-12D-A, está es muestra compuesta de los puntos MF-01D, MF-02D, MF-03D, MF-04D, MF-05D, MF-06D, MF-07D, MF-08D, MF-09D, MF-10D, MF-11D y MF-12D.

Arsénico presenta concentraciones por debajo del límite de detección en las 2 primeras etapas y teniendo su máxima concentración en la etapa 6 (residual) 162,2 mg/kg; bario presenta su máxima concentración de 44,71 mg/kg en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro) y su mínima concentración 0,31 mg/kg en la etapa 1 (extraíbles); cadmio presenta concentraciones por debajo del límite de detección en la etapa 1 (extraíbles) y la máxima concentración de 0,583 mg/kg en la etapa 4 (fácilmente reducibles y óxidos de hierro); mercurio se encuentra en mayores concentraciones en la etapa 5 y 6 con concentraciones de 10,51 mg/kg y 25,74 mg/kg respectivamente y presenta concentraciones por debajo de límite de detección en las etapas 2 y 3; plomo presenta su máxima concentración en la etapa 6 (residual) 321,,5 mg/kg y la mínima 0,99 mg/kg en la etapa 1 (extraíbles).

Cobre distribuye sus concentraciones en las etapas 4, 5 y 6, las concentraciones son de 19,92 mg/kg, 104,9 mg/kg y 51,57 mg/kg respectivamente, plata presenta concentraciones por debajo del límite de detección en la etapa 1 (extraíbles) mientras que la concentración máxima de 14,36 mg/kg en la etapa 6 (residual); selenio presenta concentraciones por debajo del límite de detección en las etapas 1,2, 3, 4 y 6; zinc presenta concentraciones por debajo del límite de detección en las etapas 1 y 2, la concentración máxima es de 158,2 mg/kg en la etapa 6 (residual).

Tabla 6.80. Resultados de parámetros de extracción secuencial por la metodología de Tessier en nivel de fondo D para la muestra MF-12D-A

Código		MF-12D-A					
Parámetro	Unidad	Tessier – Extraíbles (Etapa 1)	Tessier – Intercambiable y adsorbidas (Etapa 2)	Tessier – Ligado a carbonato (Etapa 3)	Tessier – Fácilmente reducibles y óxidos de hierro (Etapa 4)	Tessier – ligado a materia orgánica (Etapa 5)	Tessier – Residual (Etapa 6)
Arsénico (As)	mg/kg	< 0,30	< 0,300	1,20	9,39	20,53	162,2
Bario (Ba)	mg/kg	0,31	0,72	20,87	44,71	14,03	31,38
Cadmio (Cd)	mg/kg	< 0,050	0,413	0,194	0,583	0,099	0,190
Cobre (Cu)	mg/kg	1,17	0,44	3,697	19,92	104,9	51,57
Mercurio (Hg)	mg/kg	0,011	< 0,010	< 0,010	0,146	10,51	25,74
Plata (Ag)	mg/kg	< 0,007	0,573	< 0,0012	0,404	0,674	14,36
Plomo (Pb)	mg/kg	0,99	1,73	28,75	142,4	86,22	321,5
Selenio (Se)	mg/kg	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	0,54	< 0,50
Zinc (Zn)	mg/kg	< 5,0	< 5,0	10,32	76,70	50,76	158,2

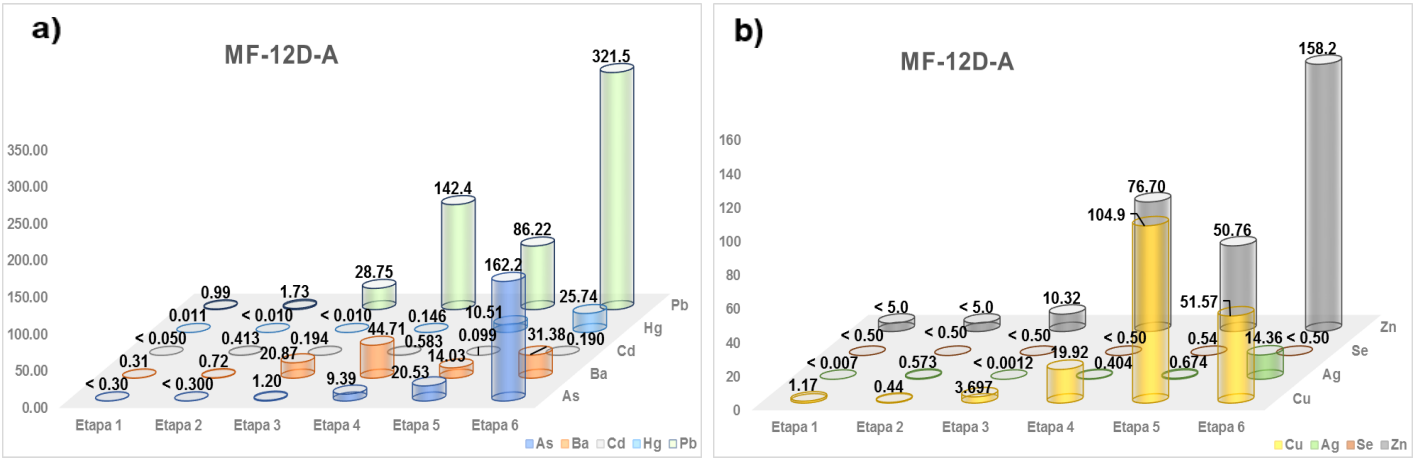


Figura 6.82. Disponibilidad por etapas de metales a) arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, y b) cobre, plata, selenio y zinc, en el punto MF-12D-A (muestreo superficial) del nivel de fondo D

c) ABA

De acuerdo a los resultados de laboratorio de la prueba ABA, para definir la generación de acidez, se consideró el primer y segundo criterio de análisis, para la muestra del punto MF-12D-A; en la Tabla 6.81 se observa que dicha muestra compuesta no es generadora de acidez.

Tabla 6.81. Resultados obtenidos en la prueba estática de balance ácido-base de las muestras de nivel de fondo MF-12D-A

Fisicoquímicos (ABA)		
Grado de Efervescencia	-	1
pH en Pasta	Unidades pH	6,690
Potencial de Acidez Máximo (PA)	t CaCO3/1000t	1,88
Potencial de Neutralización Neto (PN)	t CaCO3/1000 t	5,37
Potencial de Neutralización	t CaCO3/1000 t	7,25
Relación NP/MPA	-	386
Azufre Total	%	0,08
*Criterio 1: Para un NNP menor a cero, la muestra es «generadora neta de ácido». Sin embargo, para un NNP que varía entre -20 y +20 Kg CaCo3/Ton de muestra, corresponde a un rango de «incertidumbre». Para valores mayores a +20 Kg CaCo3/Ton, se considera a la muestra es «potencial no generador de ácido»; mientras que, para valores menores a -20 Kg CaCo3/Ton se considera «potencial generador de ácido». **Criterio 2: Proporción entre PN y PA = RNP, para un PN/PA < 1:1 es probable que se genere acidez, mientras que para el rango de PN/PA entre 1:1 y 3:1 corresponde a una zona de «incertidumbre». Cuando el PN/PA >3:1, la muestra es «potencial no generador de acidez».		

d) Análisis mineralógico por difracción de rayos X

En la Tabla 6.82, se detalla la distribución de los resultados de los minerales a través de difracción de rayos X, la muestra analizada fue MF-12D-A, que es una muestra compuesta de los puntos MF-01D, MF-02D, MF-03D, MF-04D, MF-05D, MF-06D, MF-07D, MF-08D, MF-09D, MF-10D, MF-11D y MF-12D; algunos minerales obtenidos de este análisis son el cuarzo en mayor abundancia, arcillas como caolinita y plagiosa.

Tabla 6.82. Resultados obtenidos de difracción de rayos X en el nivel de fondo D

Código	MF-12D-A	
Nombre del mineral	Formula general	Resultado aproximado (%)
Cuarzo	SiO2	90
Caolinita	Al2Si2O5(OH)4	3
Mica (Muscovita)	KAl2(Si3Al)O10(OH,F)2	2
Plagioclasa (Andesina)	(Ca,Na)(Al,Si)4O8	2
Clacita	CaCO3	< L.D.
Dolomita	CaMg(CO3)2	< L.D.

6.4.2.3.2 Muestreo a profundidad

Las concentraciones de metales totales para la calicata CA-03 se presentan en la Tabla 6.83, comparadas con los ECA para suelo del 2017, uso agrícola; donde las muestras CA-03A y CA-03 fueron colectadas en la calicata del nivel de fondo D, registrándose que el arsénico, mercurio y plomo superaron los valores de 50 mg/kg PS, 6,6 mg/kg PS y 70 mg/kg PS respectivamente, en la muestra más superficial; mientras que, bario y cadmio no superaron los valores de 750 mg/kg PS y 1,4 mg/kg PS respectivamente, en ninguna de las 2 muestras; establecidos en la norma en mención.

Tabla 6.83. Resultados de parámetros de metales totales en la calicata CA-03 comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola

Código de Calicata	Código de muestra	Horizonte	Arsénico Total	Bario Total	Cadmio Total	Mercurio Total	Plomo Total
			mg/kg PS	mg/kg PS	mg/kg PS	mg/kg PS	mg/kg PS
CA-03	CA-03A	C2	94,5	88,00	0,84252	12,3	265
	CA-03	C1	15,9	21,26	0,42882	0,484	21,8
ECA para suelo, uso agrícola (D.S. N.° 011-2017-MINAM)			50	750	1,4	6,6	70

: Incumple al menos uno de los valores de los ECA para suelo, uso agrícola

Además, en la Tabla 6.84 de manera referencial se compara las concentraciones de elementos de interés de la calicata CA-03, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola; donde las muestras CA-03A y CA-03 de la calicata corresponden al nivel de fondo D; registrándose que el cobre fue el único elemento que se encuentró en el límite de la concentración referencial de la guía en mención (63 kg/mg PS).

Tabla 6.84. Resultados de parámetros de metales totales en la calicata CA-03 comparados, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso

Código de Calicata	Código de muestra	Horizonte	Cobre Total (mg/kg PS)	Plata Total (mg/kg PS)	Selenio Total (mg/kg PS)	Zinc Total (mg/kg PS)
CA-03	CA-03A	C2	63	2,187	0,920	245
	CA-03	C1	5,3	1,981	0,280	68
Guía canadiense de suelo, uso agrícola			63	20	1	250

: Excede los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola

6.5 Objetivo específico 5: Determinar la influencia de los elementos de interés provenientes de los PAM sobre la flora y fauna silvestre (anfibios) en el área de influencia de los Pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y Delta Upamayo

6.5.1 Flora

Los resultados de la evaluación de la riqueza de especies de flora silvestre y del análisis de metales en tejido vegetal presente en 6 API y 3 zonas control, ubicadas a lo largo de la subcuenca del río San Juan son presentados a continuación.

6.5.1.1 Composición florística

Se han identificado 55 especies de plantas vasculares, agrupadas en 3 clases, 18 familias botánicas y 41 géneros (Anexo 2.2). La clase Magnoliopsida (angiospermas) representa el grupo dominante con 38 especies (69,1 %), seguidas de la clase Liliopsida (angiospermas) con 16 especies (29,1 %). Una menor diversidad presenta la clase Gnetopsida (gimnospermas) con una especie (1,8 %), tal como se detalla en la Tabla 6.85 y se muestra en la Figura 6.83.

Tabla 6.85. Número de familias, géneros y especies por cada clase registrada en el área de estudio

Clase	Familia	Genero	Especie
Gnetopsida	1	1	1
Liliopsida	3	11	16
Magnoliopsida	14	29	38

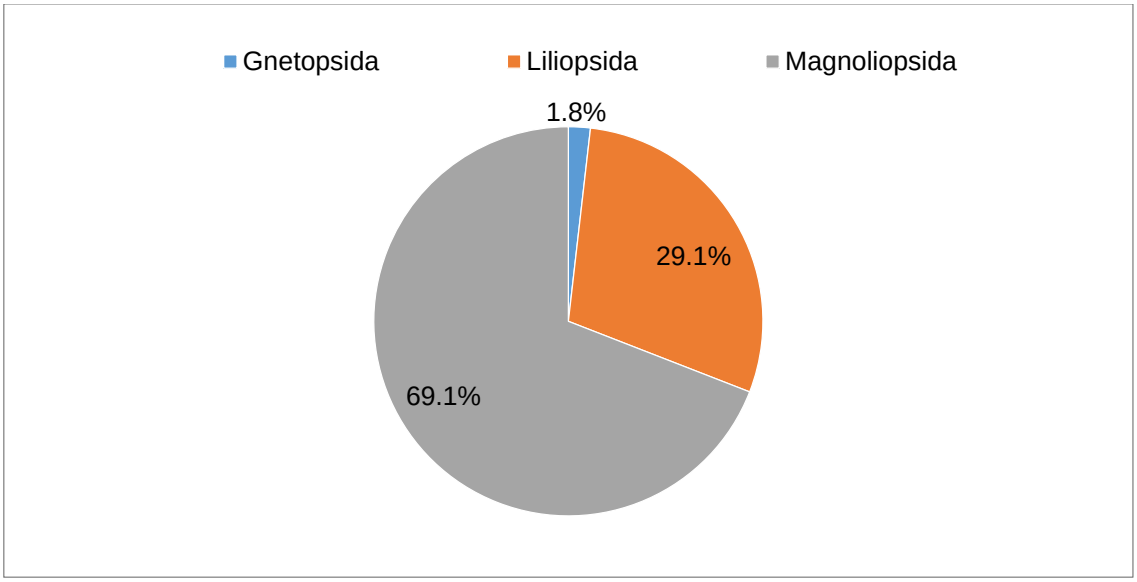


Figura 6.83. Porcentaje de especies por Clase registrado en el área de estudio

Las familias más diversas fueron Asteraceae con 14 especies en 9 géneros y Poaceae con 12 especies en 8 géneros (Figuras 6.84). En conjunto solo estas 2 familias agrupan el 47 % del total de especies, cerca de la mitad del total presentes en el área de estudio (Figuras 6.85), en general estas familias son las más frecuentes (diversas) en los Andes del Perú.

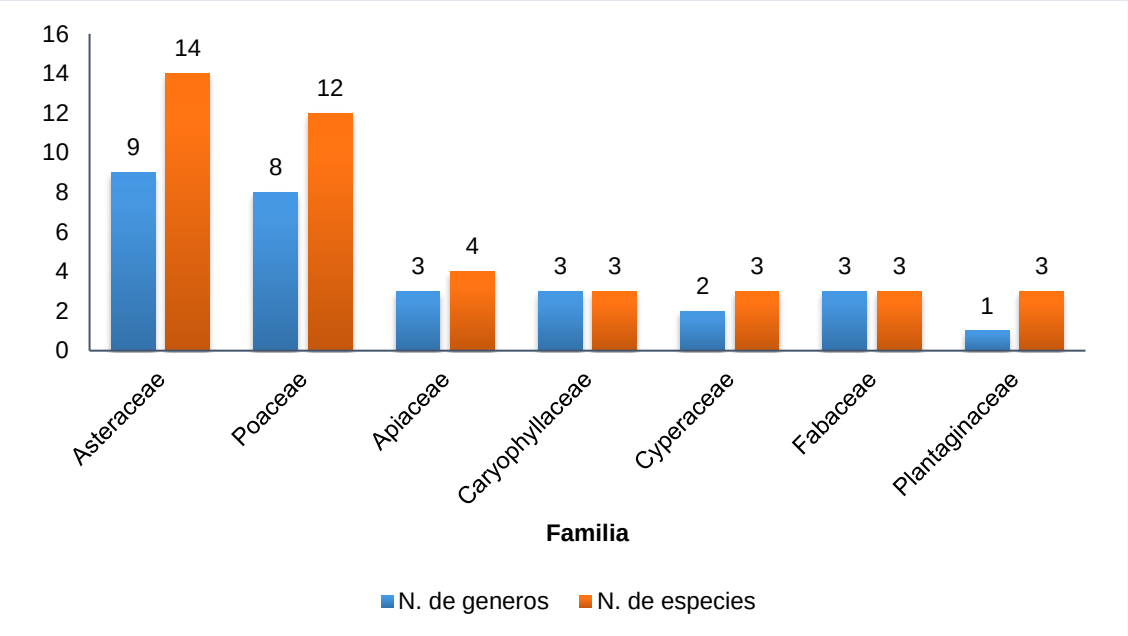


Figura 6.84. Familias más diversas, indicando número de géneros y especies, registradas en el área de estudio

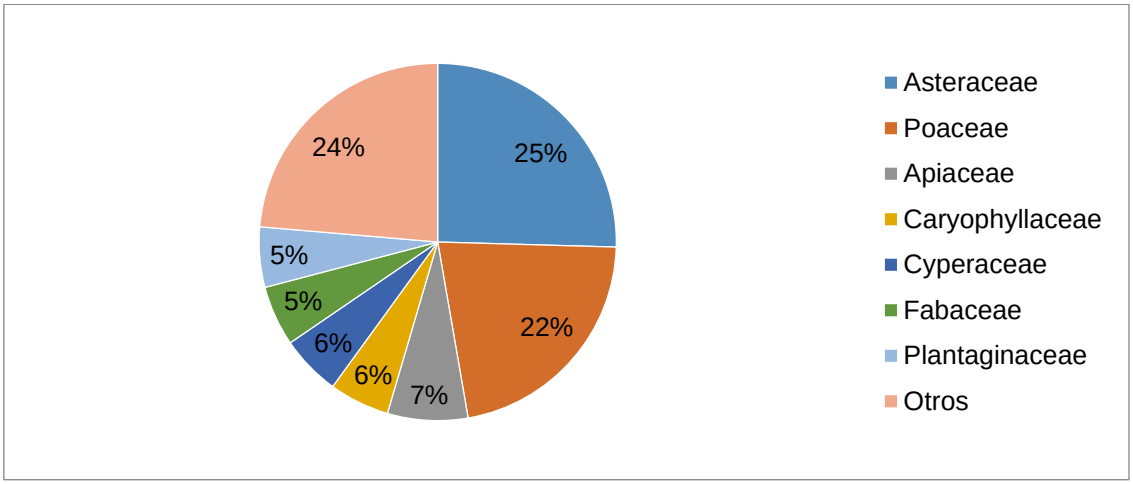


Figura 6.85. Familias con mayor porcentaje de especies, por encima del 5 % de especies registradas en el área de estudio

Los géneros con mayor número de especies fueron *Calamagrostis*, *Hypochaeris*, *Plantago* y *Werneria* con 3 especies cada uno (Figura 6.86).

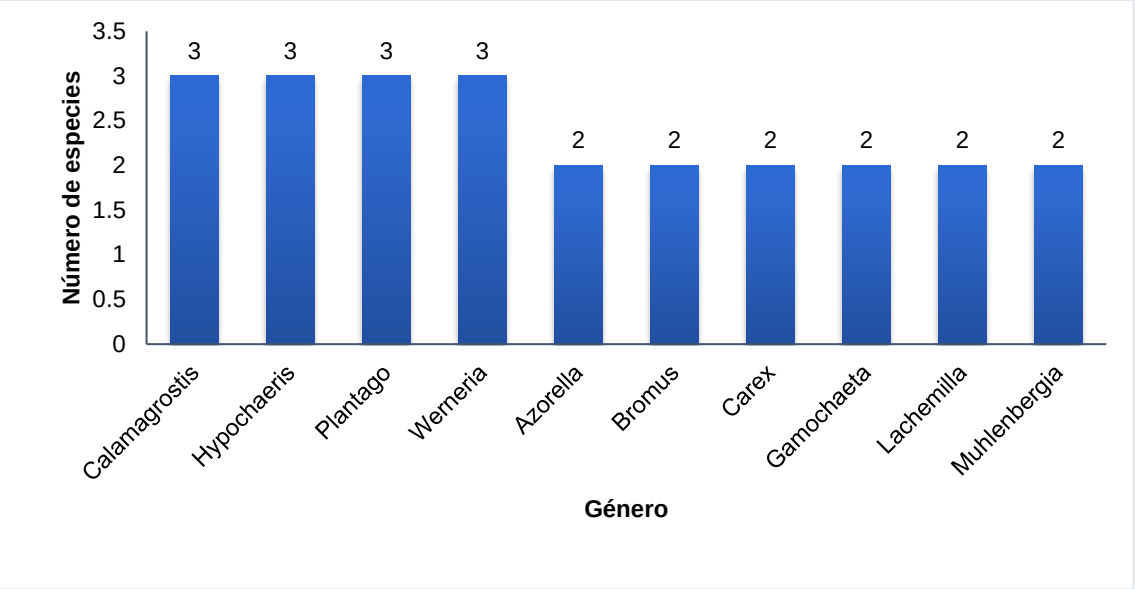


Figura 6.86. Géneros con mayor número de especies registradas en el área de estudio

Las especies con forma de crecimiento herbáceo fueron las más comunes en el área de estudio, con 49 especies que representa el 89,1 % del total de las especies, seguida de los arbustos con 3 especies (5,5 %). Mientras que, otras formas de crecimiento presentaron porcentajes individuales menores al 4 % del total de especies (Figura 6.87).

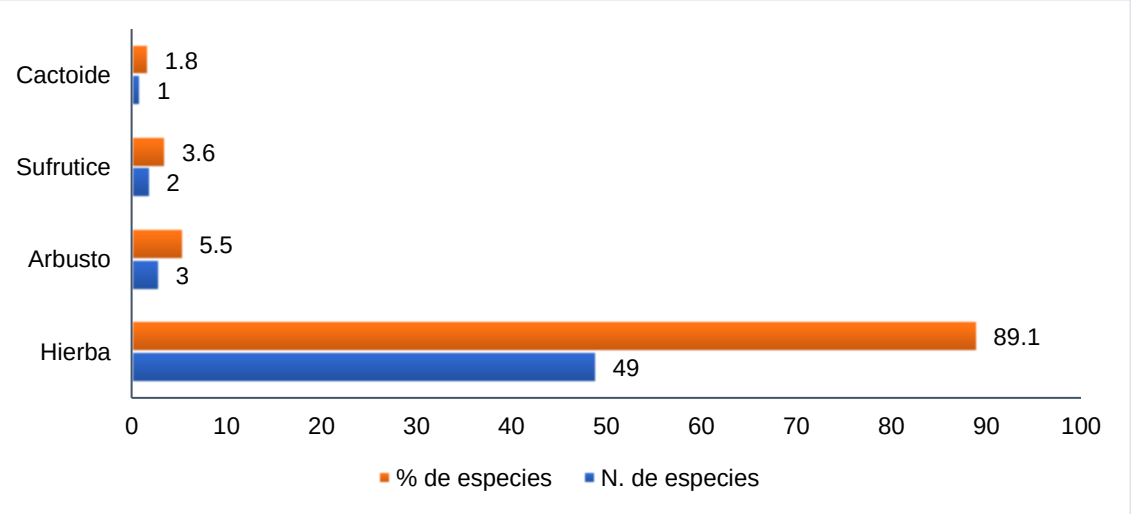


Figura 6.87. Formas de crecimiento de la flora vascular registrada en el área de estudio

En el área de estudio se evaluaron 6 API y 3 zonas control, de las cuales no se realizó la evaluación de riqueza de especies en el API 5 y Zona control 3 debido a que fueron áreas de revegetación con carga de ganado.

El número de especies por área de evaluación es variado siendo mayores en las Zona control 1 y 2, con 29 y 33 especies respectivamente. El menor registro de especies se dio en el API 2 con 13 especies (Figura 6.88).

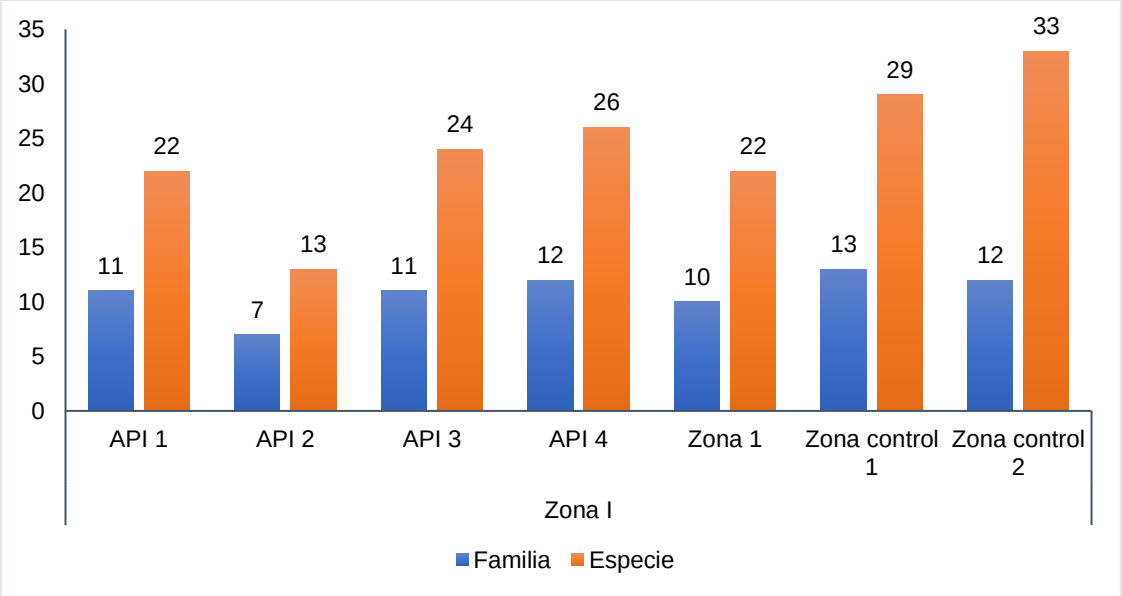


Figura 6.88. Número de especies y familias presentes en las formaciones vegetales en el área de estudio

6.5.1.2 Especies amenazadas y endémicas de flora silvestre

a. Especies amenazadas y casi amenazadas

De acuerdo a los criterios de amenaza de las listas de categorización nacional e internacional, se encontraron 3 especies de plantas vasculares (Tabla 6.86), que representa el 5,5 % del total registradas en el presente estudio.

De las 3 especies amenazadas y casi amenazadas, 2 se encuentran protegidas por la legislación peruana según la Categorización de Especies Amenazadas de Flora Silvestre, aprobada mediante Decreto Supremo N.° 043-2006-AG (Tabla 6.86), donde la especie *Ephedra rupestris* se encuentra en Peligro Crítico (CR) y la especie *Azorella diapensioides* se encuentra en categoría Vulnerable (VU).

Tabla 6.86. Especies categorizadas según legislación nacional y especies citadas en los apéndices de la CITES (2019), en el área de estudio

Familia	Especie	Forma de crecimiento	Decreto Supremo N.º 043-2006-AG	CITES (2019)
Apiaceae	*Azorella diapensioides*	Hierba	VU	---
Cactaceae	*Austrocylindropuntia floccosa*	Cactoide	---	Apéndice II
Ephedraceae	*Ephedra rupestris*	Arbusto	CR	---

---: especie no registrada en esta categoría
CR: Peligro Crítico; Vu: Vulnerable.

b. Especies CITES

Respecto a los apéndices de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) de 2019, se encontró una especie (*Austrocylindropuntia floccosa*) dentro del apéndice II perteneciente a la familia Cactaceae (Tabla 6.86).

c. Especies endémicas

Se registró una especie endémica según el «Libro Rojo de las Plantas Endémicas del Perú» (León *et al*., 2006), en el área de estudio. La especie *Gentianella cerrateae* es una planta cespitosa, conocida de pocas localidades en el norte del país, del sur de La Libertad al sur de Ancash. La especie endémica a detalle y su distribución departamental se muestra en la Tabla 6.87

Tabla 6.87. Especie endémica registrada en el área de estudio, según León *et al*. (2006)

Familia	Especie	Forma de crecimiento	Distribución departamental
Gentianaceae	*Gentianella cerrateae*	Hierba	AN, LL.

AN: Ancash; LL: La Libertad.

6.5.1.3 Análisis de tejido vegetal

Se tomaron muestras de tejido vegetal de 4 especies representativas de las zonas de estudio. Tanto en las áreas de potencial interés como en la de nivel de fondo (llamadas zona control). Las especies seleccionadas fueron *Plantago tubulosa, Festuca rigescens, Azorella diapensioides,* y *Dactilys glomerata*. Los resultados se muestran a continuación.

Metales totales

a) *Festuca rigescens*

Los resultados de la concentración de metales totales en el tejido de *Festuca rigescens*, muestra una concentración variada en los diferentes puntos de evaluación, siendo menor en la zona control en la mayoría de metales (Figura 6.89 y Figugura 6.90).

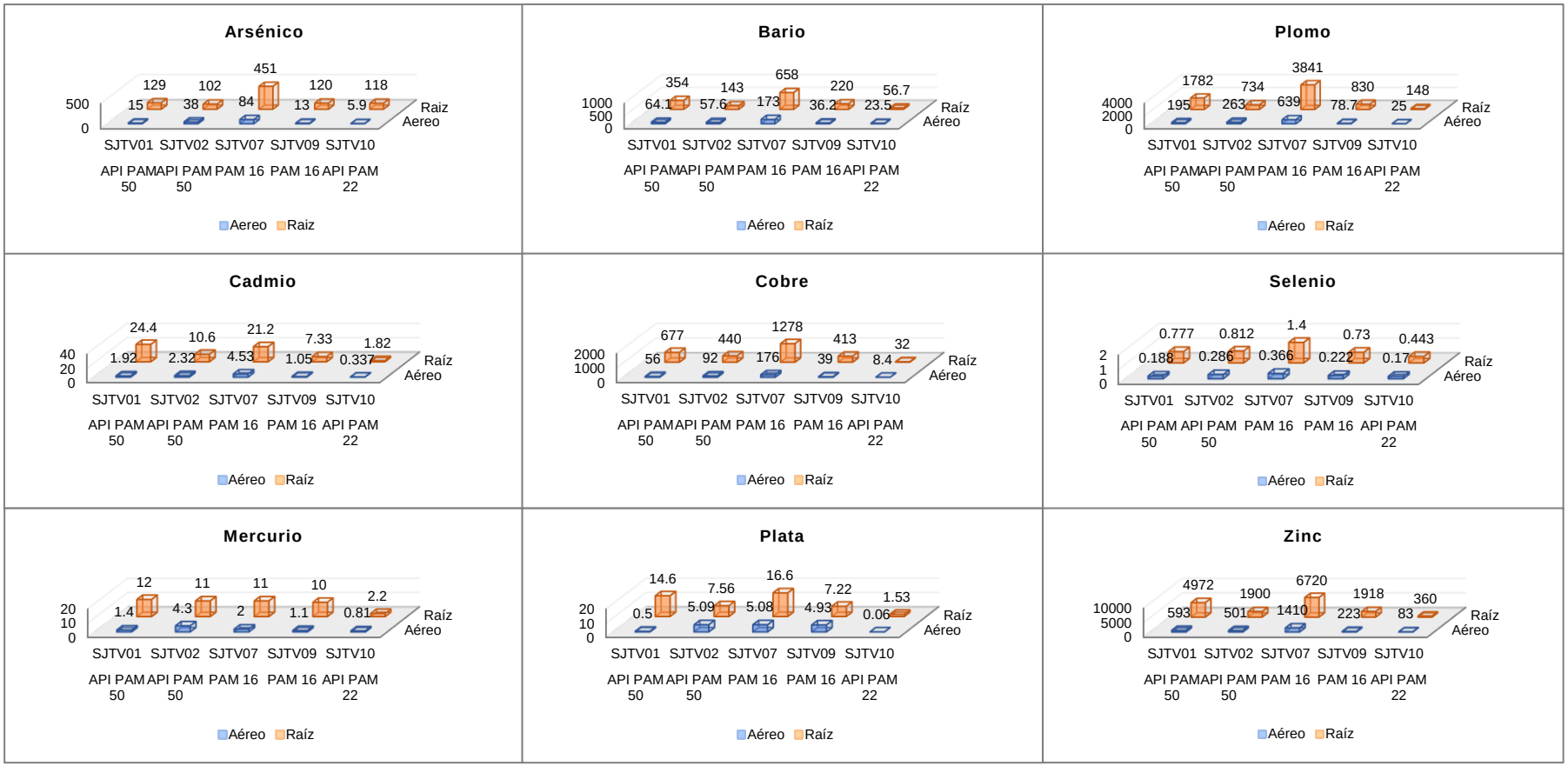


Figura 6.89. Concentración de metales (mg/kg) registrados en *Festuca rigescens*

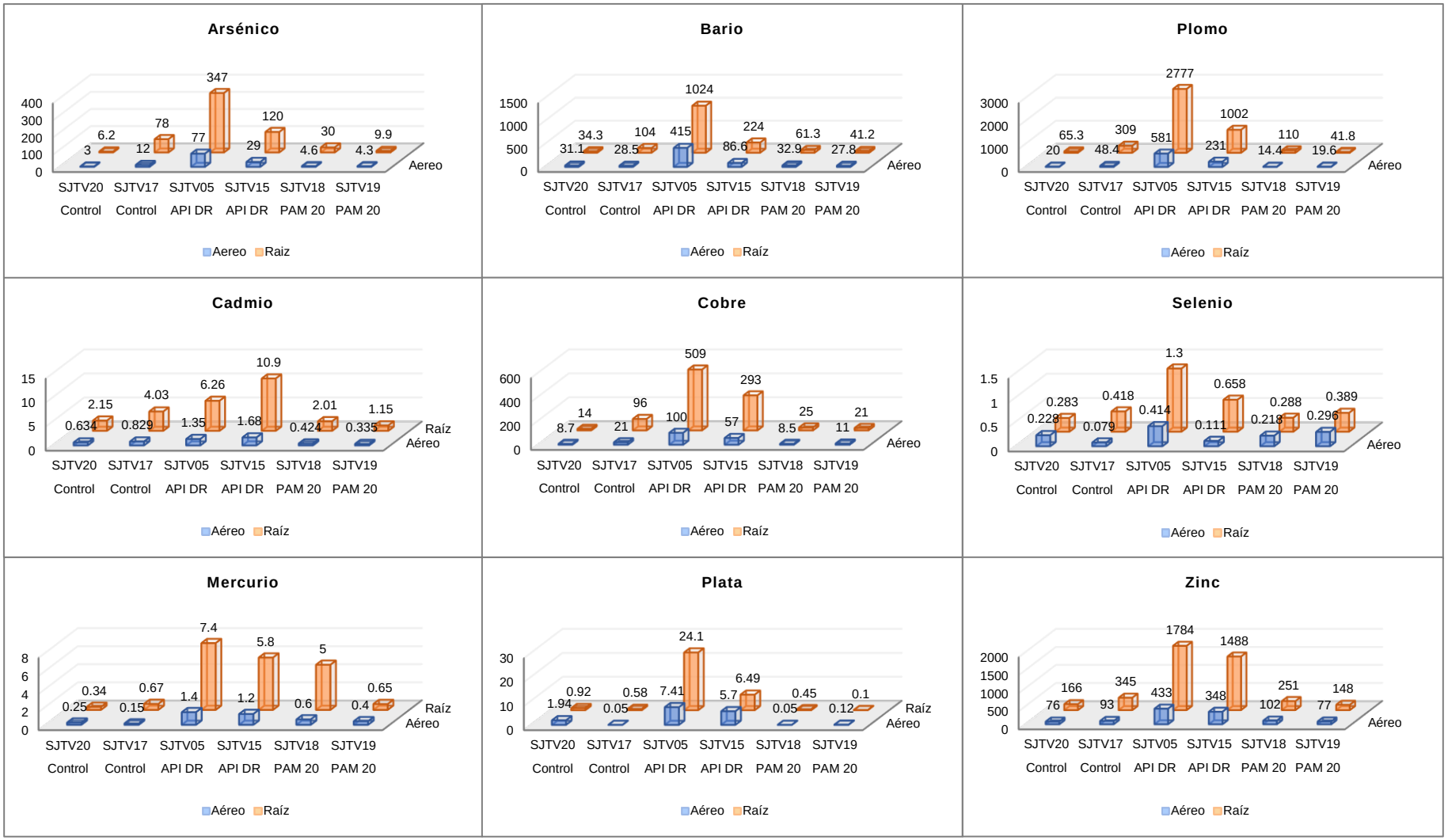


Figura 6.90. Concentración de metales (mg/kg) registrados en *Festuca rigescens*

b) *Azorella diapensioides*

Los resultados de la concentración de metales totales en el tejido de *Azorella diapensioides*, muestra una concentración variada en los diferentes puntos de evaluación, siendo claramente menor en la zona control, principalmente para los metales arsénico, cadmio, hierro, cobre y plomo (Figura 6.91).

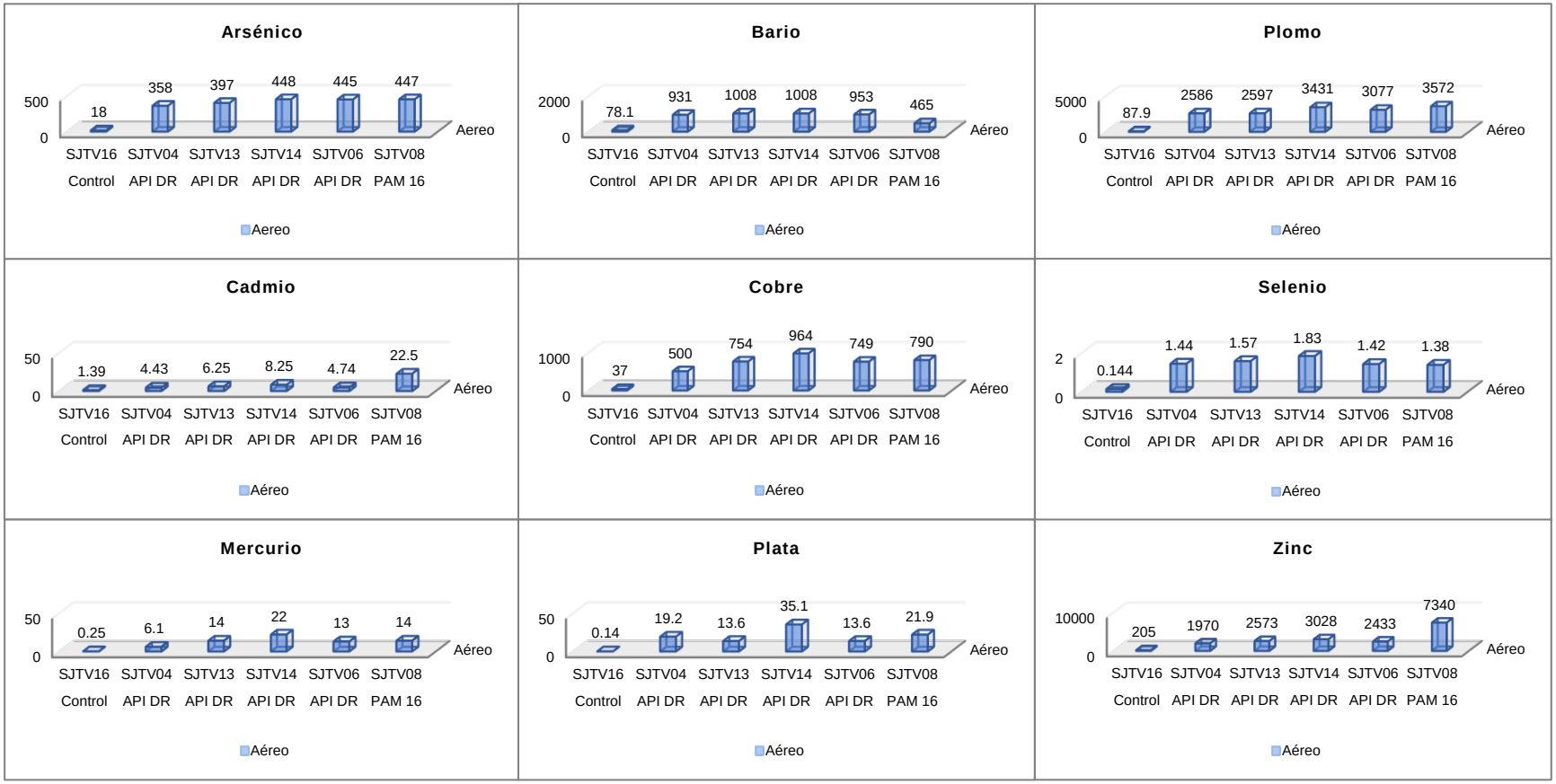


Figura 6.91. Concentración de metales (mg/kg) registrados en *Festuca rigescens*

c) *Plantago tubulosa*

Los resultados de la concentración de metales totales en el tejido de *Plantago tubulosa*, muestra una concentración variada en los diferentes puntos de evaluación, siendo menor en la zona control, principalmente para los metales arsénico, mercurio, plata y plomo (Figura 6.92).

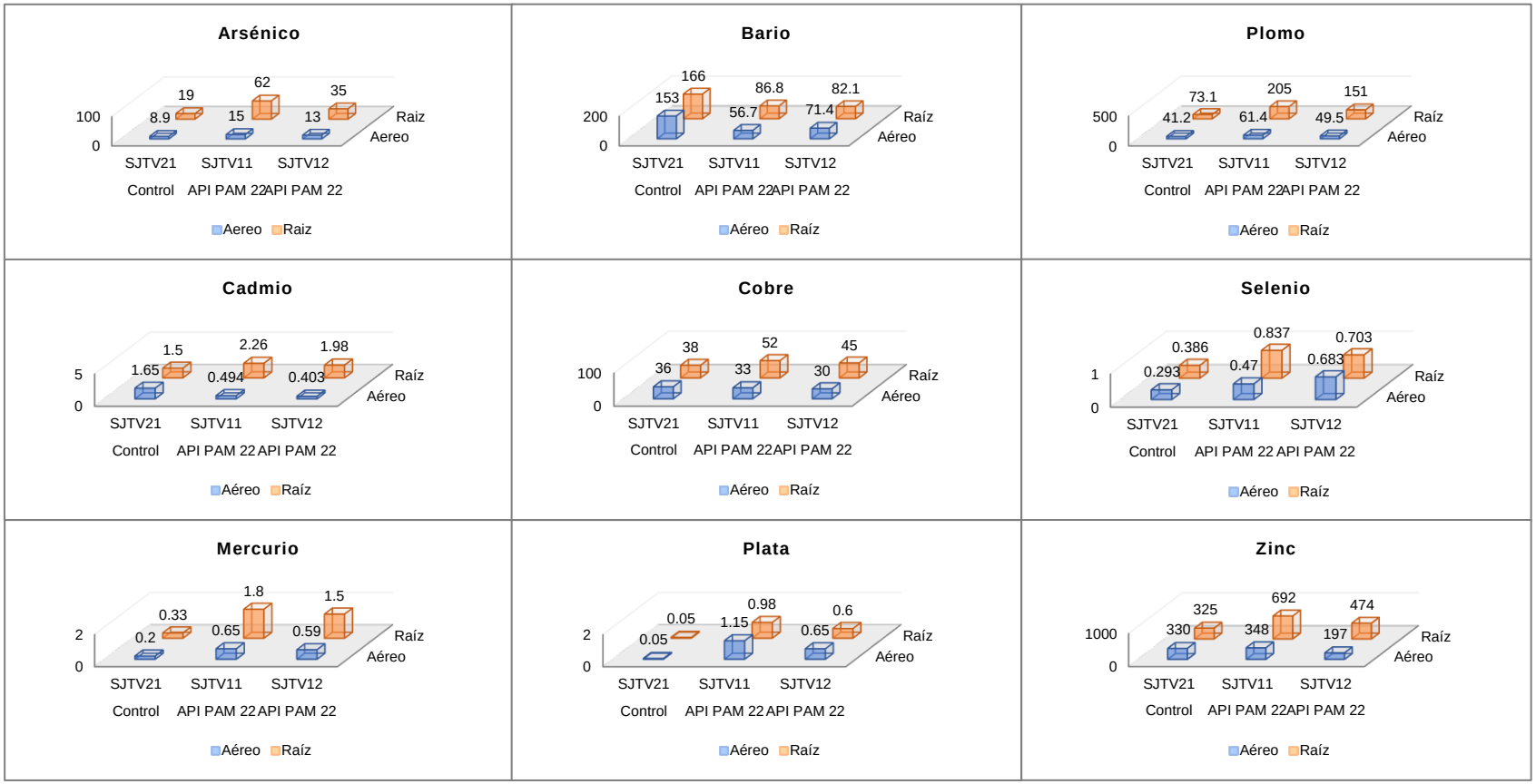


Figura 6.92. Concentración de metales (mg/kg) registrados en *Plantago tubulosa*

d) *Dactilys glomerata*

Los resultados de la concentración de metales totales en el tejido de *Dactilys glomerata*, muestra una concentración variada en los diferentes puntos de evaluación, siendo menor en la zona control, principalmente para los metales arsénico, mercurio, plata y plomo (Figura 6.93).

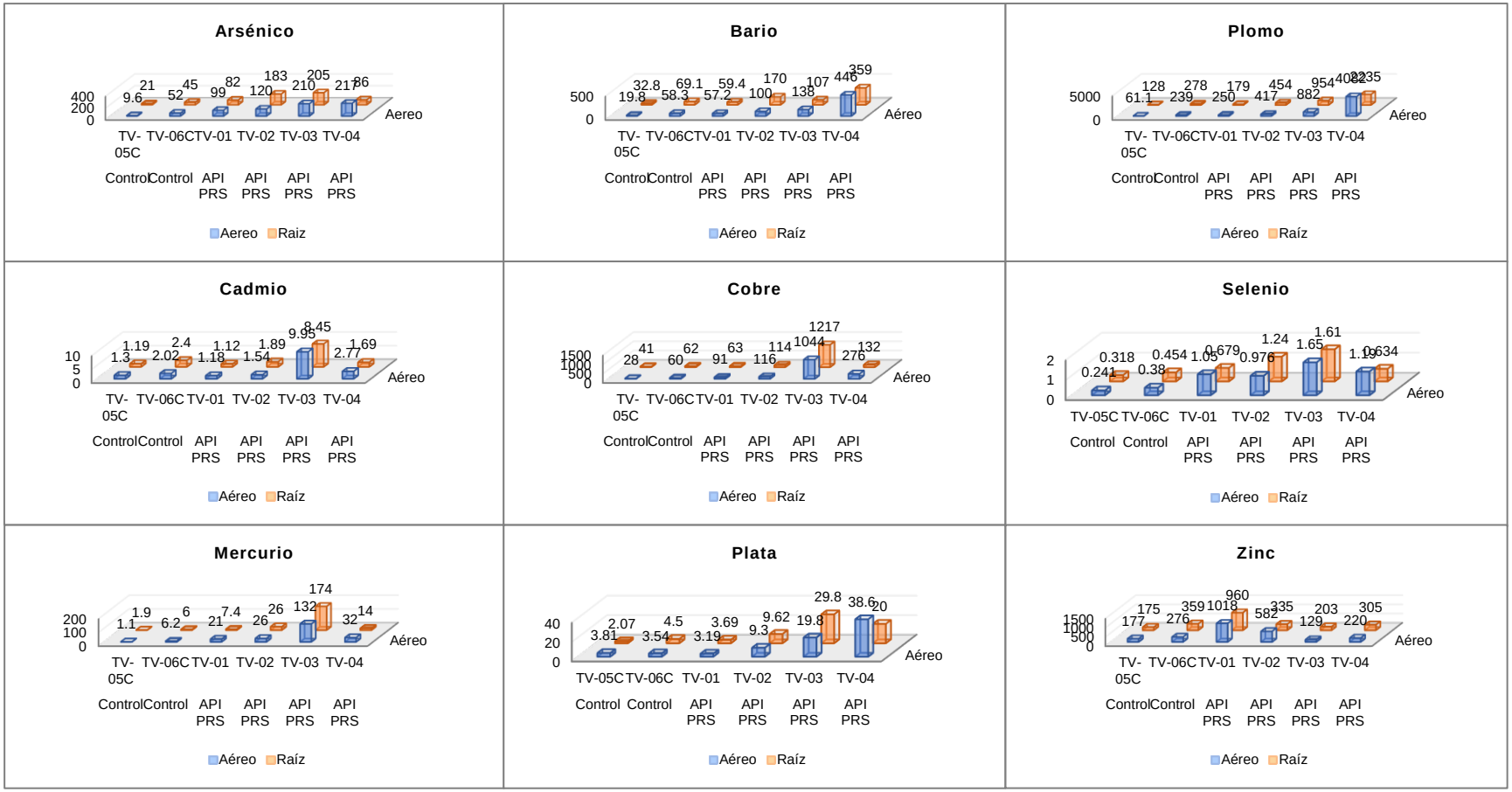


Figura 6.93. Concentración de metales (mg/kg) registrados en *Dactilys glomerata*

Comparación de metales en tejido vegetal con los valores establecidos en el Real Decreto 465/2003

Los resultados de concentración de metales fueron comparados referencialmente con valores de estudios mencionados en el ítem 5.5.7 Criterios de evaluación, donde se detalla el contenido máximo de los metales de arsénico, cadmio, mercurio y plomo establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal), de la norma española. Para esta comparación solo de consideró las concentraciones obtenidas en la parte aérea de la planta.

a. Metales totales en *Festuca rigescens*

Los resultados de metales totales en la parte aérea (hojas y tallo) de esta especie, superaron referencialmente el contenido máximo de los metales de arsénico, cadmio, mercurio y plomo estipulados en el Real Decreto 465/2003, en las API 3, API 4 y zona 1. Mientras que, en las API 1 y API 2, superaron solo el contenido máximo en arsénico y mercurio. En las zonas control 1 y 2, las muestras que solo superaron el contenido máximo en arsénico y mercurio fueron SJTV-20 y SJTV-17, y plomo en la muestra SJTV-17 de la zona control 2 (Tabla 6.88).

Tabla 6.88. Resultados de metales totales de la parte aérea de *Festuca rigescens* en las API 1, 2, 3 y 4, zona 1 y zonas control 1 y 2 del área de estudio

Parametro	Unidad	API 1		API 2	API 3		API 4		Zona 1		Control 1	Control 2	Real Decreto 465/2003 (1)
		SJTV18-A	SJTV19-A	SJTV10-A	SJTV01-A	SJTV02-A	SJTV05-A	SJTV15-A	SJTV07-A	SJTV09-A	SJTV20-A	SJTV17-A	Sustancias indeseables en la alimentación animal (mg/kg) (2)
Arsénico Total	mg/Kg	4,6	4,3	5,9	15	38	77	29	84	13	3	12	2
Cadmio Total	mg/Kg	0,424	0,335	0,337	1,92	2,32	1,35	1,68	4,53	1,05	0,634	0,829	1
Mercurio Total	mg/Kg	0,6	0,4	0,81	1,4	4,3	1,4	1,2	2	1,1	0,25	0,15	0,1
Plomo Total	mg/Kg	14,4	19,6	25	195	263	581	231	639	78,7	20	48,4	30
	Exceden los valores del Real Decreto 465/2003												

(1): Normativa del gobierno español aprobada con Real Decreto 465/2003, de 25 de abril de 2003, sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal, publicado en el Boletín Oficial del Estado n.° 102 del Ministerio de la Presidencia de España, de 29 de abril de 2003, referencia: BOE-A-2003-8717. Última modificación: 5 de marzo de 2011
(2): Contenido máximo en mg/kg en piensos, referido a un contenido de humedad del 12 %

b. Metales totales en *Dactilys glomerata*

Las concentraciones de metales totales en la parte aérea (hojas y tallo) de *Dactylis glomerata*, superaron referencialmente el contenido máximo de los metales de arsénico, cadmio, mercurio y plomo establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal), en el API 5 y su zona control (control 3), tal y como se detalla en la Tabla 6.89

Tabla 6.89. Resultados de metales totales de la parte aérea de *Dactylis glomerata* en el API 5 y zona control 3 del área de estudio

Parametro	Unidad	API 5				Control 3		Real Decreto 465/2003 (1)
		TV-01A	TV-02A	TV-03A	TV-04A	TV-05CA	TV-06CA	Sustancias indeseables en la alimentación animal (mg/kg) (2)
Arsénico Total	mg/Kg	99	120	210	217	9,6	52	2
Cadmio Total	mg/Kg	1,18	1,54	9,95	2,77	1,3	2,02	1
Mercurio Total	mg/Kg	21	26	132	32	1,1	6,2	0,1
Plomo Total	mg/Kg	250	417	882	4082	61,1	239	30
	Exceden los valores del Real Decreto 465/2003							

(1): Normativa del gobierno español aprobada con Real Decreto 465/2003, de 25 de abril de 2003, sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal, publicado en el Boletín Oficial del Estado n.° 102 del Ministerio de la Presidencia de España, de 29 de abril de 2003, referencia: BOE-A-2003-8717. Última modificación: 5 de marzo de 2011
(2): Contenido máximo en mg/kg en piensos, referido a un contenido de humedad del 12 %

c. Metales totales en *Plantago tubulosa*

Los resultados de metales totales en la parte aérea (hojas y tallo) de *Plantago tubulosa*, solo superaron referencialmente el contenido máximo de los metales de arsénico, mercurio y plomo estipulados en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal), en los 2 puntos evaluados en el API 2; mientras que, en la zona control 1 se superó el contenido máximo en los 4 metales, tal y como se detalla en la Tabla 6.90.

Tabla 6.90. Resultados de metales totales de la parte aérea de *Plantago tubulosa* en el API 2 y zona control 1 del área de estudio

Zona de muestreo	API 2		Control 1	Real Decreto 465/2003 (1)
Código	SJTV11-A	SJTV12-A	SJTV21-A	Sustancias indeseables en la alimentación animal (mg/kg) (2)
Arsénico Total	15	13	8,9	2
Cadmio Total	0,494	0,403	1,65	1
Mercurio Total	0,65	0,59	0,2	0,1
Plomo Total	61,4	49,5	41,2	30
	Exceden los valores del Real Decreto 465/2003			

(1): Normativa del gobierno español aprobada con Real Decreto 465/2003, de 25 de abril de 2003, sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal, publicado en el Boletín Oficial del Estado n.° 102 del Ministerio de la Presidencia de España, de 29 de abril de 2003, referencia: BOE-A-2003-8717. Última modificación: 5 de marzo de 2011
(2): Contenido máximo en mg/kg en piensos, referido a un contenido de humedad del 12 %

d. Metales totales en *Azorella diapensioides*

Las concentraciones de metales totales en la parte aérea (ramas y hojas) de *Azorella diapensioides*, superaron referencialmente el contenido máximo de los metales de arsénico, cadmio, mercurio y plomo establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal), en los 4 puntos evaluados en el API 4, en un punto de la zona 1 y en un punto de su zona control (control 2), tal y como se detalla en la Tabla 6.91.

Tabla 6.91. Resultados de metales totales parte la parte aérea de *Azorella diapensioides* en el API 4, zona 1 y zona control 2 del área de estudio

Zona de muestreo	API 4				Zona 1	Control 2	Real Decreto 465/2003 (1)
Código	SJTV04	SJTV13	SJTV14	SJTV06	SJTV08	SJTV16	Sustancias indeseables en la alimentación animal (mg/kg) (2)
Arsénico Total	358	397	448	445	447	18	2
Cadmio Total	4,43	6,25	8,25	4,74	22,5	1,39	1
Mercurio Total	6,1	14	22	13	14	0,25	0,1
Plomo Total	2586	2597	3431	3077	3572	87,9	30
	Exceden los valores del Real Decreto 465/2003						

(1): Normativa del gobierno español aprobada con Real Decreto 465/2003, de 25 de abril de 2003, sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal, publicado en el Boletín Oficial del Estado n.° 102 del Ministerio de la Presidencia de España, de 29 de abril de 2003, referencia: BOE-A-2003-8717. Última modificación: 5 de marzo de 2011
(2): Contenido máximo en mg/kg en piensos, referido a un contenido de humedad del 12 %

6.5.2 Fauna silvestre

a. Composición de las especies de anfibios y reptiles

En las evaluaciones realizadas en la cuenca del rio San Juan se registraron 2 especies de anfibios (Clase Amphibia) que pertenecen al orden Anura y se distribuyen en las familias Bufonidae y Leptodactylidae, cada una con una especie (Tabla 6.92). No se registró ningún reptil (Clase Reptilia).

Tabla 6.92. Especies de anfibios y reptiles registrados en el área de estudio

Clase	Orden	Familia	Especie	Nombre en español*
Amphibia	Anura	Bufonidae	*Rhinella spinulosa*	Sapo verrugoso
		Leptodactylidae	*Pleurodema marmoratum*	Sapo de cuatro ojos marmóreo

*: Traducido al español de Frost (2020)

En el área de estudio, la abundancia de anfibios fue baja, se registraron en total 13 individuos, la mayor parte hallados en el ámbito del delta Upamayo.

La rana *Pleurodema marmoratum* fue la especie más abundante, se registraron 8 individuos entre adultos, subadultos y juveniles. La otra especie *Rhinella spinulosa*, presentó menor abundancia con 5 individuos registrados, 2 adultos y 3 juveniles. No se registraron anfibios en etapas larvarias. Todos los individuos fueron hallados asociados a hábitats acuáticos, en el cauce y orillas del río San Juan.

b. Esfuerzo de muestreo

En el área de estudio se evaluaron 30 transectos, acumulando un esfuerzo de muestreo total de 22 horas-hombre, realizadas mayormente por un solo evaluador. La curva de acumulación se estabiliza en una asíntota, a partir del transecto 25, logrando alcanzar una cobertura de muestreo del 100% (Figura 6.94), que indica una buena representatividad del muestreo realizado.

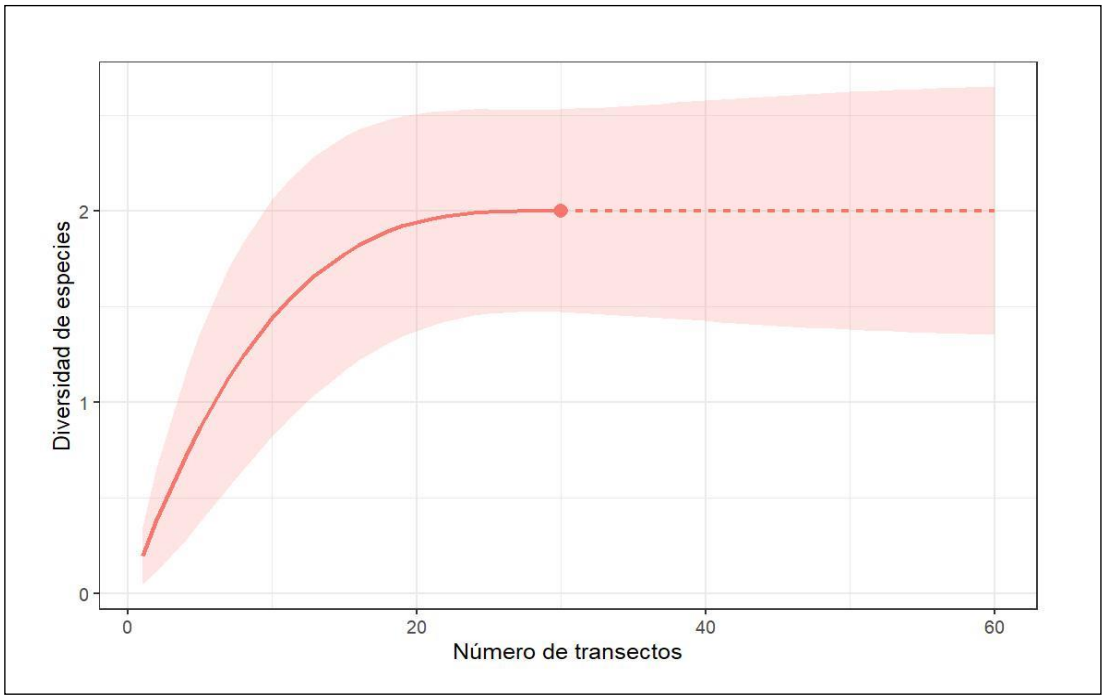


Figura 6.94. Curva de acumulación de especies en el área de estudio

c. Diversidad de anfibios

El área de estudio presentó una baja diversidad de anfibios, se registraron solo 2 especies. Siendo la zona más diversa el tramo del río San Juan comprendido entre el delta Upamayo y el centro poblado Huayrabamba, transectos AM-He-T15, AM-He-T16 y AM-He-T18. Se obtuvo un registro de *Rhinella spinulosa* en la quebrada sin nombre QSnom-02 proveniente de la laguna Quiulacocha. No se registraron especies de anfibios en otros puntos de evaluación.

Se obtuvo un valor de diversidad de 2 especies efectivas para los 3 órdenes de los números de Hill, presentando poca variabilidad entre ellos (Figura 6.95). Siendo el valor de riqueza ${}_0D$ igual a 2 (1,50 - 2,50), el de Shannon ${}_1D$ que está influenciado por las especies abundantes igual a 2 (1,48 – 2,52) y el de Simpson (${}_2D$) influenciado por las especies dominantes igual a 2 (1,44 – 2,56). Entre paréntesis se indicaron los valores de intervalos de confianza al 95 %.

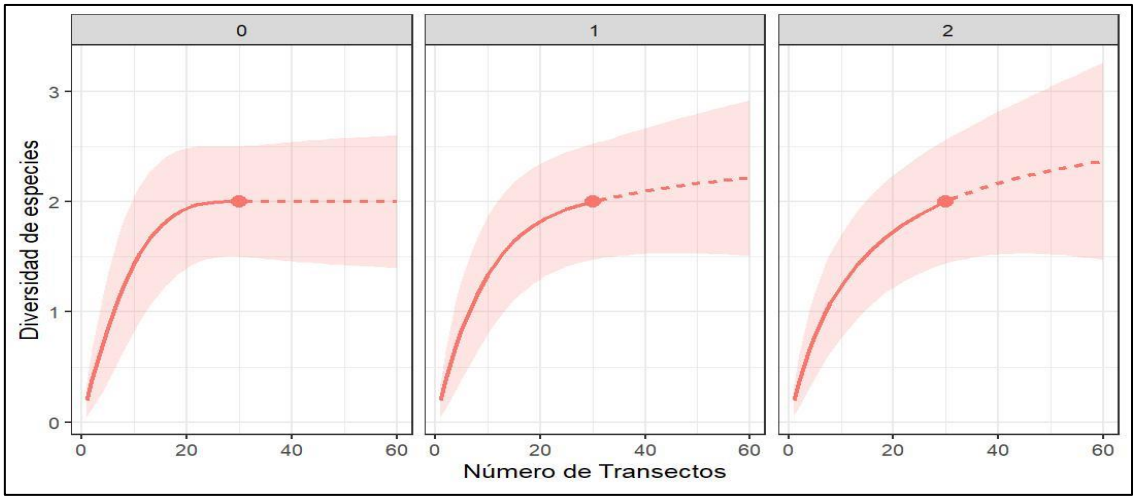


Figura 6.95. Diversidad de anfibios (números de Hill, q = 0, 1 y 2) en el área de estudio
Las líneas continuas representan los valores interpolados, las discontinuas los valores extrapolados y las zonas sombreadas los valores de los intervalos de confianza al 95 %

d. Especies amenazadas, endémicas e importancia científica

De acuerdo con la categorización de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés) de 2020, y a la actualización de la lista de clasificación y categorización de las especies amenazadas de fauna silvestre legalmente protegidas mediante Decreto Supremo N.° 004-2014-MINAGRI; no se registró ninguna especie en alguna categoría de amenaza.

Durante la evaluación, en el área de estudio, no se registraron individuos de las especies *Telmatobius macrostomus* «Rana gigante de Junín» y *Telmatobius brachydactylus* «Wancha de Junín» consideradas como especies En Peligro (EN) por el estado peruano y la IUCN. Sin embargo, personas de la localidad que se acercaron a hacer consultas a los especialistas del OEFA durante la evaluación, indicaron que estas especies suelen estar presentes en al menos 3 puntos de muestreo ubicados en el río Huarampampa (AM-He-T30), desembocadura del río Quicay RQuic-1 (AM-He-T8) y quebrada ubicada al sur de la laguna Alcacocha LAlca-02 (AM-He-T27).

e. Determinación de la contaminación de metales pesados en anfibios

Se registraron anfibios en 4 transectos de los 30 evaluados, donde la especie *Pleurodema marmoratum* fue colectada en 3 localidades y *Rhinella spinulosa* en 2. Se obtuvieron en total 5 muestras para la determinación de metales en anfibios, cuyas localidades de colecta se detallan en la Tabla 6.93.

Tabla 6.93. Número de muestras colectadas por especie y localidad en el área de estudio

Localidad	Código de transectos	Código de sedimentos y agua superficial	Especie	Número de muestras
PAM Delta Upamayo	AM-He-T15	SJ-35	*P. marmoratum*	1
	AM-He-T16	RSjua-20A	*P. marmoratum*	1
			R. spinulosa	1
Centro poblado Huayrabamba	AM-He-T18	RSjua-16	*R. spinulosa*	1
Quebrada sin nombre	AM-He-T7	QSnom-02	*R. spinulosa*	1

* *Canadian Environmental Quality Guidelines* (CEQG-SQG)
«---»: No existe valor en el estándar de la Guía de calidad ambiental canadiense- CEQG / No se evaluó se parámetro

7.93375 (5.653 - 12.698)

En todas las muestras de anfibios se cuantificaron 30 metales y metaloides, así como cianuro. Sin embargo, solo 16 se incluyeron en los análisis (Tabla 6.94). Para elegir estos elementos se consideraron aquellos que, según estudios previos, pueden tener efectos negativos en los anfibios, también se incluyeron los metales contemplados en la guía canadiense de sedimento, y finalmente se incluyeron los metales que fueron detectados tanto en anfibios y como en sedimentos.

En las 5 muestras, la mayoría de los 16 metales y metaloides escogidos fueron detectados, excepto el vanadio (V) y níquel (Ni) que no alcanzaron el límite de cuantificación en la muestra del transecto AM-He-T7 y en la muestra del transecto AM-He-T18; mayor detalle en el Anexo 2.2.

Concentración de metales y cianuro en anfibios

En todas las muestras juntas de anfibios se obtuvo que el hierro (Fe), zinc (Zn) y aluminio (Al) fueron los que en promedio presentaron mayor concentración, y el resto de los metales tuvieron concentraciones menores a 50 mg/kg (Tabla 6.94 y Figura 6.97). El orden relativo de concentración es el siguiente: Fe > Zn > Al > Mn > Cu > Sr > Pb > Ba > As > Se > Cd > Hg > V > Cr > Ni > Li.

En las muestras de sedimento, donde fueron colectados los anfibios, además del Fe, Al y Zn destacaron las concentraciones del plomo (Pb) y manganeso (Mn), siendo el orden relativo de concentración el siguiente: Fe > Zn > Al > Pb > Mn > Cu > As > Ba > Sr > V > Cd > Cr > Li > Ni > Hg > Se (Tabla 6.94).

Según los análisis de laboratorio, también se detectó cianuro en el tejido de anfibios, con un promedio de 7,934 CN/kg (Tabla 6.94).

Tabla 6.94. Promedios de la concentración de metales, metaloides y cianuro en tejido de anfibios y sedimentos

Parámetro	Tejido de anfibios (mg/kg) (n = 5)	Sedimentos (mg/kg) (n = 4)	CEQG-SQG*	
			ISQG	PEL
Metales (mg/kg)				
Al	62,6876 ± 65,946	9852,75 ± 2682,1	---	---
As	2,49546 ± 2,334	294,925 ± 334,49	5,9	17
Ba	8,1002 ± 3,896	292,65 ± 147,087	---	---
Cd	0,36928 ± 0,27	18,834 ± 21,026	0,6	3,5
Cr	0,22854 ± 0,101	10,478 ± 5,579	---	---
Cu	15,4178 ± 9,302	1337 ± 1949,285	---	---
Fe	202,938 ± 142,163	56533,25 ± 55953,031	---	---
Hg	0,2913 ± 0,108	7,053 ± 8,042	0,17	0,486
Li	0,09618 ± 0,077	8,536 ± 6,469	---	---
Mn	23,54858 ± 20,13	3150,75 ± 2821,918	---	---
Ni	0,18552 ± 0,251	10,645 ± 5,644	---	---
Pb	9,44586 ± 9,43	2494,95 ± 3987,703	35	91,3
Se	0,47278 ± 0,161	1,539 ± 0,372	---	---
Sr	10,8829 ± 6,038	160,198 ± 96,404	---	---
V	0,23148 ± 0,175	71,5 ± 61,398	---	---
Zn	101,814 ± 63,575	9494,5 ± 12679,828	123	315
Cianuro (mg CN/kg)				

Cianuro	7,934 (5,653 – 12,698)	---	---	---

* *Canadian Environmental Quality Guidelines* (CEQG-SQG)
«---»: No existe valor en el estándar de la Guía de calidad ambiental canadiense- CEQG / No se evaluó se parámetro

Concentración de metales y cianuro por especies de anfibios

Al hacer la comparación a nivel de especie de anfibios, el patrón de acumulación para los metales de mayor concentración (aluminio, hierro, plomo, manganeso y zinc) se mantienen, pero varía para los elementos que tienen una concentración menor a 15 mg/kg. El patrón de concentración de metales de las especies evaluadas es:

P. marmoratum: Fe > Zn > Al > Mn > Cu > Sr > Pb > Ba > As > Cd > Se > V > Hg > Cr > Li > Ni
R. spinulosa: Fe > Zn > Al > Mn > Cu > Sr > Ba > Pb > As > Ni > Se > Hg > Cd > Cr > V > Li

Si bien no se pudo hacer un análisis estadístico debido al bajo número de muestras, se observó que la rana *P. marmoratum* acumuló mayores concentraciones para la mayoría de los metales analizados, con una variación porcentual entre 23,16 % y 439,50 % (Tabla 6.95). Solo el níquel y el cromo tuvieron mayor concentración en *R. spinulosa* (Tabla 6.97)

Para esta comparación se consideraron solo las muestras colectadas en el río San Juan, que es la localidad donde se registraron ambas especies.

Tabla 6.95. Concentración de metales, metaloides y cianuro por especie y su diferencia porcentual

Parámetro	Especies*		Diferencia porcentual *P. marmoratum* vs. *R Spinulosa*
	R. spinulosa n = 2	*P. marmoratum* n = 2	
Metales (mg/kg)			
Al	28,93 ± 27,43	127,16 ± 47,72	439,50 %
As	2,18 ± 2,51	3,92 ± 2,52	179,5 %
Ba	9,33 ± 0,34	10,27 ± 1,32	110,1 %
Cd	0,26 ± 0,22	0,62 ± 0,15	236,21 %
Cr	0,25 ± 0,18	0,23 ± 0,05	90,42 %
Cu	13,68 ± 6,78	18,01 ± 16,67	131,57 %
Fe	144,83 ± 132,19	325,75 ± 98,5	224,93 %
Hg	0,28 ± 0,11	0,33 ± 0,17	114,66 %
Li	0,06 ± 0,02	0,16 ± 0,09	287,25 %
Mn	20,47 ± 24,55	38,14 ± 6,63	186,27 %
Ni	0,35 ± 0,4	0,08 ± 0,01	23,16 %
Pb	8,98 ± 7,95	14,62 ± 12,25	162,88 %
Se	0,33 ± 0,08	0,6 ± 0,14	184,01 %
Sr	11,47 ± 2,33	15,31 ± 0,42	133,42 %
V	0,15 ± 0,12	0,4 ± 0,1	267,75 %
Zn	90,41 ± 29,41	158,4 ± 21,78	175,21 %
Cianuro (mg CN/kg)			
Cianuro	5,679 ± 3,131	8,630 ± 5,754	151,96 %

* Se indican los promedios y la desviacin estándar

Concentración de metales y cianuro por localidad

Considerando las localidades de evaluación, se compararon los resultados de las muestras colectadas en el ámbito del delta Upamayo (AM-He-T15 y AM-He-T16), centro poblado Huayrabamba ubicado a 4 km aguas arriba del delta (AM-He-T18) y la quebrada sin nombre QSnom-02 (AM-He-T7), que mostraron una agrupación en el análisis de componentes

principales (Figura 6.91). Los anfibios del PAM Delta Upamayo acumulan una mayor concentración de todos los metales, siendo esto entre 50,72 % y 1220,57 % respecto al punto que se encuentra 4 km río arriba, y entre 96,8 % y 34 544,5 % mayores que la concentración registrada en la quebrada sin nombre QSnom-02 (Figura 6.96). Similar ocurrió con el cianuro cuya concentración fue mayor en las muestras del delta Upamayo (Tabla 6.96)

Tabla 6.96. Concentraciones de metales, metaloides y cianuro por localidad y su diferencia porcentual

Parámetro	Localidades			Diferencia porcentual	
	Delta Upamayo[A] RJ-30 y RSJua 20A	Huaruampampa SJ-33[B]	Quebrada QSnom-02[C]	A vs. B	A vs. C
Metales (mg/kg)					
Al	100,883	9,536	1,252	1057,92 %	8057,75 %
As	3,93	0,4067	0,2806	966,31 %	1400,57 %
Ba	10,04	9,092	1,29	110,43 %	778,29 %
Cd	0,55	0,1054	0,0924	521,82 %	595,24 %
Cr	0,195	0,3845	0,1725	50,72 %	113,04 %
Cu	18,163	8,889	13,71	204,33 %	132,48 %
Fe	296,6	51,35	73,54	577,6 %	403,32 %
Hg	0,285	0,3626	0,2379	78,6 %	119,8 %
Li	0,13	0,0458	0,0437	283,84 %	297,48 %
Mn	38,033	3,116	0,5269	1220,57 %	7218,26 %
Ni	0,265	0,0656	0,0656	403,96 %	403,96 %
Pb	14,612	3,35	0,0423	436,18 %	34543,74 %
Se	0,491	0,3818	0,5079	128,6 %	96,67 %
Sr	13,477	13,12	0,8625	102,72 %	1562,55 %
V	0,345	0,0615	0,0615	560,98 %	560,98 %
Zn	142,667	69,61	11,46	204,95 %	1244,91 %
Cianuro (mg CN/kg)					
Cianuro	8,694	5,653	2,562	153,79 %	339,34 %

El análisis de componentes principales (ACP), se realizó considerando los 14 metales (Tabla 6.91) evaluados en las localidades donde se hicieron capturas de anfibios (AM-He-T7, AM-He-T15, AM-He-T16 y AM-He-T18). El ACP muestra que el 79.1% de la variación de los datos es explicada por los dos primeros componentes (componente 1 el 51,5 % y componente 2 el 27.6 %). Los metales zinc, cadmio, manganeso, vanadio y arsénico, son las variables que tienen mayor contribución al primer componente estando positivamente correlacionados, solo el cromo que tiene la menor contribución tiene una correlación negativa. En el segundo componente, el cobre, níquel, plomo y arsénico aportan la mayor contribución al modelo con una correlación positiva; por el contrario, el aluminio, litio, selenio y mercurio presentan una correlación negativa y tienen la contribución.

Los puntos se distribuyen en al menos 3 grupos (Figura 6.96), el primero conformado por AM-He-T7 y AM-He-T18, el segundo por AM-He-T16A y AM-He-T16B y AM-He-T15.

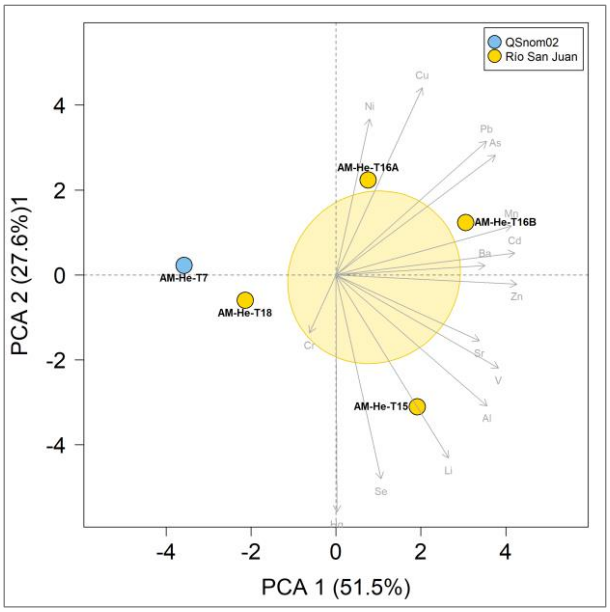


Figura 6.96. Análisis de componentes principales (CP) con concentraciones de metales en los tejidos de anfibios registrados en el área de estudio

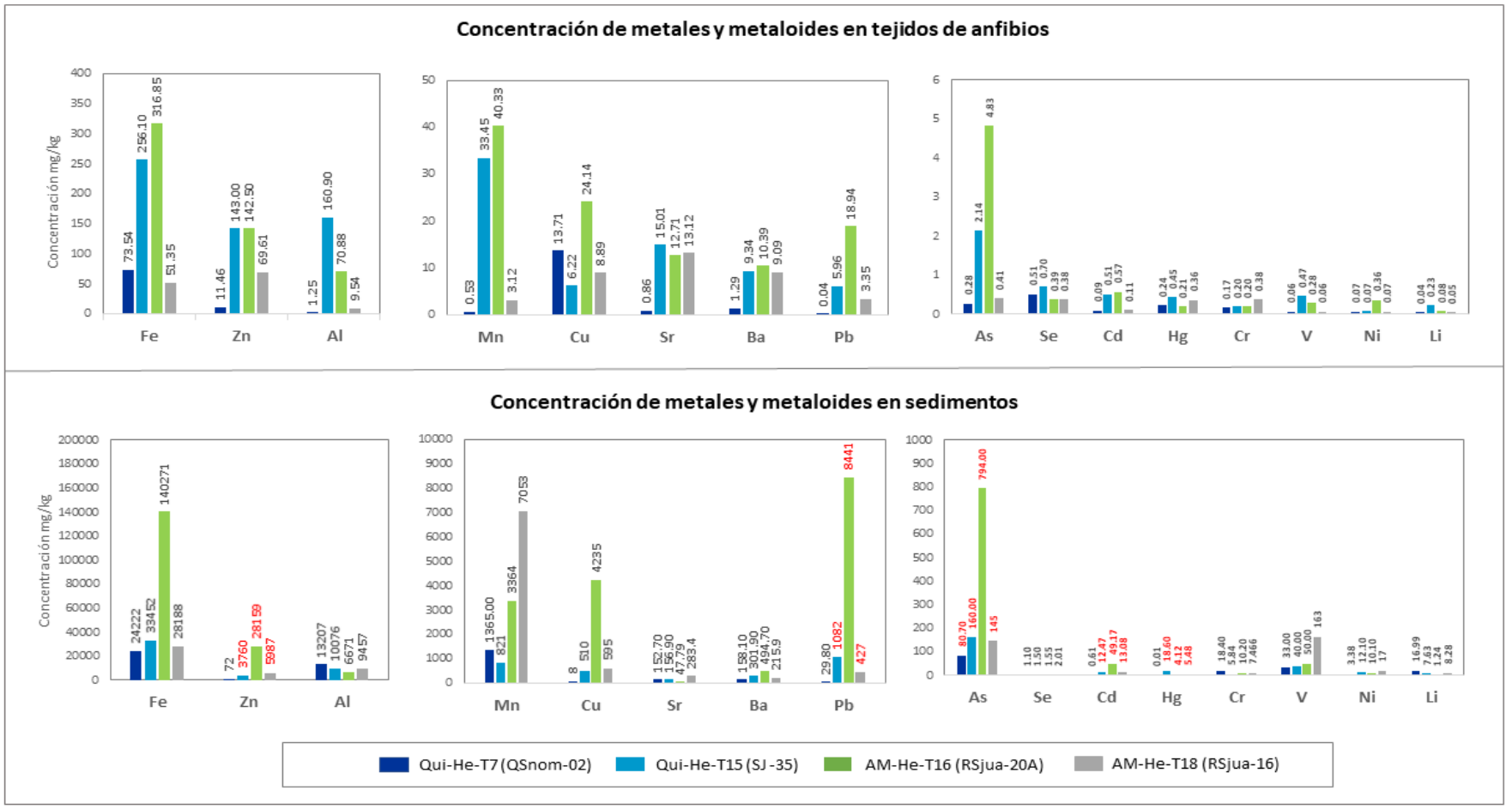


Figura 6.97. Concentración de metales y metaloides en anfibios y sedimento en el área de estudio
Los valores en color rojo indican los metales que superan los valores PEL de la guía canadiense de sedimento. El valor de AM-He-T16 corresponde al promedio de las muestras AM-He-T16 A y AM-He-T16 B

Relación de la concentración de metales en tejido de anfibios y sedimento

Para determinar si existe una relación entre la concentración de metales pesados detectados en el sedimento y tejido de anfibios, se hizo una correlación bivariada para cada uno de los metales. En efecto, muchos de los metales analizados en tejido de anfibios y sedimento, tienen correlación positiva con valores del coeficiente de Pearson que varían desde -0,32 hasta 0,95; sin embargo, solo el arsénico, bario y plomo presentaron correlaciones significativas ($p > 0,05$).

Tabla 6.97. Relación entre la concentración de metales detectados en tejido de anfibios y sedimento

Parámetros	Metales (mg/kg)															
	Al	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Li	Mn	Ni	Pb	Se	Sr	V	Zn
Coeficiente Correlación Spearman *r*	-0,32	0,95	0,95	0,63	-0,32	0,74	0,63	0,32	-0,32	0,74	0,32	0,95	-0,74	-0,21	0,32	0,63
Significancia *p*	0,68	0,05	0,05	0,37	0,68	0,26	0,37	0,68	0,68	0,26	0,68	0,05	0,26	0,79	0,68	0,37

Factor de bioacumulación

Para determinar cuáles son los metales que están biocumulando los anfibios del río San Juan y sus tributarios, utilizamos el factor de bioacumulación (BAF) por sus siglas en inglés. El BAF representa la acumulación neta de un metal en un organismo como resultado de la absorción del entorno circundante. En esta evaluación se registró que solo el mercurio presenta un factor de bioacumulación promedio alto 7,955 mg/kg (Tabla 6.98). El orden relativo de los valores BAF para metales pesados en anfibios, resultado de su absorción en el sedimento, son: Hg > Cu > Se > Sr > Cd > Zn > Li > Ba > Cr > Ni > Mn > Al > As > V > Fe > Pb.

A nivel de localidades e individuos, el sapo *Rhinella spinulosa* colectado en el transecto AM-He-T7, presentó los mayores valores del factor de bioacumulación para el mercurio y cobre con 23,79 mg/kg y 1,714 mg/kg respectivamente.

Tabla 6.98. Valores del factor de bioacumulación (BAF) en anfibios

Metales	BAF (mg/kg)			BAF (mg/kg) promedio
	AM-He-T7	AM-He-T15	AM-He-T16	
Al	0	0,016	0,011	0,009
As	0,003	0,013	0,006	0,007
Ba	0,008	0,031	0,021	0,02
Cd	0,152	0,041	0,012	0,068
Cr	0,009	0,033	0,019	0,02
Cu	1,714	0,012	0,006	0,577
Fe	0,003	0,008	0,002	0,004
Hg	23,79	0,024	0,05	7,955
Li	0,003	0,03	0,066	0,033
Mn	0	0,041	0,012	0,018
Ni	0,019	0,006	0,036	0,02
Pb	0,001	0,006	0,002	0,003
Se	0,461	0,469	0,249	0,393
Sr	0,006	0,096	0,266	0,123
V	0,002	0,012	0,006	0,007
Zn	0,159	0,038	0,005	0,067

7 DISCUSIONES

El área de estudio se encuentra dentro de un contexto de rocas sedimentarias continentales con alto contenido de cuarzo y otros silicatos (puntos de afloramiento rocoso CGR-12 y CGR-15), y rocas sedimentarias marinas (litología dominante de rocas calizas) con alto contenido de carbonatos de calcio (puntos de afloramiento rocoso CGR-SJ-09, CGR-SJ-13, CGR-SJ-17, CGR-SJ-18 y CGR-SJ-19), entre estas se halla la ocurrencia de domos y rocas intrusivas (punto de afloramiento rocoso CGR-SJ-06), las cuales son la razón de la ocurrencia de yacimientos minerales (polimetálicos con superposición epitermal, epitermales de alta sulfuración y epitermales indiferenciados de acuerdo al mapa metalogenético del Perú[55]) con contenido de Ag, Au, Cu, Pb y Zn en cantidad explotable dentro de la subcuenca San Juan (Figura 7.1).

Si bien es cierto las rocas continentales tienen contenido de minerales óxidos y sulfuros de hierro, sulfatos de potasio-aluminio y arcillas, es necesario tener en cuenta que no son generadores de acidez (de acuerdo a los ensayos de test de ABA) debido al dominio litológico de las calizas, lo cual se evidencia en la muestra CGR-SJ-01, que corresponde a un depósito aluvial pleistoceno, el cual en su contenido presenta un dominio de clastos de rocas calcáreas (alto contenido de calcio) sobre las areniscas y las rocas volcánicas e intrusivas. Aunque es necesario resaltar la presencia de concentraciones considerables de Fe, Mg, P, Ba, Pb, As, Mo, Se, Cd y Ag, que para los casos de P, Ba, Pb, As, Mo, Se, Cd y Ag se deben a la ocurrencia de los domos y rocas intrusivas (con contenido de óxidos y sulfuros de hierro en la muestra CGR-SJ-06), lo cual se encuentra acorde a la ocurrencia de yacimientos minerales en la subcuenca.

[55] INGEMMET. Metallogenic map of Peru: Mining Operations, Projects and prospects, en https://www.ingemmet.gob.pe/-/mapa-metalogenetico-del-pe-1, accedido en noviembre de 2020.

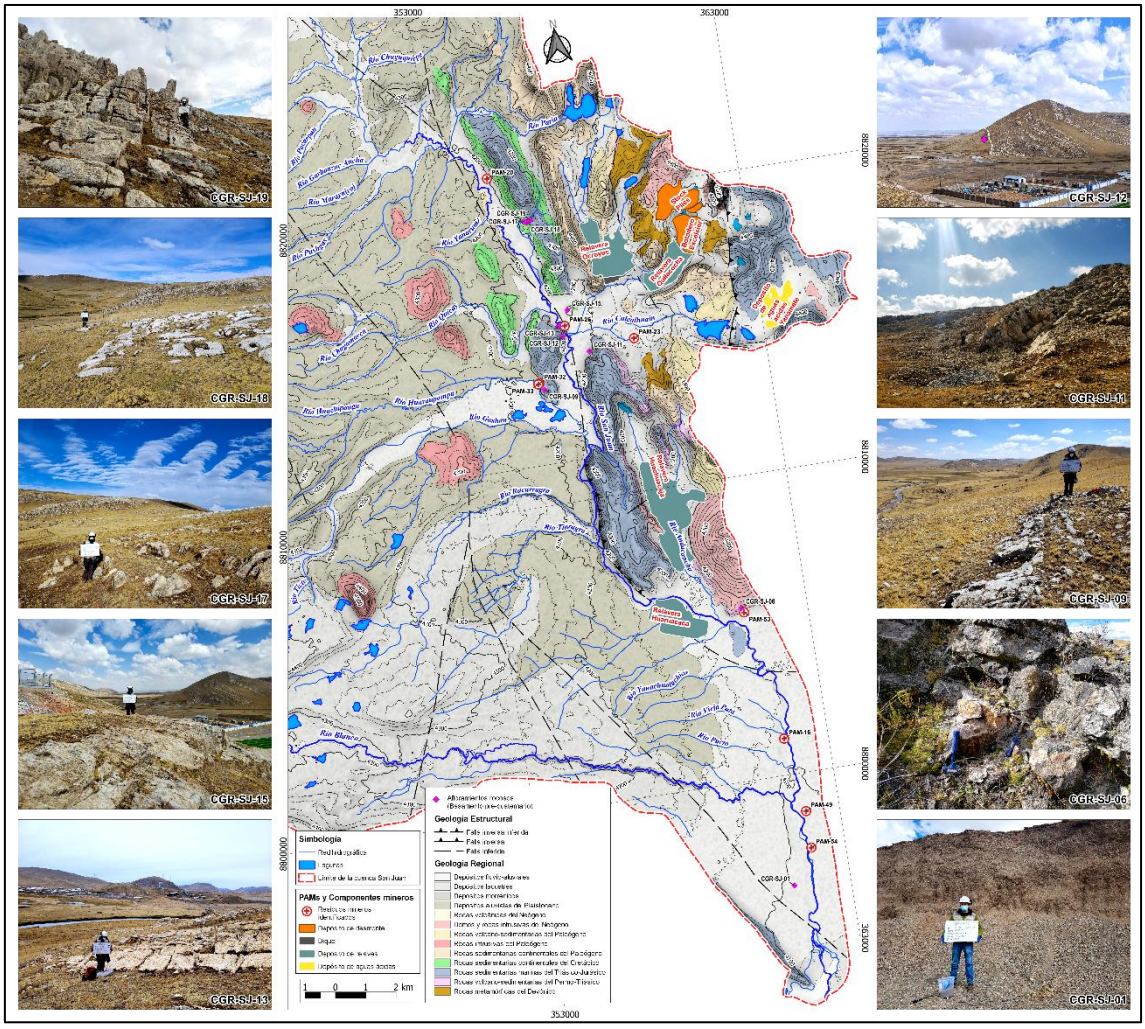


Figura 7.1. Ubicación de muestras de roca y configuración geológica a lo largo del río San Juan, consolidado a partir del cuadrángulo de Cerro de Pasco Hoja 22-k del INGEMMET

En este contexto, se realizó la caracterización geoquímica de la subcuenca del río San Juan, que consideró el análisis mineralógico por difracción de rayos X y microscopia electrónica de barrido y las concentraciones de metales en los depósitos fluviales y fluvio-aluviales de dicha subcuenca.

De acuerdo a los resultados del análisis mineralógico por difracción de rayos X mostrados en la Figura 7.2, donde las muestras están ordenadas de norte a sur (desde la cabecera de la subcuenca hacia el delta Upamayo) a lo largo del río San Juan, se presenta una aparente división en cuanto a la ocurrencia de minerales, marcado por 3 grupos.

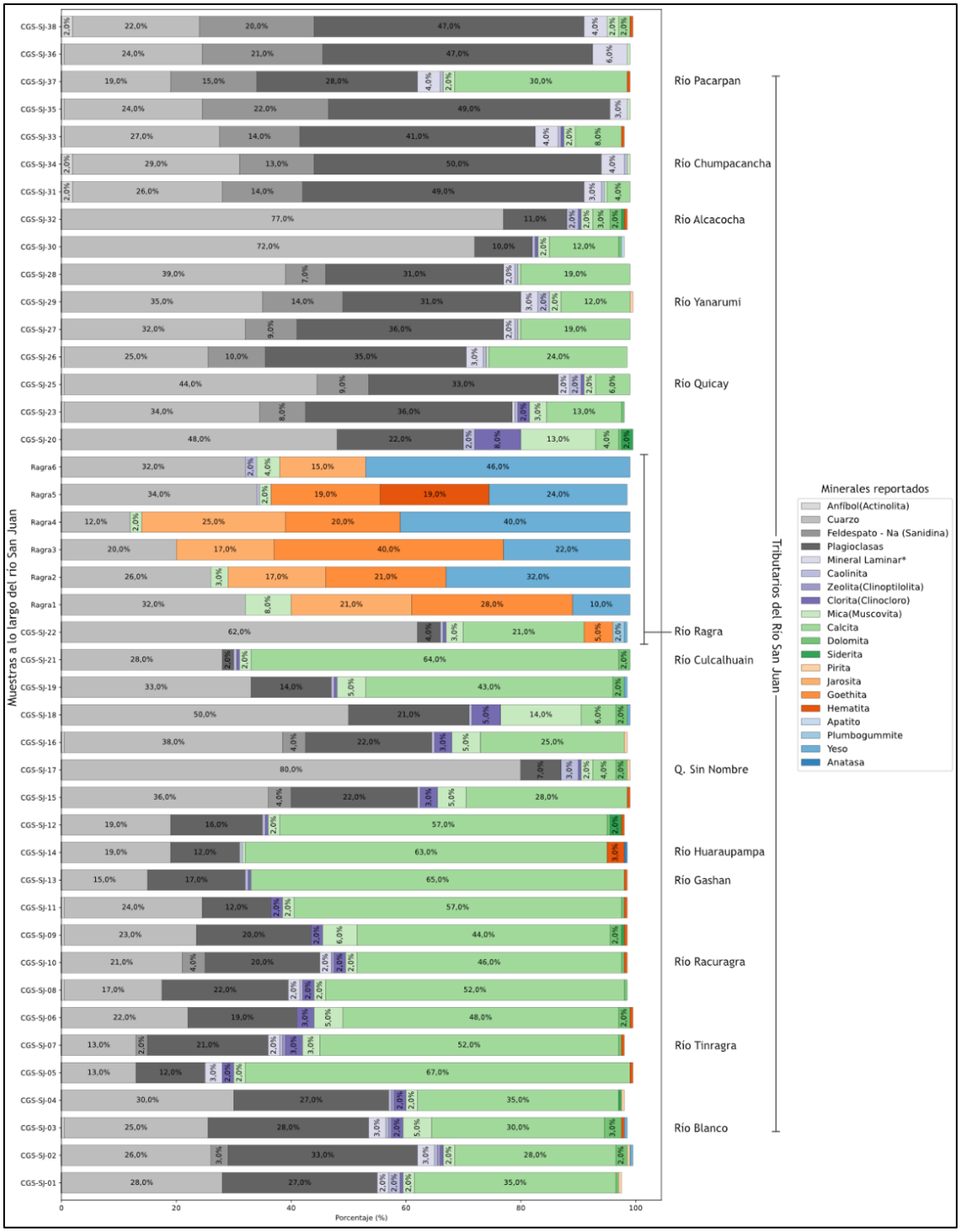


Figura 7.2. Minerales reportados en el análisis mineralógico por difracción de rayos X en muestras de roca (sedimentos fluviales y fluvio-aluviales de los ríos San Juan y Ragra respectivamente) ordenados de la cabecera de subcuenca San Juan hacia el delta Upamayo

Según la Figura 7.2, el primer grupo (del CGS-SJ-38 al CGS-SJ-20) se caracteriza por el alto contenido de feldespatos y plagioclasas y la presencia de óxidos de hierro. El segundo grupo, incluye las muestras del río Ragra (Ragra6 al Ragra1 y CGS-SJ-22) y se caracteriza por su alto contenido de sulfatos de hierro, oxi-hidróxidos de hierro, óxidos de hierro y

sulfatos de calcio y una marcada disminución en cuanto al contenido de carbonatos de calcio, además de reportar plumbogummita. Finalmente, el tercer grupo (CGS-SJ-21 y del CGS-SJ-19 al CGS-SJ-01) se caracteriza por su alto contenido de carbonatos de calcio (calcita), la disminución del contenido de silicatos respecto al primer grupo y la presencia más continuada de óxidos de hierro, carbonatos de hierro y sulfuros de hierro. Según esta apreciación el primer y tercer grupo se muestran acorde al contexto de la subcuenca (litología dominante de rocas carbonatadas), a diferencia del segundo grupo que se muestra como una anomalía, según su contenido de minerales como la jarosita que corresponde a un hidroxisulfato de hierro, que de acuerdo con Welch *et al*. (2008), es un mineral secundario que se origina en ambientes ácidos y ricos en sulfatos que se forman a partir de la oxidación de sulfuros y además en su contacto con agua es una fuente importante de drenaje ácido.

Según los resultados del análisis mineralógico por microscopia electrónica de barrido, que evidencia la «presencia» de minerales en traza, se muestra la distribución de elementos en la Figura 7.3; donde las muestras están ordenadas de arriba hacia abajo desde la muestra CGS-SJ-23 (aguas arriba de la desembocadura del río Ragra en el río San Juan, a la altura del centro poblado de Yurajhuanca) hasta la muestra CGS-SJ-01 (delta Upamayo). Se observa que, además de los minerales de hierro presentes en todas las muestras a lo largo del río San Juan; se encuentran en casi todas estas, minerales con contenido de Ba (baritina), Zn (esfalerita, retenido en goethitas, casiteritas y óxidos de Pb-Fe), Cu (sulfuros y óxidos de cobre) y Pb (galena, plumbogummita y óxidos de Pb-Fe), a excepción de las muestras de los ríos tributarios; sin embargo, respecto a las muestras del río Ragra, estas además de la presencia de minerales con Ba, Zn, Cu y Pb, muestran presencia de cinabrio, sulfuros de Ag-Hg y sulfuros de Hg-Pb-Cu-Fe.

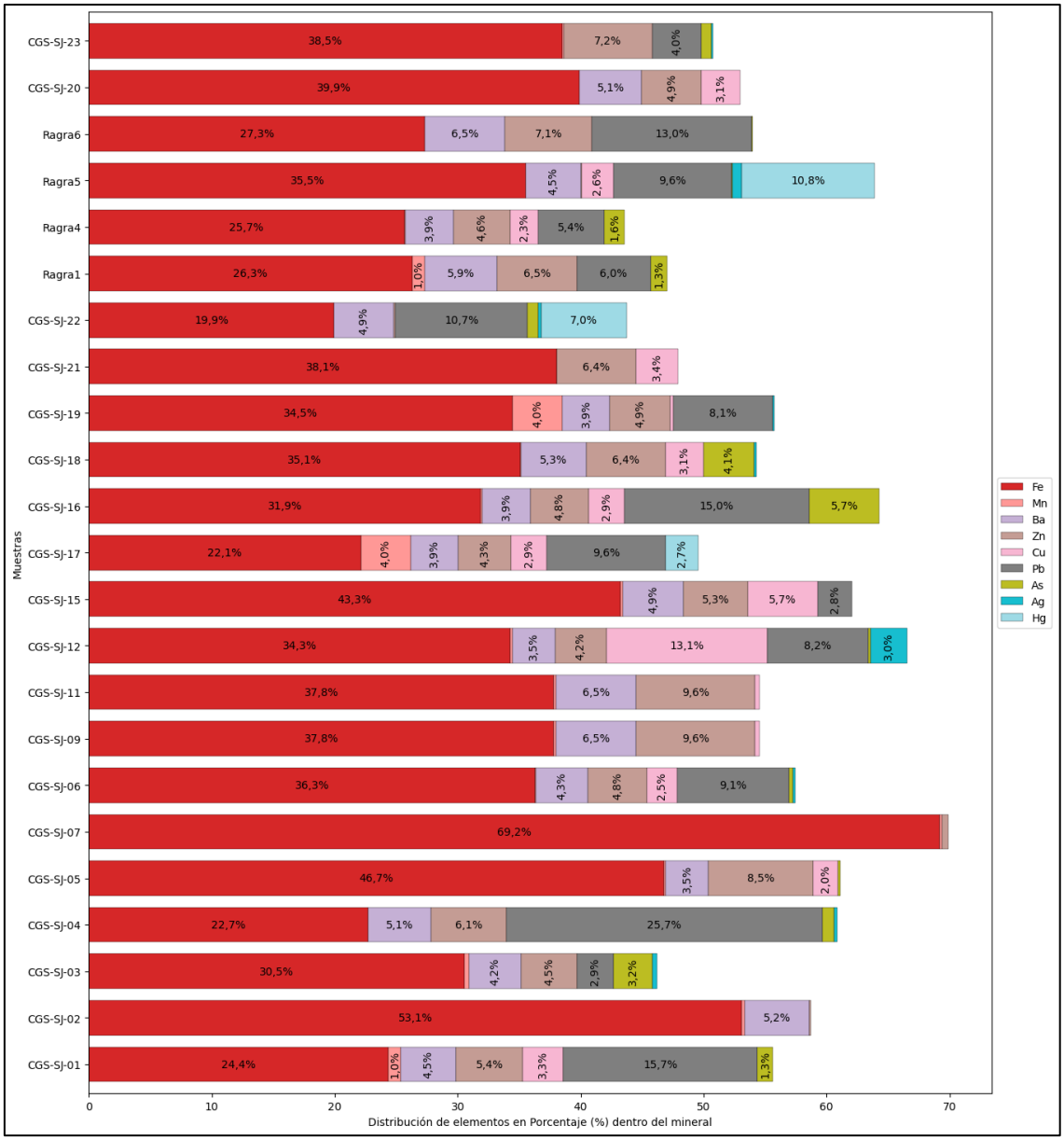


Figura 7.3. Distribución de elementos de interés de acuerdo a la presencia de minerales en traza, reportados en el análisis mineralógico por microscopia electrónica de barrido en muestras de roca (sedimentos fluviales y fluvio-aluviales de los ríos San Juan y Ragra respectivamente), ordenados desde la cabecera de subcuenca hacia el delta Upamayo

Los contenidos de Ba, Zn, Cu y Pb están asociados a la ocurrencia de yacimientos minerales en la subcuenca al igual que el Hg; sin embargo, este último se muestra con concentraciones mucho mayores en las muestras del río Ragra, posiblemente debido a su uso en la actividad minera colonial.

En cuanto a, las concentraciones de metales se halló el umbral del nivel de referencia utilizando los datos de todas las muestras de sedimento y depósitos cuaternarios fluviales y fluvio-aluviales a lo largo del río San Juan y sus tributarios, mediante los criterios de la media, la mediana y el diagrama de cajas que se muestran en la Figura 7.4, donde de acuerdo al análisis mineralógico (microscopia óptica, difracción de rayos X, microscopia electrónica de barrido) se obtuvo que el criterio de la media se ajusta mejor a lo encontrado.

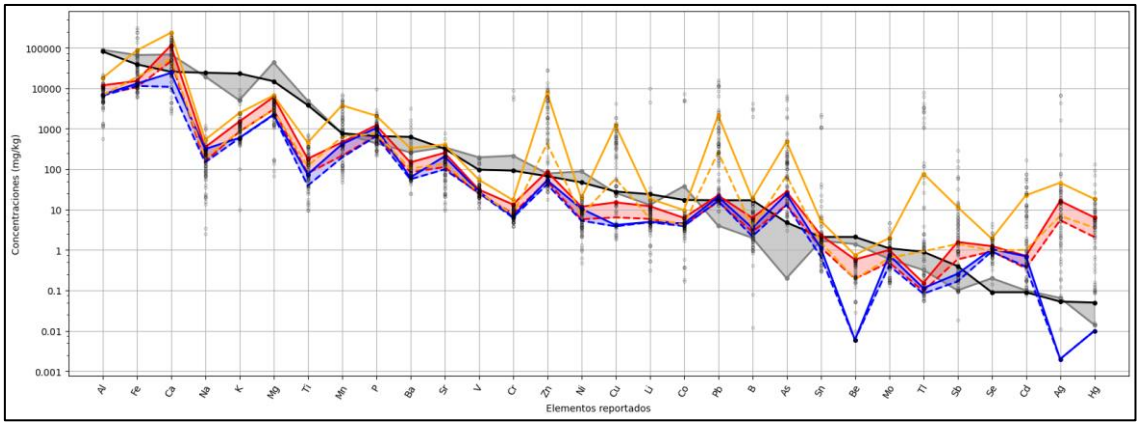


Figura 7.4. Umbral del nivel de referencia para la subcuenca San Juan, de acuerdo a los criterios de la media (líneas de color rojo), la mediana (líneas de color azul) y el diagrama de cajas (líneas de color amarillo)

Comparando los valores de roca frente al umbral del nivel de referencia (Figura 7.5), se observa que las muestras de roca están acorde a este nivel; en el caso del Ca, Mg, Ba se debe a que de acuerdo al contexto geológico hay un dominio litológico de rocas calcáreas (contenido de Ca) y por ende la ocurrencia de dolomitas (contenido de Mg); además de la ocurrencia de domos volcánicos y rocas intrusivas y episodios epitermales, que dan las condiciones de ocurrencia de minerales de Ba (baritina) como relleno en fracturas de rocas calizas.

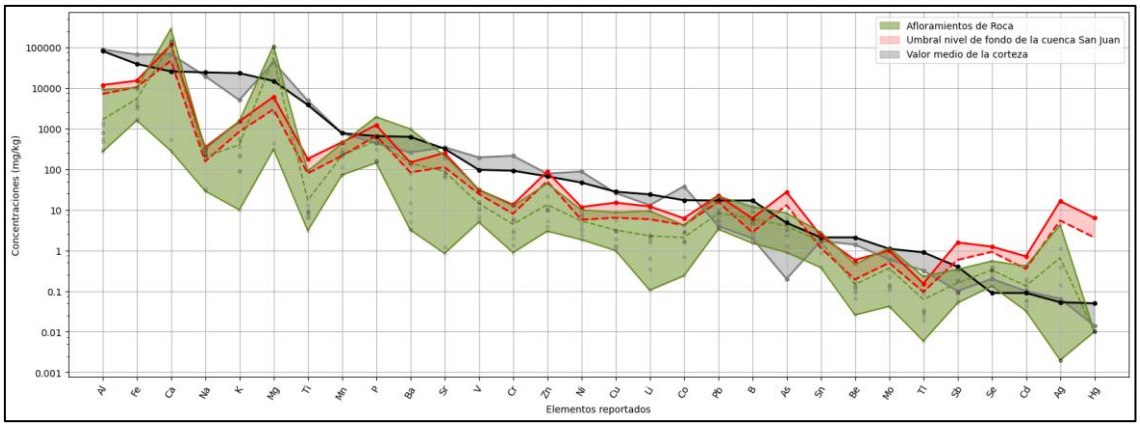


Figura 7.5. Concentraciones de metales en muestras de roca versus nivel de referencia para la subcuenca San Juan (líneas de color rojo)

Comparando los valores de las muestras de depósitos cuaternarios fluviales y aluviales a lo largo del río San Juan sin tomar en cuenta los tributarios (Figura 7.6), se superan por mucho los valores medios de la corteza y el umbral del nivel de referencia para la subcuenca San Juan, que para los casos de Zn, Cu, Pb, As, Ag y Hg su ocurrencia se debe a la presencia de los yacimientos polimetálicos con superposición epitermal, epitermales de alta sulfuración y epitermales indiferenciados. Sin embargo, estos yacimientos no se encuentran aledaños al río San Juan, por lo que dichos elementos llegaron a su cauce a través de los tributarios. Por otro lado, se tiene la «presencia» de los pasivos ambientales mineros previos a las

actividades de Centromin Perú S.A.[56], que a pesar de haber sido retirados, durante su tiempo de residencia estuvieron sin mantenimiento y sujetos a los procesos de erosión y

transporte por parte de lluvias y escorrentía superficial respectivamente, además de la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos, que produjeron aluviones en los tributarios y desbordes del río San Juan, lo que propicio la llegada de sus materiales al cauce de ese río.

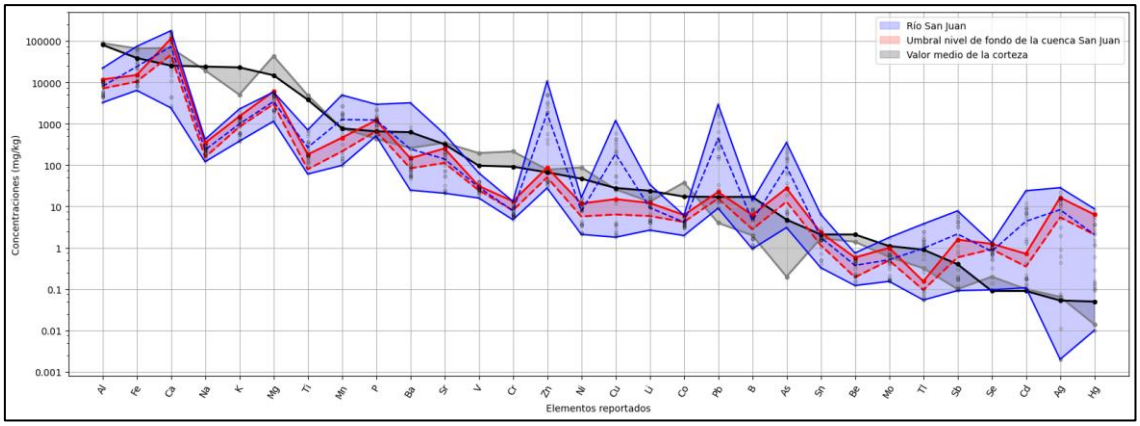


Figura 7.6. Concentraciones de metales en muestras de depósitos fluviales y fluvio-aluviales a lo largo del río San Juan, sin tomar en cuenta los tributarios (líneas de color azul) versus nivel de referencia para la subcuenca San Juan (líneas de color rojo)

De acuerdo al análisis anterior, se realizó la comparación de los depósitos cuaternarios fluviales y aluviales de los tributarios del río San Juan con el umbral del nivel de referencia de la subcuenca de ese río, donde son 4 los tributarios aportantes mayoritarios de Zn, Cu, Pb, As, Mo, Tl, Sb, Se, Cd, Ag y Hg al río San Juan, frente al resto de tributarios cuyos aportes están cercanos o debajo del umbral nivel de referencia para la subcuenca en mención (Figura 7.7).

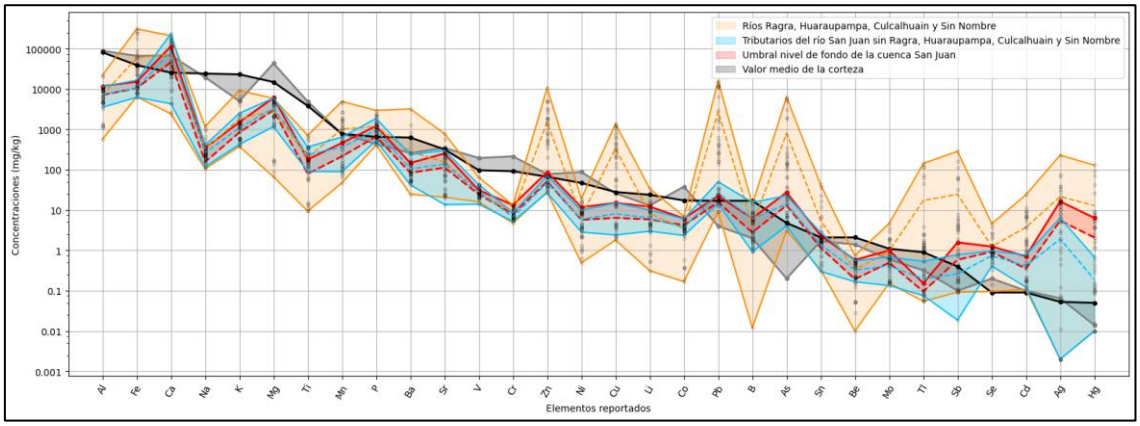


Figura 7.7. Comparación de las concentraciones de metales en muestras de depósitos fluviales y fluvio-aluviales de los tributarios (líneas de color celeste), y los ríos Ragra, Huaraupampa, Culcalhuain y Sin Nombre (líneas de color naranja) versus nivel de referencia para la subcuenca San Juan (líneas de color rojo)

De los 4 tributarios identificados, solo uno de ellos (Sin Nombre) no se evidenció actividades mineras, el resto presentó evidencia de residuos mineros de pasivos ambientales

[56] Información extraída de la «Actualización de inventario inicial de pasivos ambientales mineros», aprobado mediante Resolución Ministerial N.° 238-2020-MINEM/DM

(Huaraupampa y Culcalhuain) o, además de pasivos ambientales, muestran actividades mineras en su microcuenca (Ragra). Realizando la comparación entre estos, se observó que es el río Ragra el mayor aportante de Zn, Cu, Pb, As, Tl, Sb, Se, Cd, Ag y Hg (Figura 7.8), respecto a los otros 3.

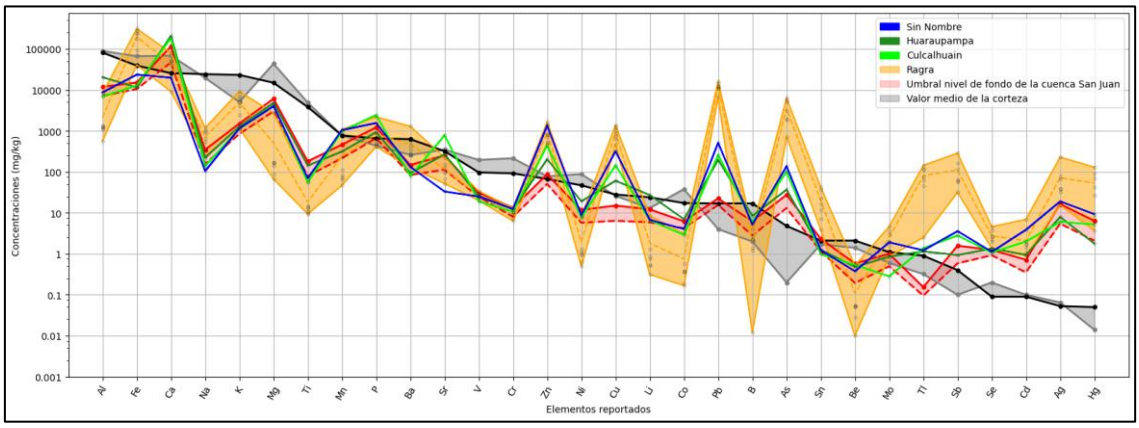


Figura 7.8. Comparación de las concentraciones de metales en muestras de depósitos fluviales y fluvio-aluviales de los 4 tributarios con mayor aporte al río San Juan versus nivel de referencia para la subcuenca San Juan (líneas de color rojo)

En cuanto al río Ragra, este tiene una orientación general este-oeste, de acuerdo a la imagen satelital SPOT 6 (1,5 m/px de resolución, con fecha de adquisición 9/6/2020), muestra su cauce de color naranja (Figura 7.9a), color que domina inclusive luego de su confluencia con el río San Juan, lo cual denota, según la interpretación de la imagen, un caudal con aporte constante de aguas capaces de teñir al río principal, por lo menos para la fecha de adquisición de esa imagen. Luego, en el tramo del río entre la relavera Ocroyoc y Quiulacocha, en ambas márgenes se encontraron sedimentos cuaternarios fluviales y fluvio-aluviales (Figura 7.9b), que de manera general están compuestos por intercalaciones de arenas y limos de tonalidades amarillas y rojizas (Ragra1 al Ragra6 en la Figura 7.9) intercaladas con arcillas rojizas, marrones y gris oscuro además de niveles de evaporitas y restos de residuos mineros (aparente textura de material de relave, lo que se evidencia en el punto Ragra6, en la Figura 7.9); además que en el algunos sectores, como el Ragra4 (Figura 7.9), se observa la precipitación de carbonatos de cobre (azurita y malaquita). La ocurrencia de intercalaciones de sedimento finos y gruesos denota cambios en cuanto a la energía de transporte del río Ragra, que a su vez sugieren la ocurrencia de episodios de fenómenos climáticos extremos (Ragra2, Ragra4 y Ragra5, en la Figura 7.9).

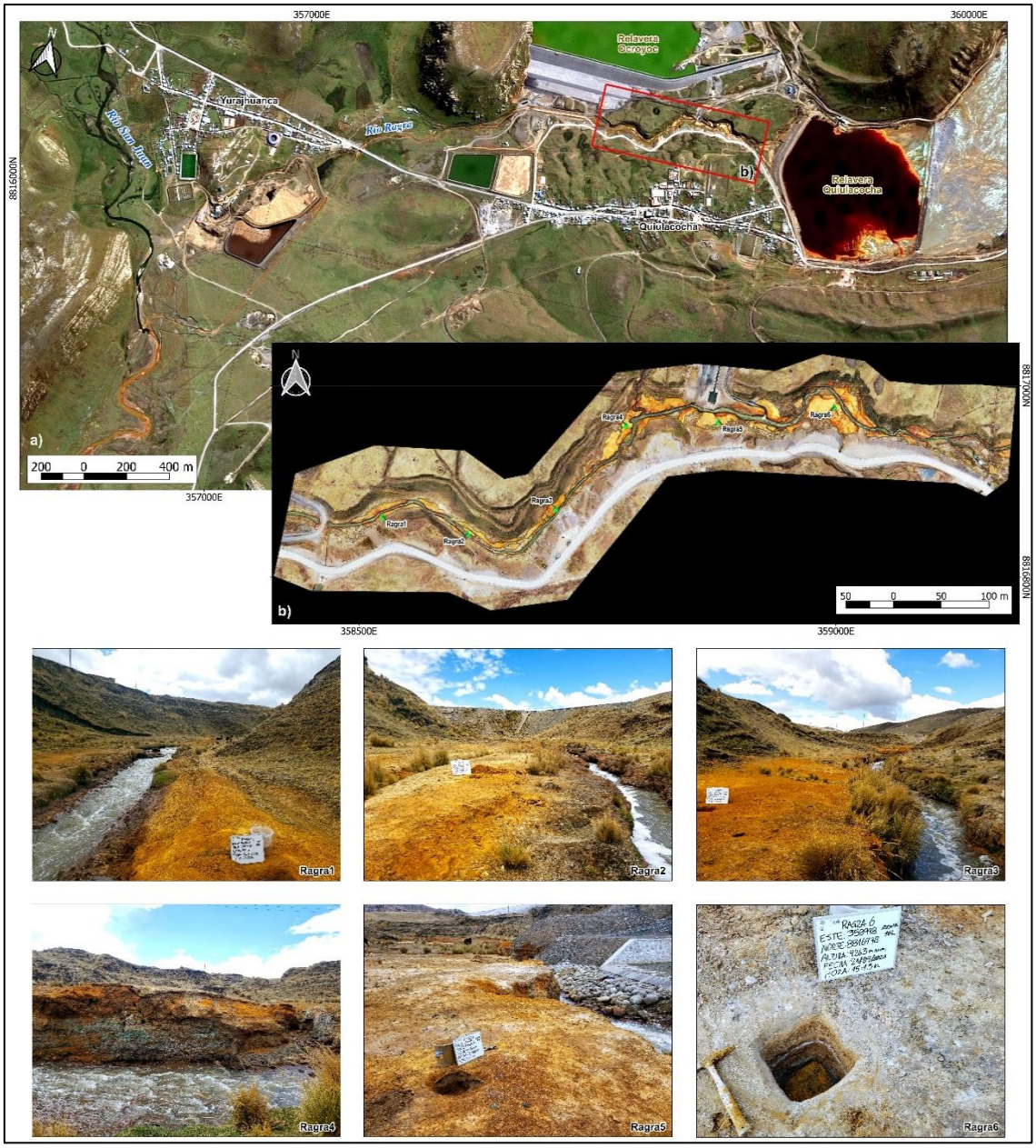


Figura 7.9. Sedimentos cuaternarios fluviales y fluvio-aluviales del río Ragra con residuos mineros

Debido a la evidente mezcla de estos depósitos fluvio-aluviales con residuos mineros, se realizó ensayos test de ABA, en el cual las muestras de estos sedimentos mezclados con residuos mineros salieron como generadoras de acidez, esto debido a su contenido de sulfatos y sulfuros de hierro, cobre y zinc; resultados que concuerdan con los obtenidos en los ensayos de *shake flask* metales, que demuestra que estas muestras son capaces de lixiviar Fe, Ca, Mg, Mn, Sr, Zn, Cu, Pb, As, Tl, Sb, Cd, Ag y Hg; y que además según el ensayo de *shake flask* aniones, lixivian sulfatos como anión dominante.

Por otra parte, si bien estos depósitos fluvio-aluviales mezclados con residuos mineros, según el ensayo de Dold, estas muestras demostraron la capacidad de estos materiales de liberar S, Ca, Cu, Fe, Pb y Zn en la primera fracción que corresponde a solubles en agua al igual que en la segunda fracción que corresponde a intercambiable. La liberación de S, Ca

y Pb probablemente se debe a la disolución de las evaporitas-yesos, fosfatos de plomo y jarosita, en cuanto al Cu, Fe y Zn se liberan a partir de las arcillas, y las goethitas que tienden a retener a los metales pesados, según Matis *et al*. (1999).

Si bien estos materiales no forman parte de la «Actualización de inventario inicial de pasivos ambientales mineros»[57], estos se encuentran mezclados con residuos mineros, residuos que de acuerdo a las evidencias le brindan las características por las que estos depósitos fluvio-aluviales mezclados con residuos mineros se deben considerar como fuente contaminante, que de acuerdo a la fotointerpretación (Figura 7.9b) presenta un área aproximada de 8800 m^2.

Por otro lado, para el primer objetivo respecto a la identificación de fuentes de contaminación en el área de influencia de los pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo, se desarrolló la evaluación de los PAM reportados por el Minem en su «Actualización de inventario inicial de pasivos ambientales mineros»[58], de los cuales se consideró 9 de los 51 pasivos ambientales mineros (Figura 7.10), ya que los sectores o zonas reportadas como pasivos actualmente no se muestran como tal, debido a su reutilización como depósitos de gravas, zona de cultivo de forraje (PAM-16), corral para ganado (PAM-33) o en algunos casos revegetados de manera natural.

Estos puntos muestreados, si bien es cierto de acuerdo a los resultados presentan altas concentraciones de Fe, Ba, Zn, Cu, Pb, As, Mo, Tl, Sb, Se, Cd, Ag y Hg, es necesario mencionar que el material hallado corresponde a residuos mineros manifestados en la ocurrencia de costras puntuales (PAM-49 y PAM-26), matriz de gravas oxidadas (PAM-54, el cual se muestra como generador de acidez, con alto contenido de sulfatos y óxidos de hierro), suelo mezclado con material de relaves (PAM-32) y uso de aparente desmonte de mina como parte de la cimentación de vías de tránsito (PAM-20 y PAM-23, este último se muestra con alto contenido de sulfuros de hierro).

La ausencia del material del PAM (relaves o desmontes) probablemente se deba a las operaciones de la Compañía Minera Aurífera Aurex S.A., cuya actividad declarada es la de tratamiento de relaves coloniales argentíferos (contenido de plata) entre 1994 y 2006[59]. Sin embargo, debido a que en su momento estos fueron depositados sin tomar en cuenta ninguna medida de protección (uso de geomembranas, por ejemplo), los lugares o zonas de depósito a pesar de la remoción de estos materiales (relaves o desmontes) se muestran como fuentes de contaminación debido a la lixiviación de Fe, Zn, Cu, Pb, As, Se, Cd y Ag de acuerdo a los resultados de *shake flask* metales, así como la lixiviación de sulfatos, fosfatos y cloruros de acuerdo a los resultados de *shake flask* aniones, de igual manera de acuerdo a los ensayos de extracción secuencial de Dold se muestra que estos residuos mineros mezclados con el suelo son capaces de liberar S, Fe, Cu, Pb y Zn (debido a la ocurrencia de minerales como jarosita, plumbogummita, yesos y arcillas) en la primera fracción soluble en agua, así como S, Cu, Fe, Pb y Zn en la segunda fracción intercambiable (debido a la ocurrencia de oxi-hidróxidos que por adsorción son capaces de retener a los metales pesados).

Fuentes contaminantes líquidas

57 Aprobado mediante Resolución Directoral N.° 238-2020-MEM/DM, fue publicada 24 de agosto de 2020.
58 Ídem
59 Cierre de planta de beneficio Andes de Compañía Minera Aurífera AUREX S.A. http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaam/inicio/resumen/RE_1626178.PDF, accedido noviembre del 2020

Por otro lado, en la Figura 7.10 se muestra la salida del agua turbinada[60] desde la mini central eléctrica y su posterior desplazamiento, donde se muestreó el punto DCLT50Kv cuyos resultados de los parámetros evaluados se encontraron dentro de lo establecido en los valores LMP 010-2010. Además, hidroquímicamente mediante el diagrama de Piper se identificó que este punto presentó facies bicarbonatada cálcica.

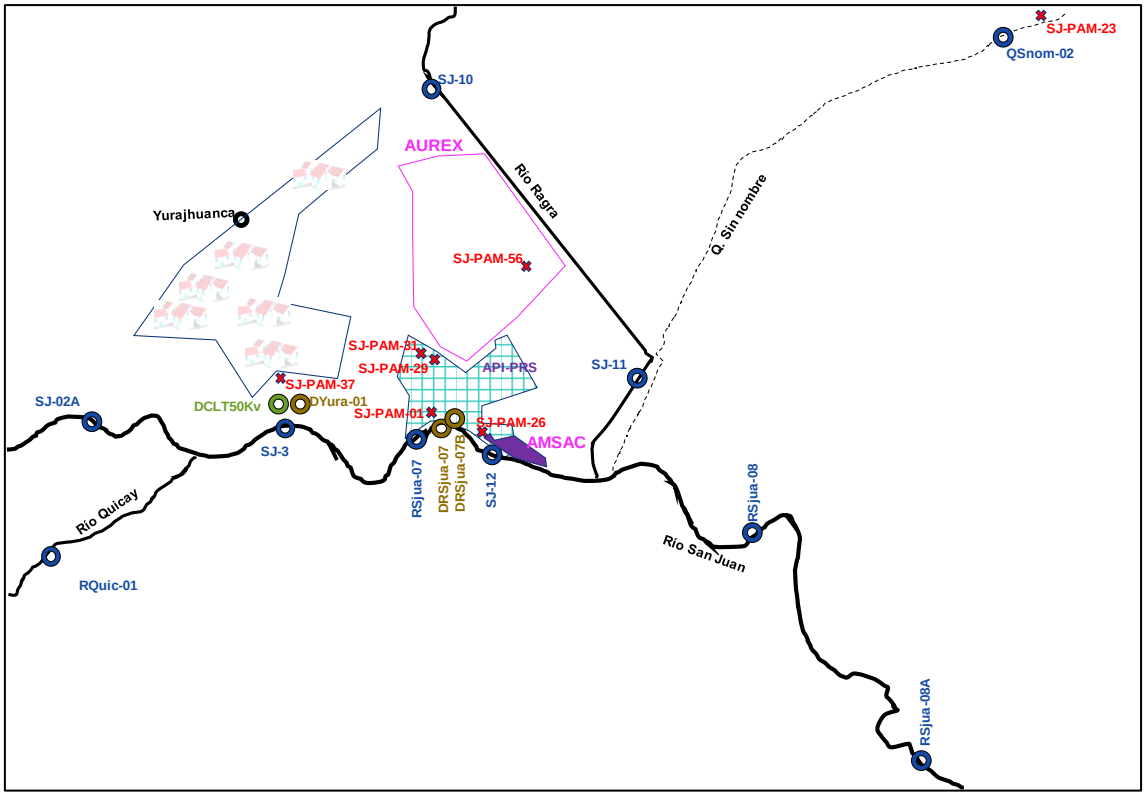


Figura 7.10. Esquema de ubicación de agua turbinada y aguas residuales

En la Figura 7.11, también se observa que el agua turbinada y agua residual se mezclan antes de llegar al río San Juan.

60 En la cadena de custodia, se asignó como matriz agua residual industrial; sin embargo, la muestra corresponde a agua turbinada de la mini central eléctrica de Yurajhuanca, la generación del suministro eléctrico es empleado para bombear agua del río San Juan al depósito de relaves Ocroyoc de la Empresa Administradora Cerro S.A.C. empleada para la actividad minero – metalúrgica; por lo tanto, los resultados de los parámetros evaluados se compararon referencialmente con valores establecidos en los Límites Máximos Permisibles - LMP, para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas, aprobado mediante Decreto Supremo N.° 010-2010-MINAM el 20 de agosto de 2010

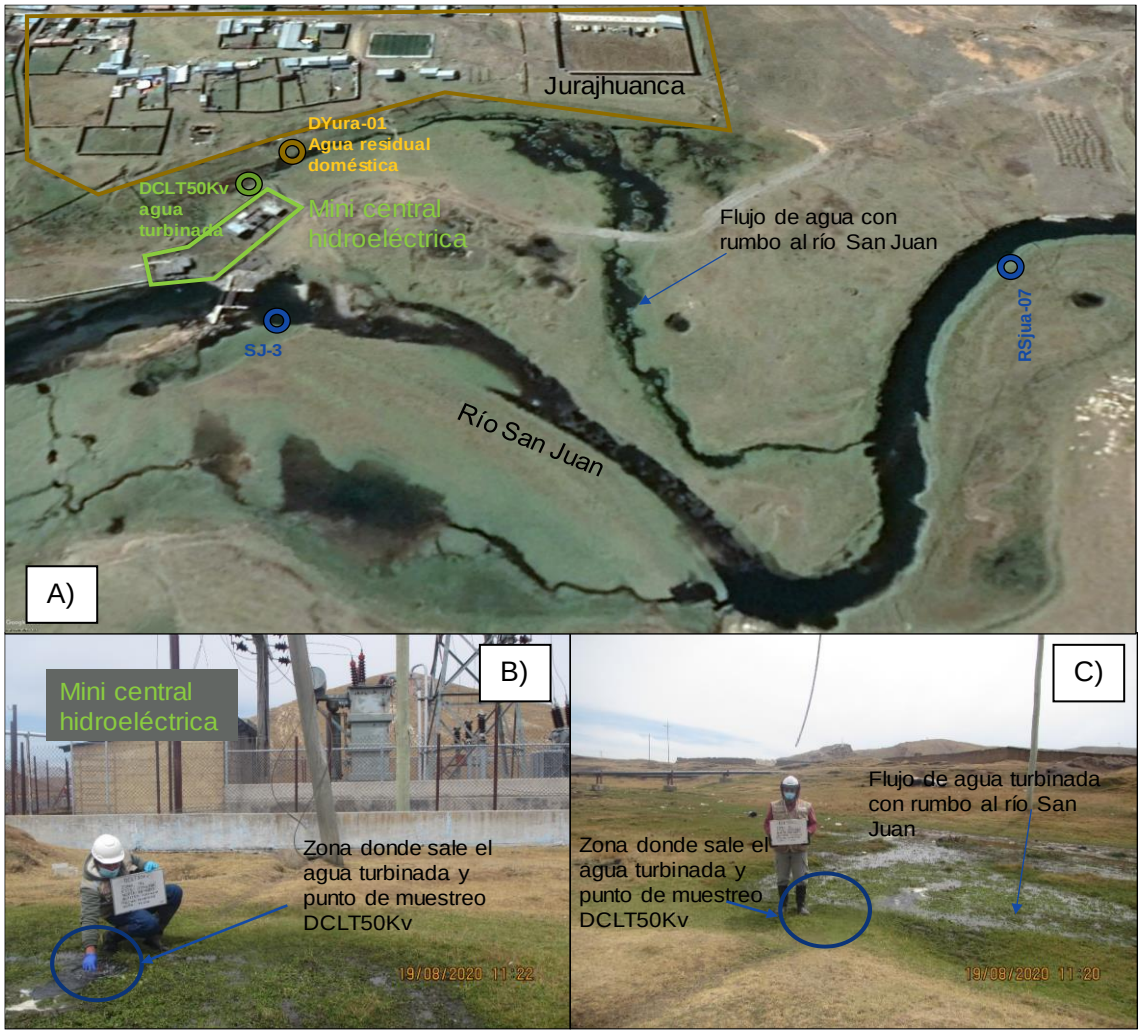


Figura 7.11. Agua turbinada procedente de la mini central eléctrica. A) Puntos de descarga y recorrido hacia el río San Juan, B) salida del agua turbinada y C) flujo de agua turbinada

La Figura 7.12 muestra la salida del agua residual doméstica (proveniente del centro poblado Jurajhuanca) donde se estableció el punto de muestreo DYura-01. Los resultados de este punto de muestreo en todos los parámetros se encontraron dentro de lo establecido en los valores LMP 003-2010. Además, hidroquímicamente mediante el diagrama de Piper se identificó que este punto presentó facies bicarbonatada cálcica.



Figura 7.12. Agua residual doméstica del centro poblado Jurajhuanca. A) Zona donde sale el agua residual doméstica, se observa el poblado Jurajhuanca y B) zona donde sale el agua residual doméstica, se observa la mini central eléctrica

La Figura 7.13 muestra la ruta y descarga del agua residual doméstica (proveniente del centro poblado Rancas), en la descarga de esta agua residual se estableció el punto de muestreo DRSjua-07, la concentración de coliformes termotolerantes en este punto (170000 NMP/100 mL) superó al valor establecido para este parámetro en los LMP 003-2010. Además, hidroquímicamente mediante el diagrama de Piper se identificó que este punto presentó facies bicarbonatada cálcica.

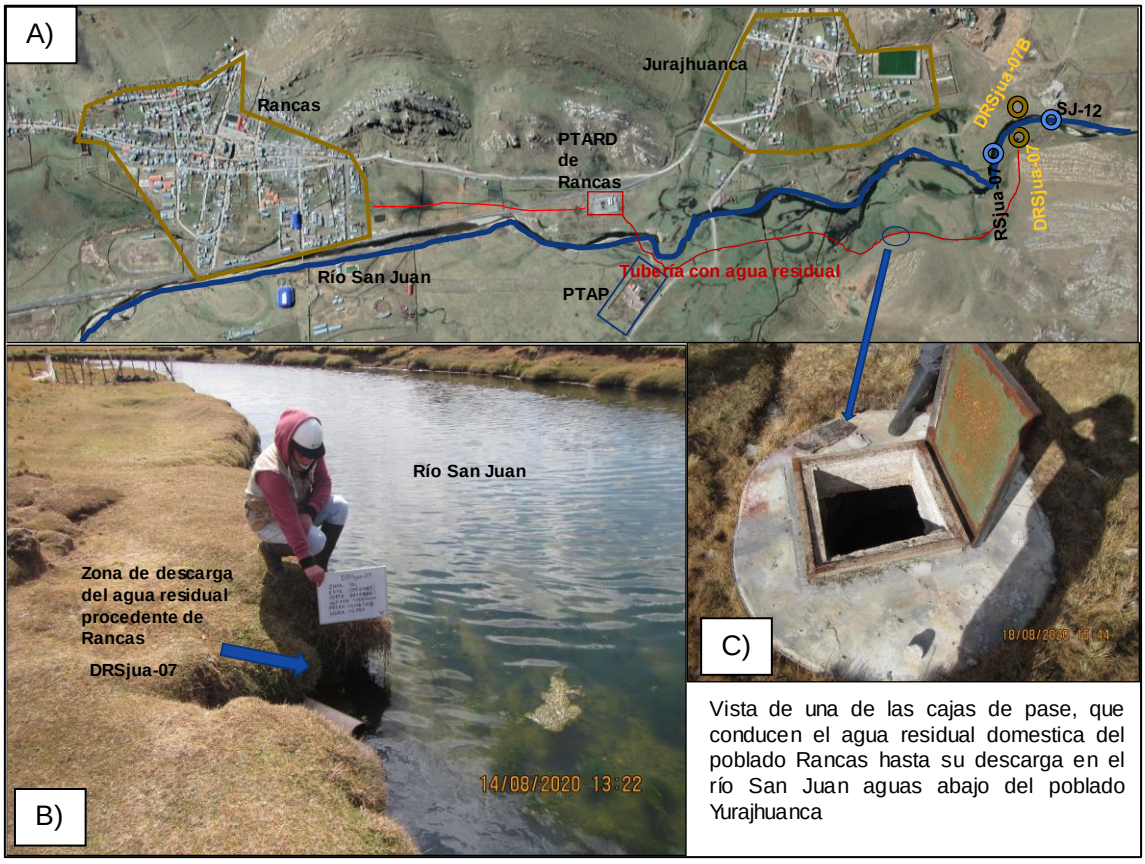


Figura 7.13. A) Agua residual doméstica del centro poblado de Rancas y su recorrido hasta su descarga en el río San Juan, B) zona de descarga y C) caja de pase de la tubería que conduce el agua residual doméstica

La Figura 7.14 muestra el esquema de ubicación del punto de muestreo DRSjua-07B, como se indicó en el ítem de resultados y análisis, no se pudo identificar la procedencia de esta agua residual, ya que no existe rastro de las labores de colocación de la tubería que traslada agua residual hasta el río San Juan.

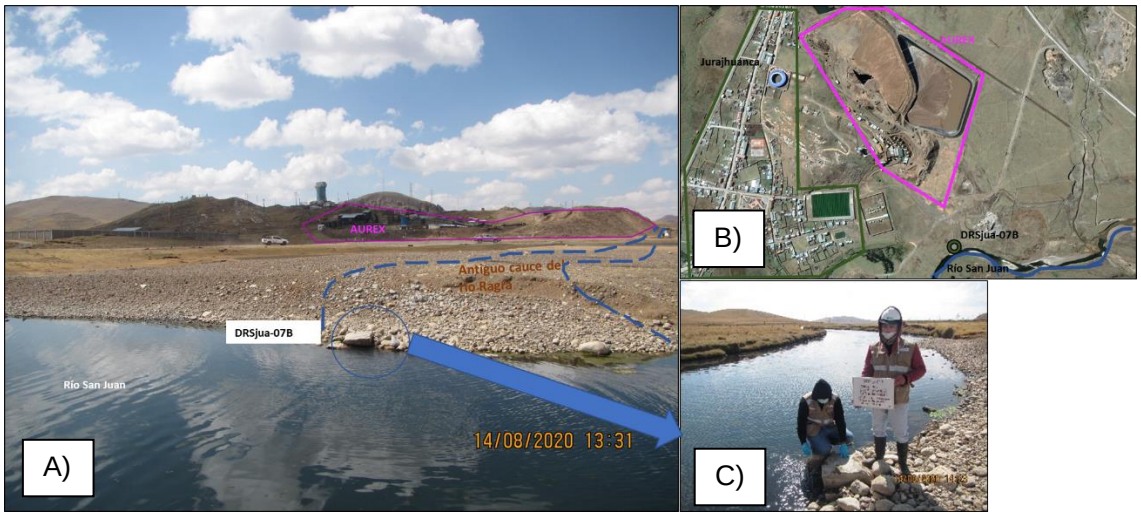


Figura 7.14. A) Esquema de ubicación del punto de muestreo DRSjua-07B (agua residual) y antiguo cauce del río Ragra, B) ubicación del punto de descarga y delimitación de Compañía Minera Aurífera Aurex S.A. y poblado Jurajhuanca y C) vista del punto de descarga debajo de una piedra

En el ítem de resultados y análisis, se observó del análisis hidroquímico (para el agua turbinada y aguas residuales) por medio del diagrama de Piper que las aguas residuales domésticas (DYura-01, DRSjua-07, DSF-01 y AR-01) y turbinada presentan facies bicarbonatadas cálcicas; mientras que las aguas de punto DRSjua-07B es el único que presentó facies sulfatada cálcica-magnésica. Según Padilla (2012), las aguas sulfatadas podrían tener origen o influencia de actividades antropogénicas (minería, industria).

Además, el análisis multivariado para aguas residuales y agua turbinada genero 3 clústeres donde el clúster 1 lo conforman aguas residuales domésticas (AR-01, DSF-01 y DRSjua-07) con valores o concentraciones bajas en manganeso total, estroncio total, cadmio total, magnesio total, calcio total, conductividad, sulfato; y con valores altos de potasio, fósforo, bicarbonatos. Asimismo, el clúster 3 lo conforman el agua residual doméstica DYura-01 y agua turbinada DCLT50Kv con valores o concentraciones bajas en manganeso total, estroncio total, cadmio total, magnesio total, calcio total, conductividad, sulfato, potasio, fósforo, bicarbonatos; sin embargo, el clúster 2 formado por el agua residual DRSjua-07B con valores altos en manganeso total, estroncio total, cadmio total, magnesio total, calcio total, conductividad y sulfatos.

Después del análisis multivariado e hidroquímico, el punto DRSjua-07B presenta concentraciones altas en metales, conductividad y sulfatos, el cual es tratado como agua residual industrial, siendo un posible generador de esta agua la Compañía Minera Aurífera Aurex S.A, siendo la única empresa con actividad minera dentro de un radio de 1000 m. Mencionar que, el agua residual DRSjua-07B presentó concentración de cobre total (17,07 mg/L) superior a lo establecido en los valores LMP 010-2010 (0,5 mg/L).

En la Figura 7.15 se muestra cómo el río Ragra desde el 2005 hasta el 2013 desembocaba en el río San Juan en el mismo lugar donde se muestreó el punto DRSjua-07B, y las imágenes entre 2015 y 2019, muestran su actual trayectoria.

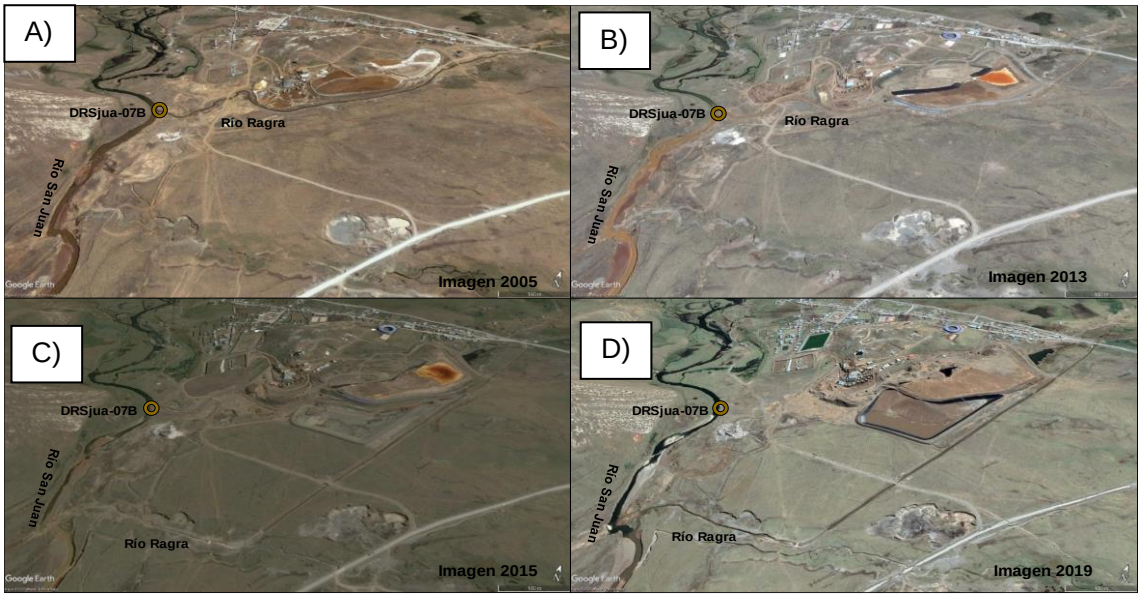


Figura 7.15. Imágenes de la zona de desembocadura del río Ragra al río San Juan extraídas del Google Earth, donde se observa los cauces antiguos A) 2005 y B) 2013 y cauces actuales C) 2015 y D) 2019

El río Ragra, antes de su confluencia en el río San Juan, para la presente evaluación será tratado como una fuente de contaminación porque el punto SJ-11 presentó concentraciones de oxígeno disuelto (3,62 mg/L), aceites y grasas (10,88 mg/L), DBO_5 (87 mg/L), DQO (134 mg/L), coliformes termotolerantes (1100000 NMP/100 mL), manganeso total (32,606 mg/L), plomo total (0,05211 mg/L) y zinc total (2,37 mg/L) fuera de lo establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3.

En la Figura 7.16 se observa los puntos de muestreo en el río Ragra, SJ-10 (aguas arriba de Compañía Minera Aurífera AUREX S.A. y aguas abajo de la Empresa Administradora Cerro S.A.C., PAM depósito de desmonte Excelsior y depósito de relave Quiulacocha administrados por Activos Mineros S.A.C., material con características de desmonte de mina y relave dispuestos al borde del río Ragra, y distritos de Cerro de Pasco, todos estos contribuyen en la disminución de la calidad del agua del río Ragra, mencionado en el Plan de cierre integral de pasivos de origen minero río San Juan y delta Upamayo), el cual presentó una calidad de agua pésima y tuvo concentraciones de conductividad (3090 µS/cm), DBO_5 (27 mg/L), DQO (48 mg/L), coliformes termotolerantes (54000 NMP/100 mL), hierro total (11 mg/L), manganeso total (37,437 mg/L) y zinc total (2,3 mg/L) fuera de lo establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3.

El río Ragra, aguas abajo de Compañía Minera Aurífera AUREX S.A, presentó calidad de agua pésimo en el punto SJ-11, según el ICARHS. Pese a que en campo no se observó aportantes entre el tramo que comprende los puntos SJ-10 y SJ-11, en la Tabla 7.1 se observa que existe un incremento de caudal y de concentraciones de algunos metales (cobre, mercurio, plomo y zinc), este incremento podría ser generado por infiltraciones de algunos componentes mineros de Compañía Minera Aurífera AUREX S.A. (Figura 7.15) los cuales se ubican próximos al río Ragra. Cabe precisar que, el OEFA no tiene la competencia para fiscalizar a empresa minera en mención, debido a que esta pertenece al rubro de pequeña minería. Por lo tanto, no se puede determinar su vinculación directa con el aumento de concentraciones de los elementos mencionados. Asimismo, la elevada concentración de manganeso (37,44 mg/L) en el punto SJ-10, estaría asociado a la disposición de sedimentos

fluvio aluviales mezclados con residuos mineros, lo que se corrobora con los resultados de *shake flask* metales practicado a dicho sedimento en los puntos Ragra1, Ragra2, Ragra3, Ragra4, Ragra5 y Ragra6, que presentaron valores de 22 mg/L, 12 mg/L, 14 mg/L, 70 mg/L, mg/Ly 9 mg/L respectivamente, y otras actividades que se desarrollan en la parte alta de la microcuenca Ragra.

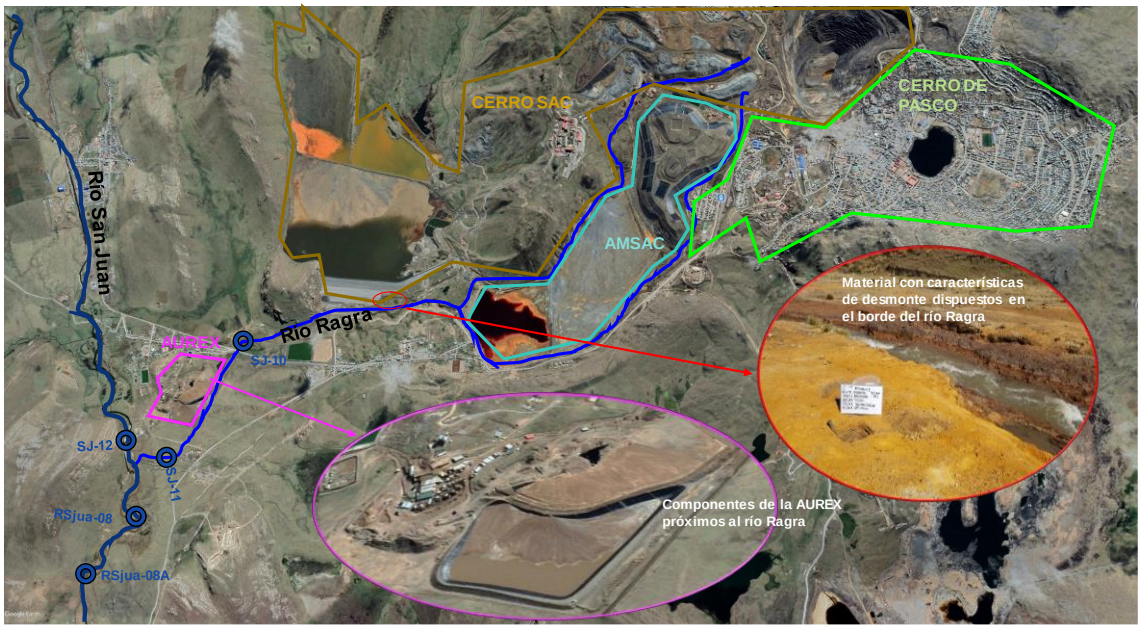


Figura 7.16. Esquema de ubicación de los puntos de muestreo de agua superficial en el río Ragra

Tabla 7.1. Resultados de metales fuera de lo establecido en los ECA para agua, categoría 3, y su carga de masa

Cuerpo de agua		Río Ragra	
Código		SJ-10	SJ-11
		Aguas arriba de AUREX	Aguas abajo de AUREX
Fecha de muestreo		14/08/2020	13/08/2020
Hora de muestreo		09:00	14:45
Caudal	L/s	123,5	140
Cobre Total	mg/L	0,0683	0,0857
Hierro Total	mg/L	11	11
Manganeso Total	mg/L	37,44	32,61
Mercurio Total	mg/L	0,000126	0,000241
Plomo Total	mg/L	0,02916	0,05211
Zinc Total	mg/L	2,3	2,37

En el poblado Sacrafamilia se halló 2 vertimientos de agua residual doméstica, el primero DFS-01 (agua que sale de una tubería rota, en el poblado Sacrafamilia) y el segundo AR-01 (punto de vertimiento de las aguas residuales tratadas del poblado Sacrafamilia). Las aguas residuales en el punto de muestreo DFS-01 (caudal igual a 0,736 L/s) presentaron concentraciones altas de coliformes termotolerantes (70000 NMP/100 mL) que superan lo establecido en los valores LMP 003-2010 (Figura 7.17).

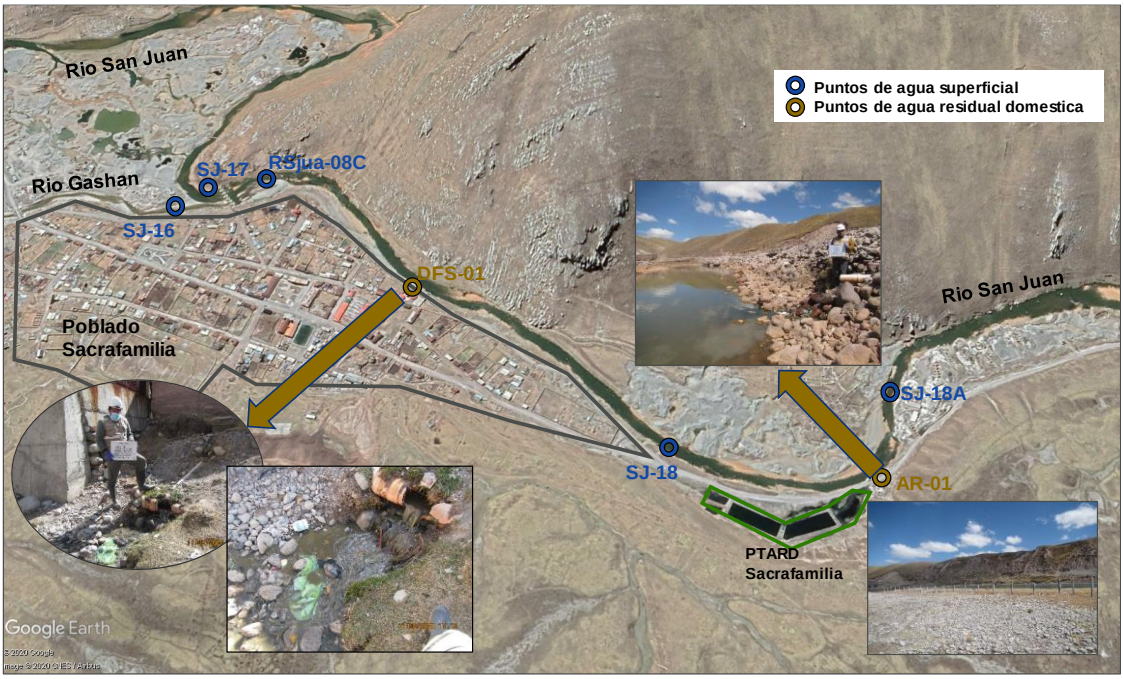


Figura 7.17. Esquema de ubicación de puntos de las aguas residuales domésticas (DFS-01 y AR-01) y agua superficial

Además, con el objeto de determinar la influencia de los elementos de interés[61,62] provenientes de los pasivos ambientales mineros[63], tales como: depósito de sedimentos en el curso del río San Juan y depósitos del delta Upamayo (ambos comprendidos en el Plan de cierre integral de pasivos ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo), descargas de agua residuales (domésticas e industriales) y disposición de sedimentos contaminados identificados en los márgenes del río Ragra, sobre el agua superficial, sedimento y comunidades hidrobiológicas.

En el ítem de resultadosy análisis, donde se expusieron y compararon con la normativa ambiental los valores obtenidos del análisis de agua (superficial, residual, turbinada), sedimento, comunidades hidrobiológicas y suelos, se observó que el mayor cambio desfavorable en la calidad del agua y sedimento (parámetros físicos, microbiológicos y en las comunidades hidrobiológicas) en el río San Juan se da después de la descarga del río Ragra al río San Juan. Esta pérdida de calidad del río San Juan también se observó en otras

61 Elementos de interés o contaminantes (parámetros), se refiere a aquellas sustancias químicas de interés toxicológico o ecotoxicológico generados por las actividades y procesos principales, secundarios y auxiliares, que se desarrollan o se desarrollaron en el sitio de estudio. «Guía para el muestreo de suelos» MINAM, 2014.

62 Elementos de interés ó contaminantes, se refiere a cualquier sustancia, materia física, química, biológica o radiológica que tiene un efecto adverso sobre el aíre, agua, suelo o la biota. Glossary of Environment Statistics 1997 WHO/UNEP, https://stats.oecd.org/glossary/download.asp

63 Extraído del Informe N° 013-2012-MEM-DGM/DTM/PAM, referido a la Remediación de pasivos ambientales mineros (PAM) del Estudio de Plan de cierre integral de los PAM «Depósito de sedimentos en el río San Juan» y «Delta Upamayo y parte norte del lago Chinchaycocha» del 20 de enero de 2012, hay tres tipos de pasivos:

- Pasivos de origen minero previos a las operaciones de CENTROMIN Perú. – Son aquellos originados por la otrora empresa Cerro de Pasco Corporation (Escorias de Tinyahuarco) y los relaves mineros dejados desde la época colonial.
- Pasivos de origen minero. - correspondientes a las empresas Aurex, Cía. Minera Volcan, Sociedad Minera el Brocal y la empresa estatal CENTROMIN Perú.
- Pasivos de origen no minero. - Correspondes aquellos originados por las descargas de aguas residuales y de lluvia provenientes de las diferentes zonas de la ciudad de Cerro de Pasco.

zonas ubicadas aguas abajo de actividades mineras e ingresos de cuerpos de agua. La quebrada Huaraupampa también tuvo una disminución de la calidad del sedimento.

A continuación, se presentan las Figuras 7.18, 7.19, 7.20, 7.21 y 7.22 las cuales contienen los resultados de potencial de hidrógeno, conductividad, oxígeno disuelto, aceites y grasas, DBO_5, DQO, sulfatos, cobre total, hierro total, manganeso total, plomo total, zinc total y coliformes termotolerantes comparados con los ECA para agua 2017, categoría 3, en los puntos muestreados en el río San Juan, y aportantes como ríos (Paria, Sin nombre 02, Quicay, Ragra, Gashan, Tinragra y Blanco), quebrada Sin nombre 12 y bofedal próxima al delta Upamayo. Estas figuras también presentan los valores de los parámetros mencionados en el agua turbinada y aguas residuales que descargan en el río San Juan, sin ser comparadas con ninguna normativa.

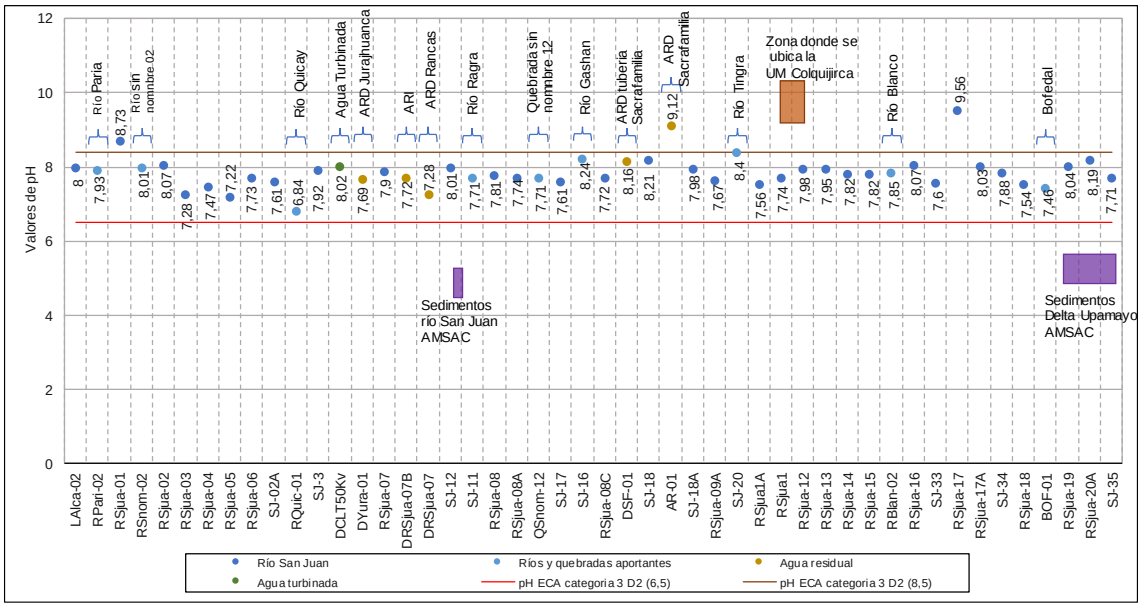


Figura 7.18. Valores de potencial de hidrógeno en agua superficial comparados con los ECA para agua 2017, categoría 3 y valores de pH en agua turbinada y residual

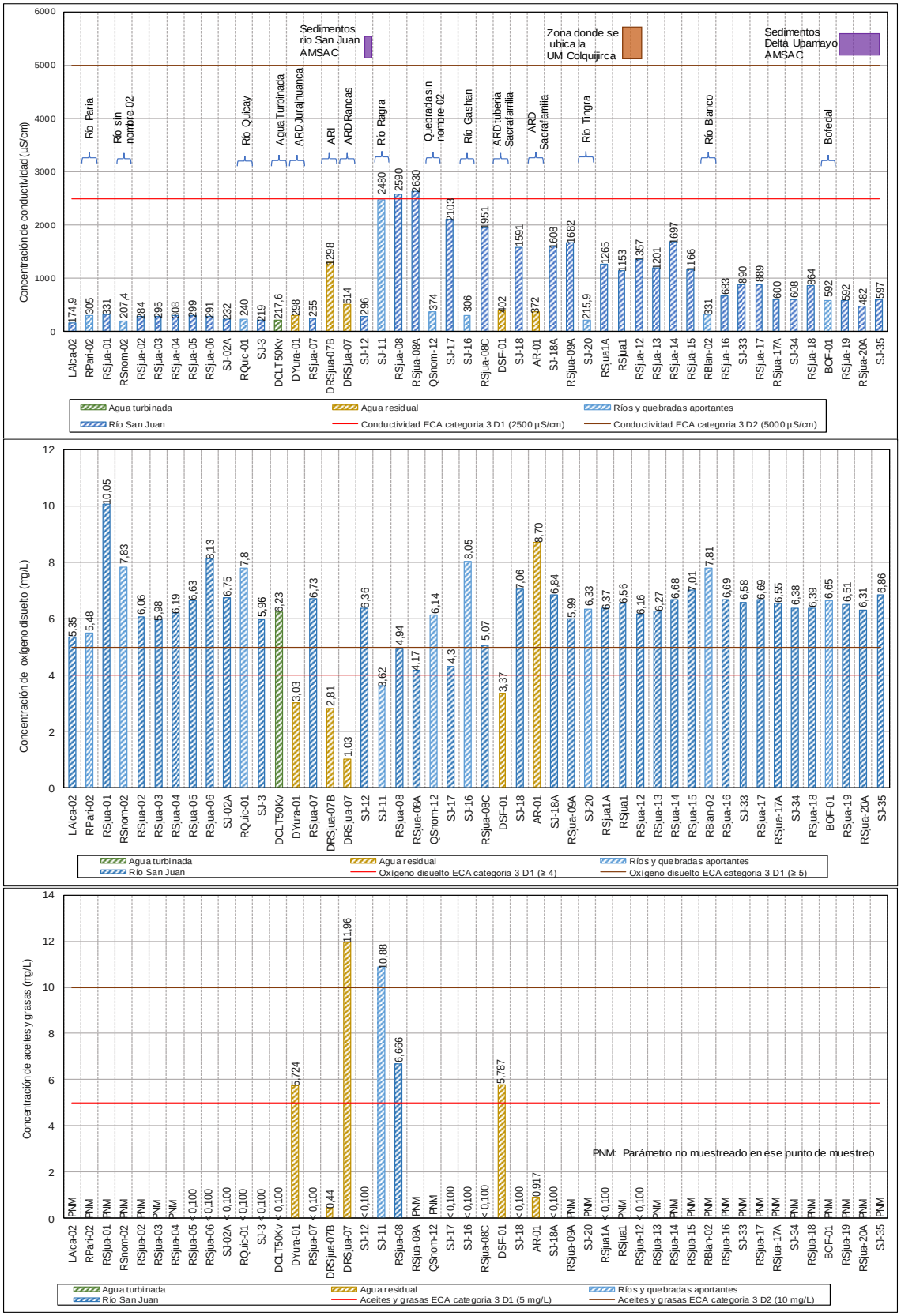


Figura 7.19. Valores de conductividad, y concentraciones de oxígeno disuelto y aceites y grasas de agua superficial comparados con los ECA para agua 2017, categoría 3 y valores de estos parámetros en agua turbinada y residual

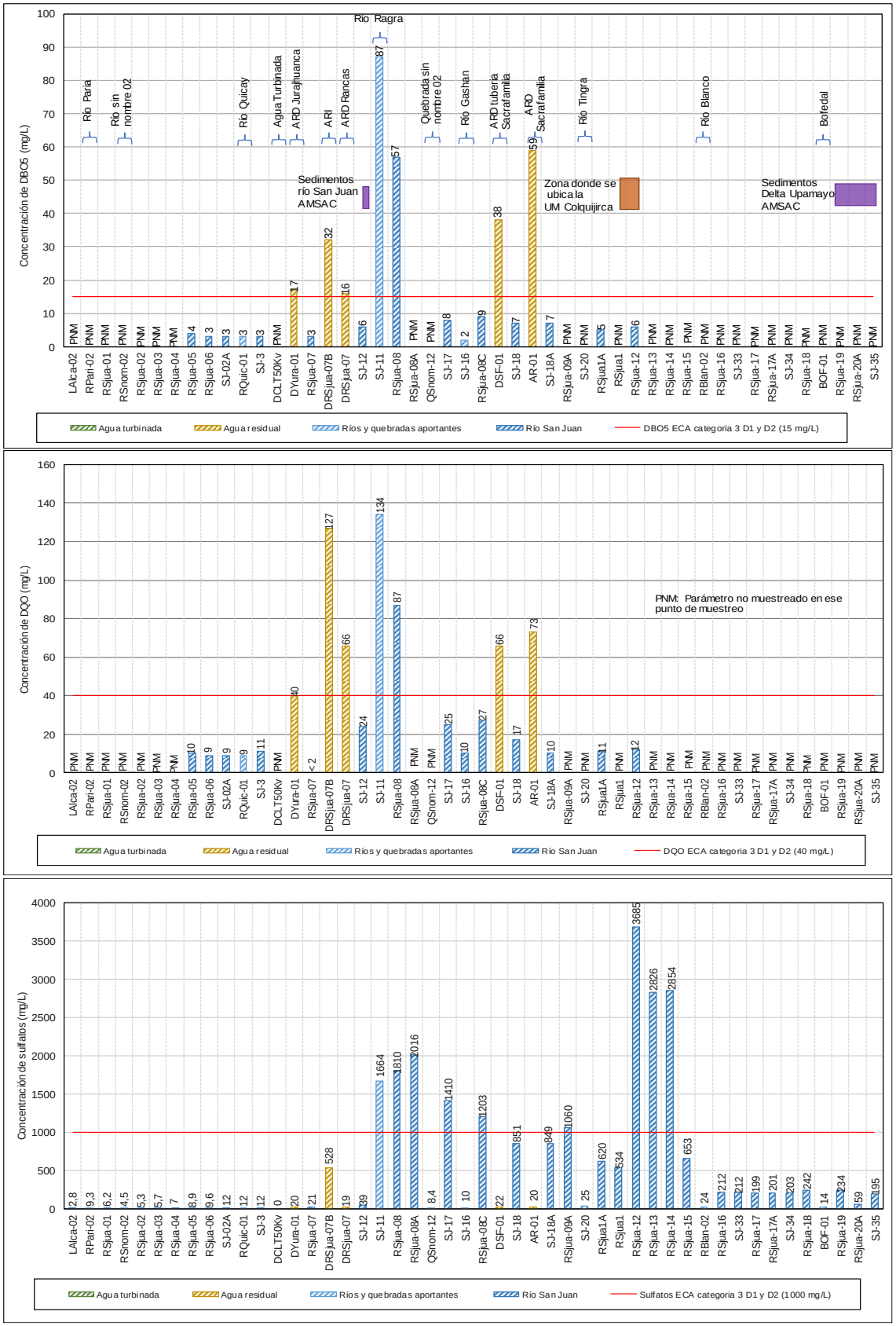


Figura 7.20. Concentraciones de DBO_5, DQO y sulfatos de agua superficial comparados con los ECA para agua 2017, categoría 3 y valores de estos parámetros en agua turbinada y residual

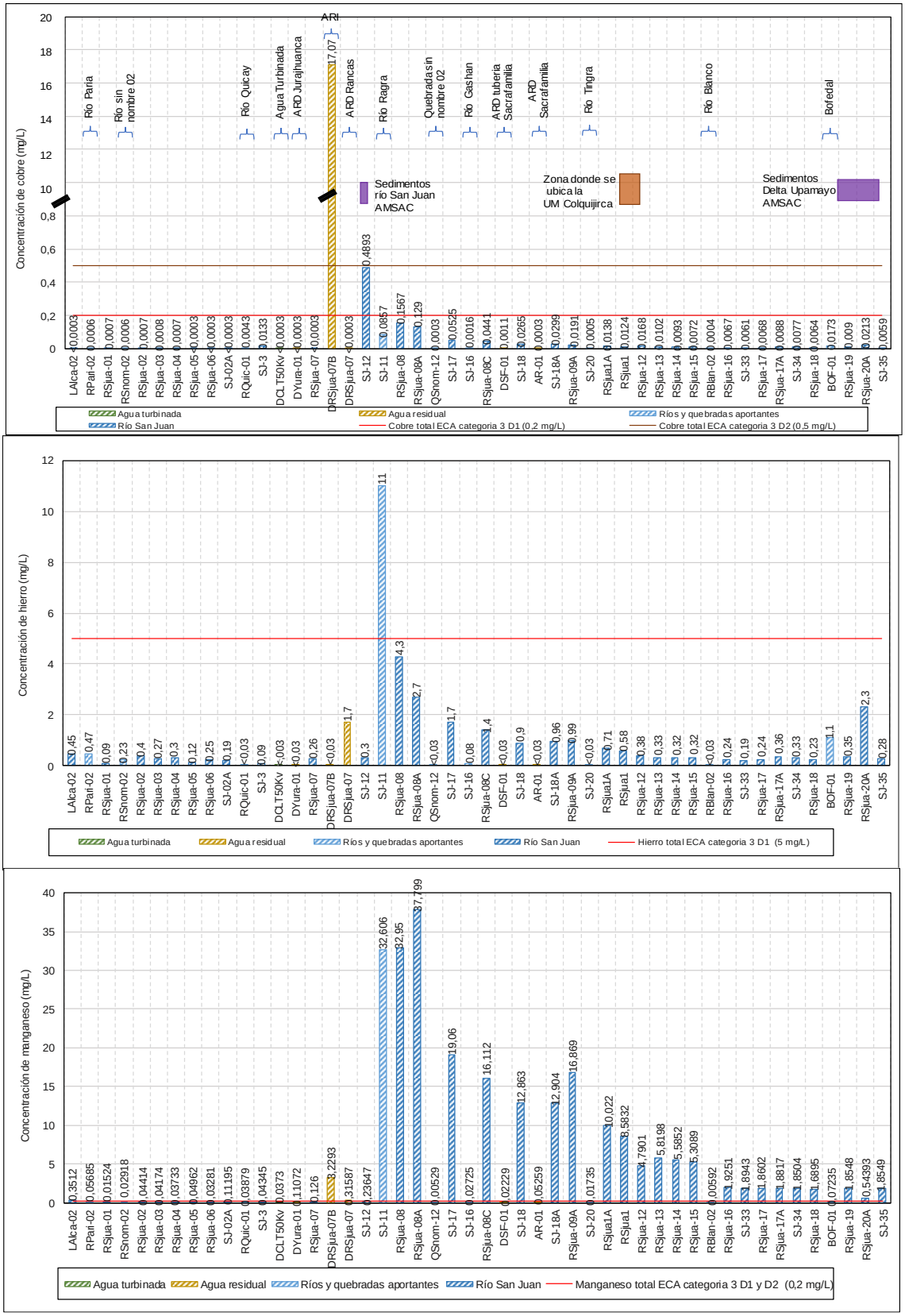


Figura 7.21. Concentraciones de cobre total, hierro total y manganeso total de agua superficial comparados con los ECA para agua 2017, categoría 3 y valores de estos parámetros en agua turbinada y residual

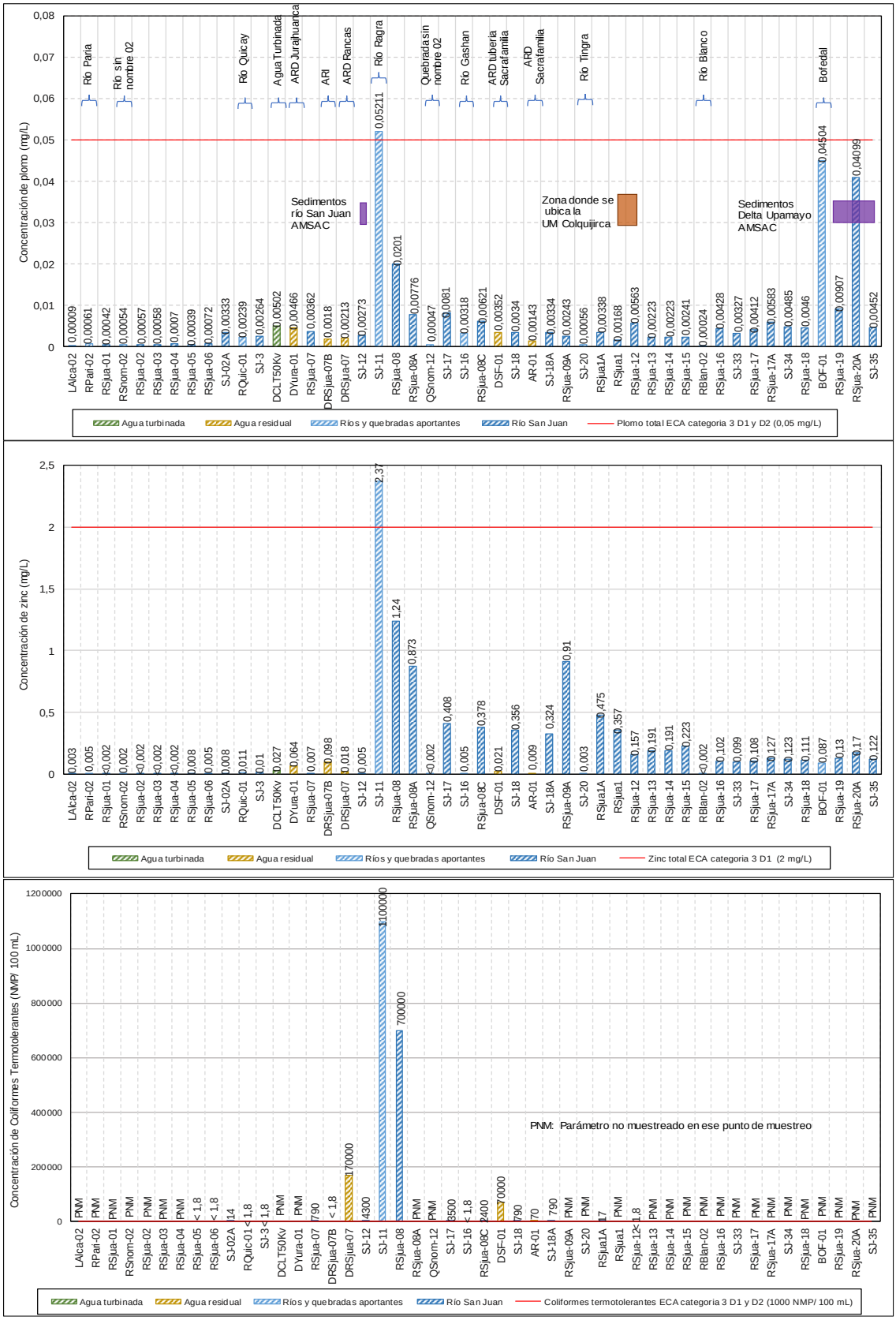


Figura 7.22. Concentraciones de plomo total, zinc total y coliformes termotolerantes de agua superficial comparados con los ECA para agua, categoría 3 y valores de estos parámetros en agua turbinada y residual

En las figuras anteriormente expuestas se observa que la parte alta del río San Juan (desde el punto LAlca-01 hasta el RSjua-07), río Quicay, río Gashan, río Tingra y río Blanco; los parámetros presentan bajas concentraciones y dentro de lo establecido en los ECA para agua del 2017, categoría 3; esto también se mencionó en el ítem de resultados y análisis de agua superficial, donde se presentó un esquema detallado de los ICARSH, observándose que la calidad del agua en el río San Juan (LAlca-02) hasta el punto RSjua-07 (ubicado antes de las descargas de las aguas residuales DRSjua-07 y DRSjua-07B), presentan calidad excelente y buena.

El manganeso es el único elemento que en todos los puntos de muestreo del río San Juan, después de la descarga del río Ragra, supera el valor establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3, pero presentando disminución conforme se incrementa la distancia desde el punto de descarga del río Ragra (Figura 7.23). Los demás metales (cobre, plomo y zinc) y conductividad también presentan disminución en la concentración y a la vez no superan a los valores establecidos en la norma en mención. Esta disminución es producto de la sedimentación, la cual es favorecida a la poca pendiente del río San Juan y a que los ríos aportantes como Gashan, Tingra y Blanco presentan bajas concentraciones de estos parámetros y ayudan a la dilución.

Como se mencionó anteriormente, después de la descarga del río Ragra, los parámetros conductividad, DBO_5, DQO, coliformes termotolerantes, sulfatos, cobre, hierro, manganeso, mercurio, plomo y zinc se incrementan en el agua, para posteriormente comenzar a disminuir desde el punto SJ-17 hasta los puntos finales SJ-35 y RSjua-19 (Figuras 7.20, 7.21, 7.22, 7.23).

Entre los puntos de muestreo RSjua-02 y el RSjua-06, se encuentran identificados 2 API (Figura 7.24) que contienen elementos metálicos superiores a los ECA para suelos, de uso agrícola. Estos API identificados como API-20 y API-22, fueron generados por los PAM coloniales SJ-PAM-20 (relave colonial Tauro 6) y SJ-PAM-22 (relave colonial canal Rancas) respectivamente; PAM que a la fecha de muestreo habrían sido removidos por la Compañía Minera Aurífera Aurex S.A.

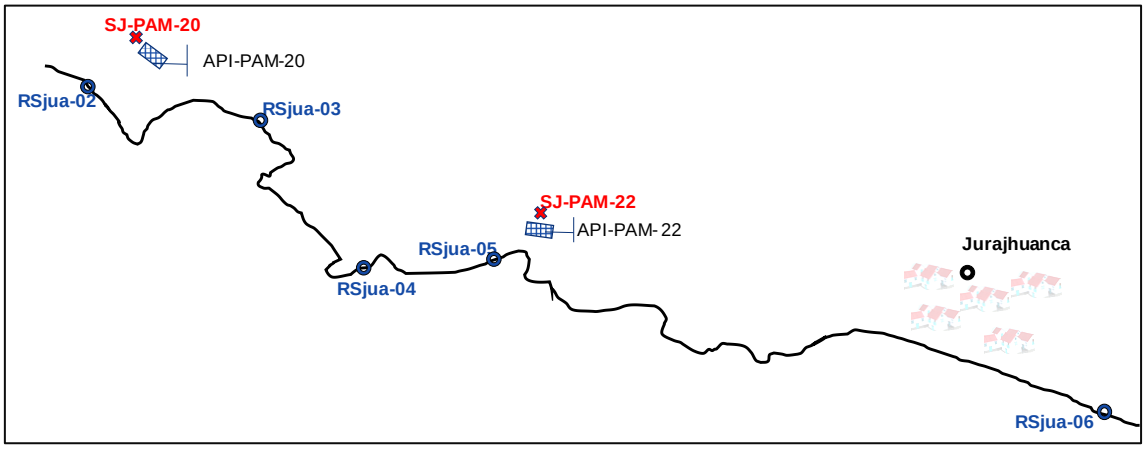


Figura 7.23. Esquema de la ubicación de los API-20 y API-22 respecto al río San Juan

A pesar que el API-PAM-20 y API-PAM-22, ubicados aproximadamente a 200 m y 80 m de la margen izquierda del río San Juan respectivamente, presentan metales que superaron los ECA de suelos, uso agrícola; se infiere que esos metales no llegan hasta el cuerpo de agua, ya que las concentraciones en el punto de muestreo RSjua-02 (aguas arriba de los API) y RSjua-06 (aguas abajo de los API) no presentaron variación (Figura 7.20, 7.21, 7.22, 7.23).

Cabe precisar que, la evaluación se realizó en época de estiaje; sin embargo, no se descarta su influencia en época de avenida, la cual por escorrentía superficial generadas por las lluvias arrastrarían los metales de los API hasta el río San Juan.

De acuerdo al análisis histórico de los datos proporcionados por la Autoridad Nacional del agua (ANA) desde el 2012 hasta el 2018 (monitoreos), en el punto RSjua-03 (RSjua-1, punto establecido por la ANA) muestra que las concentraciones de metales de cobre y manganeso, y conductividad y sulfatos siempre fueron bajas (Figura 7.24). Los resultados sistematizados de la ANA se presentan en el Anexo 5.

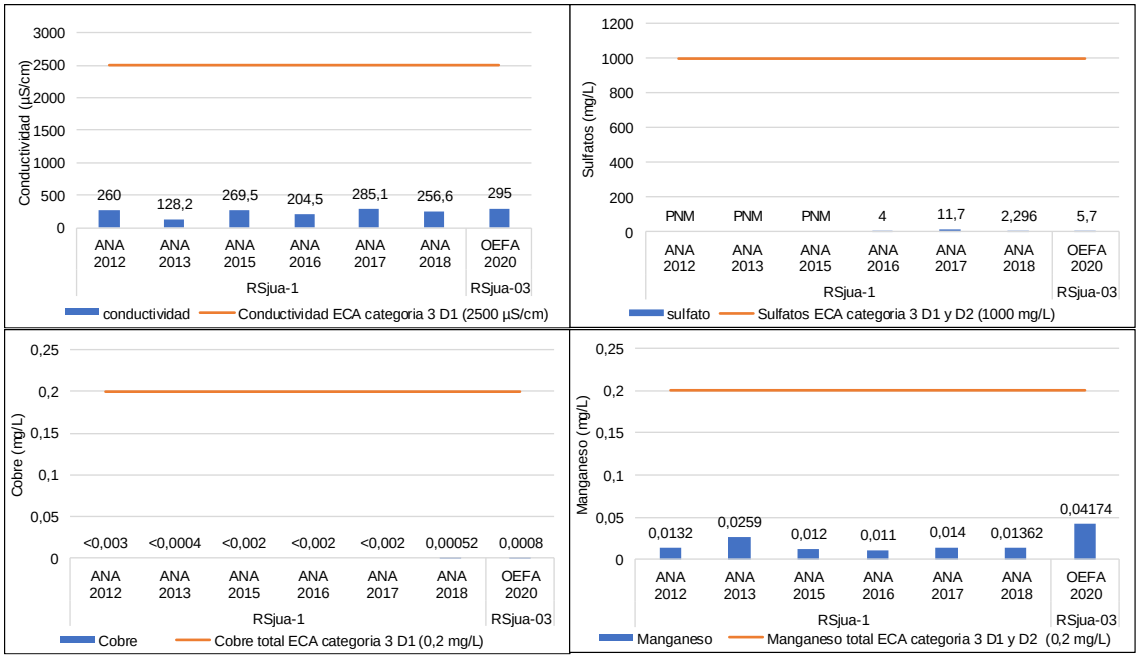


Figura 7.24. Valores históricos en conductividad, sulfatos, cobre y manganeso en el punto de muestreo RSjua-03

Las primeras fuentes de contaminación líquidas al entrar en contacto con el río San Juan, son las aguas turbinada (DCLT50Kv) y residual (DYura-01), los cuales presentaron parámetros con concentraciones y valores dentro de lo establecido en sus normas de comparación (Tabla 6.4 y Tabla 6.3 respectivamente); asimismo se aprecia que las concentraciones y valores de los parámetros de los puntos de agua superficial en el río San Juan SJ-3 (aguas arriba de la descarga del agua turbinada y residual) y RSjua-07 (aguas abajo de la descarga del agua turbinada y residual) se encuentran dentro de lo establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3 (Figura 7.25). Se, menciona que, en esos puntos se presentó un aumento en las concentraciones de coliformes termotolerantes y metales, sin llegar a superar lo establecido en las normas de comparación ni modificar su calidad de agua según el ICARHS (Tabla 7.2).

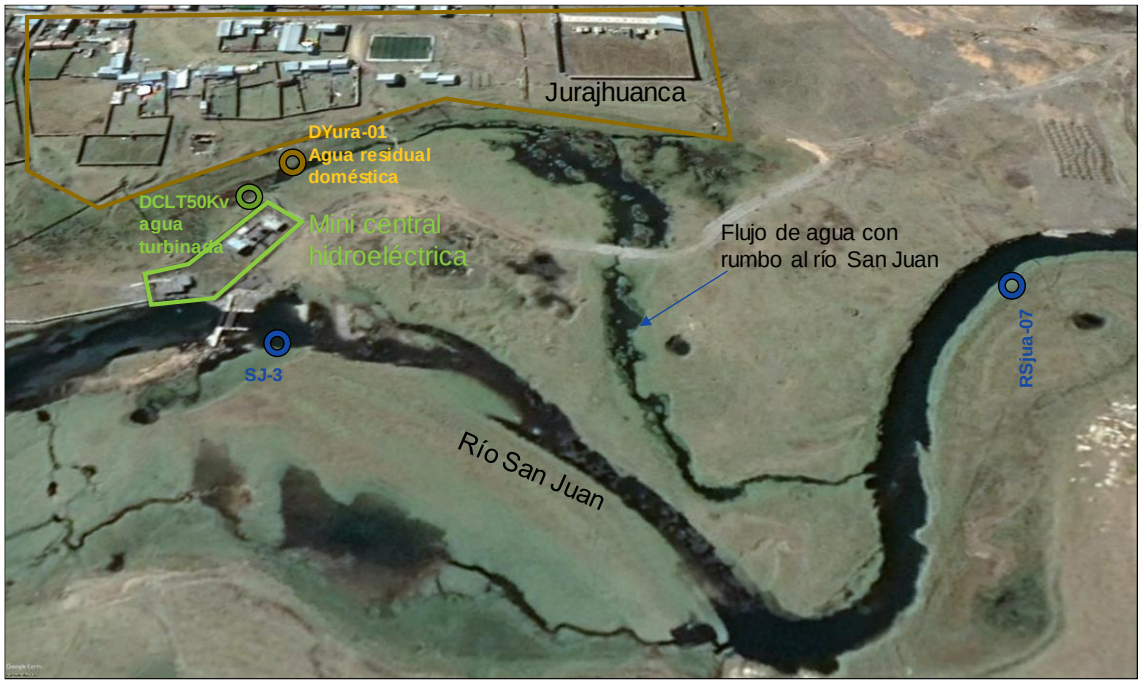


Figura 7.25. Ubicación de los puntos de muestreo DYura-01 y DCLT50Kv y de los puntos de agua superficial SJ-3 y RSjua-07 en el río San Juan

Tabla 7.2. Resultados de los puntos de muestreo de agua superficial SJ-3 y RSjua-07, de agua turbinada (DCLT50Kv) y agua residual (DYura-01)

Parámetros	Unidades	Río San Juan	Agua turbinada	Agua residual domestica	Río San Juan	ECA Categoría 3 (D.S. N.° 004-2017-MINAM)		LMP (D.S. N.° 003-2010-MINAM)	LMP (D.S. N.° 010-2010-MINAM)
		SJ-3	DCLT50Kv	DYura-01	RSjua-07	D1	D2		
pH	Uds. de pH	7,92	8,02	7,69	7,9	**6,5 – 8,5**	**6,5 – 8,4**	**6,5 – 8,5**	**6,0 – 9,0**
Conductividad eléctrica	µS/cm	219	217,6	298	255	**2500**	**5000**	--	--
Oxígeno disuelto	mg/L	5,96	6,23	3,03	6,73	**≥ 4**	**≥ 5**	--	--
Aceites y grasas	mg/L	< 0.100	< 0.100	5,724	< 0.100	**5**	**10**	**20**	**20**
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)	mg/L	3	-	17	3	**15**	**15**	**100**	--
Demanda química de oxígeno	mg/L	11	-	40	< 5	**40**	**40**	**200**	--
Sulfatos	mg/L	12	13	20	21	**1000**	**1000**	--	--
Coliformes termotolerantes	NMP/100 Ml	< 1.8	-	-	790	**1000**	**1000**	**10000**	--
Aluminio Total	mg/L	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	**5**	**5**	--	--
Arsénico Total	mg/L	0,0067	0,01024	0,01097	0,00817	**0,1**	**0,2**	--	**0,1**
Bario Total	mg/L	0,0221	0,0178	0,0376	0,0281	**0,7**	--	--	--
Berilio Total	mg/L	< 0.00001	< 0.00001	< 0.00001	< 0.00001	**0,1**	**0,1**	--	--
Boro Total	mg/L	0,006	< 0.002	< 0.002	< 0.002	**1**	**5**	--	--
Cadmio Total	mg/L	0,00002	0,00004	0,00011	0,00003	**0,01**	**0,05**	--	**0,05**
Cobalto Total	mg/L	< 0.00003	< 0.00003	< 0.00003	< 0.00003	**0,05**	**1**	--	--
Cobre Total	mg/L	0,0133	< 0.0003	< 0.0003	< 0.0003	**0,2**	**0,5**	--	**0,5**
Cromo Total	mg/L	0,001	0,007	0,007	< 0.001	**0,1**	**1**	--	--
Hierro Total	mg/L	0,09	< 0.03	< 0.03	0,26	**5**	--	--	--
Litio Total	mg/L	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	**2,5**	**2,5**	--	--
Magnesio Total	mg/L	3,49	3,05	6,55	5,61	--	**250**	--	--
Manganeso Total	mg/L	0,04345	0,0373	0,11072	0,126	**0,2**	**0,2**	--	--

Parámetros	Unidades	Río San Juan	Agua turbinada	Agua residual domestica	Río San Juan	ECA Categoría 3 (D.S. N.° 004-2017-MINAM)		LMP (D.S. N.° 003-2010-MINAM)	LMP (D.S. N.° 010-2010-MINAM)
		SJ-3	DCLT50Kv	DYura-01	RSjua-07	D1	D2		
Mercurio Total	mg/L	0,00079	0,000142	< 0.000070	0,000074	**0,001**	**0,01**	--	**0,002**
Níquel Total	mg/L	< 0.0009	0,0024	0,0026	< 0.0009	**0,2**	**1**	--	--
Plomo Total	mg/L	0,00264	0,00502	0,00466	0,00362	**0,05**	**0,05**	--	**0,2**
Selenio Total	mg/L	< 0.00004	< 0.00004	< 0.00004	< 0.00004	**0,02**	**0,05**	--	--
Zinc Total	mg/L	0,01	0,027	0,064	0,007	**2**	**24**	--	**1,5**

«-»: Parámetro no analizado
«--»: No existe valor en la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales o en los LMP
ECA para agua, categoría 3 (Decreto Supremo N.° 004-2017-MINAM) D1: Riego de vegetales, D2: Bebida de animales
Decreto Supremo N.° 003-2010- MINAM Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales
Decreto Supremo N.° 010-2010- MINAM Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero - metalúrgicas

El primer cambio de la calidad del agua en el río San Juan según el ICARHS se da después de la descarga de las aguas residuales DRSjua-07 (agua residual doméstica del centro poblado Rancas) y DRSjua-07B (agua residual industrial, pero que no se pudo determinar su procedencia), pasando de calidad excelente (punto RSjua-07) a buena (punto SJ-12), ver Figura 7.26.



Figura 7.26. Ubicación de los puntos de muestreo DRSjua-07 y DRSjua-07B y de los puntos de agua superficial RSjua-07 y SJ-12 en el río San Juan

En la Figura 7.26 se muestra la distribución de los puntos de agua residual doméstica DRSjua-07 (LMP 003-2010), agua residual industrial DRSjua-07B (LMP 010-2010) y puntos en el río San Juan RSjua-07 (aguas arriba de las descargas) y SJ-12 (aguas debajo de las descargas). Mientras que, en la Tabla 7.3 se presenta los resultados de estos puntos comparados con sus normativas correspondientes.

Tabla 7.3. Comparación de resultados de los puntos de muestreo de agua superficial, de agua residual doméstica y agua residual industrial, con sus normtivas respectivas

Parámetros	Unidades	Río San Juan	Agua residual	Agua residual doméstica	Río San Juan	ECA Categoría 3 D.S. N.° 004-2017-MINAM		LMP D.S. N.° 003-2010-MINAM	LMP D.S. N.° 010-2010-MINAM
		RSjua-07	DRSjua-07B	DRSjua-07	SJ-12	D1	D2		
pH		7,9	7,72	7,28	8,01	**6,5 – 8,5**	**6,5 – 8,4**	**6,5 – 8,5**	**6,0 – 9,0**
Conductividad eléctrica	µS/cm	255	1298	514	296	**2500**	**5000**	--	--
Oxígeno disuelto	mg/L	6,73	2,81	1,03	6,36	**≥ 4**	**≥ 5**	--	--
Aceites y grasas	mg/L	< 0.100	0,44	11,96	< 0.100	**5**	**10**	**20**	**20**
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)	mg/L	3	32	16	6	**15**	**15**	**100**	--
Demanda química de oxígeno	mg/L	< 5	127	66	24	**40**	**40**	**200**	--
Sulfatos	mg/L	21	528	19	39	**1000**	**1000**	--	--
Coliformes termotolerantes	NMP/100 Ml	790	< 1.8	170000	4300	**1000**	**1000**	**10000**	--
Aluminio Total	mg/L	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	**5**	**5**	--	--
Arsénico Total	mg/L	0,00817	0,0071	0,00946	0,00836	**0,1**	**0,2**	--	**0,1**
Bario Total	mg/L	0,0281	0,0708	0,0759	0,0253	**0,7**	--	--	--
Berilio Total	mg/L	< 0.00001	< 0.00001	< 0.00001	< 0.00001	**0,1**	**0,1**	--	--
Boro Total	mg/L	< 0.002	0,004	< 0.002	0,005	**1**	**5**	--	--
Cadmio Total	mg/L	0,00003	0,00064	0,00004	0,00004	**0,01**	**0,05**	--	**0,05**
Cobalto Total	mg/L	< 0.00003	0,08232	< 0.00003	0,0025	**0,05**	**1**	--	--
Cobre Total	mg/L	< 0.0003	17,07	< 0.0003	0,4893	**0,2**	**0,5**	--	**0,5**
Cromo Total	mg/L	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	**0,1**	**1**	--	--
Hierro Total	mg/L	0,26	< 0.03	1,7	0,3	**5**	--	--	--
Litio Total	mg/L	< 0.0001	0,0004	< 0.0001	0,0007	**2,5**	**2,5**	--	--
Magnesio Total	mg/L	5,61	47,4	12,3	7,51	--	**250**	--	--
Manganeso Total	mg/L	0,126	3,2293	0,31587	0,23647	**0,2**	**0,2**	--	--
Mercurio Total	mg/L	0,000074	0,000655	< 0.000070	< 0.000070	**0,001**	**0,01**	--	**0,002**
Níquel Total	mg/L	< 0.0009	0,0693	< 0.0009	0,0014	**0,2**	**1**	--	--
Plomo Total	mg/L	0,00362	0,0018	0,00213	0,00273	**0,05**	**0,05**	--	**0,2**
Selenio Total	mg/L	< 0.00004	0,00034	< 0.00004	< 0.00004	**0,02**	**0,05**	--	--
Zinc Total	mg/L	0,007	0,098	0,018	0,005	**2**	**24**	--	**1,5**

«-»: Parámetro no analizado
«--»: No existe valor en la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales o en los LMP
ECA para agua, categoría 3 (Decreto Supremo N.° 004-2017-MINAM) D1: Riego de vegetales, D2: Bebida de animales
Decreto Supremo N.° 003-2010- MINAM Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales
Decreto Supremo N.° 010-2010- MINAM Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero - metalúrgicas

: Superan los valores de la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales
: Supera un valor en la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales
: Resultado que supera los valores establecidos en los LMP D.S. N.° 003-2010- MINAM
: Resultado que supera los valores establecidos en los LMP D.S. N.° 010-2010- MINAM

En la Tabla 7.3 se observa que el punto de muestreo DRSjua-07 (facies bicarbonatada cálcica), presentó concentración de coliformes termotolerantes de 170000 NMP/100 mL, el cual supera al valor establecido para este parámetro en los LMP 003-2010 (10000 NMP/100 mL), y el punto DRSjua-07B (sulfatada cálcica – magnésica) presentó concentración de cobre total (17,07 mg/L) superior a lo establecido en los LMP 010-2010 (0,5 mg/L); así como una concentración alta de manganeso total (3,2293 mg/L).

El punto SJ-12, en comparación con el RSjua-07, presentó valores que superan los ECA para agua 2017, categoría 3, en los parámetros coliformes totales (4300 NMP/100 mL), cobre total (0,4893 mg/L) y manganeso total (0,23647 mg/L), los cuales presentaron concentraciones altas en las aguas residuales, relacionándose el incremento de coliformes

termotolerantes al agua residual doméstica y el incremento de cobre y manganeso total al agua residual industrial (Figura 7.27).

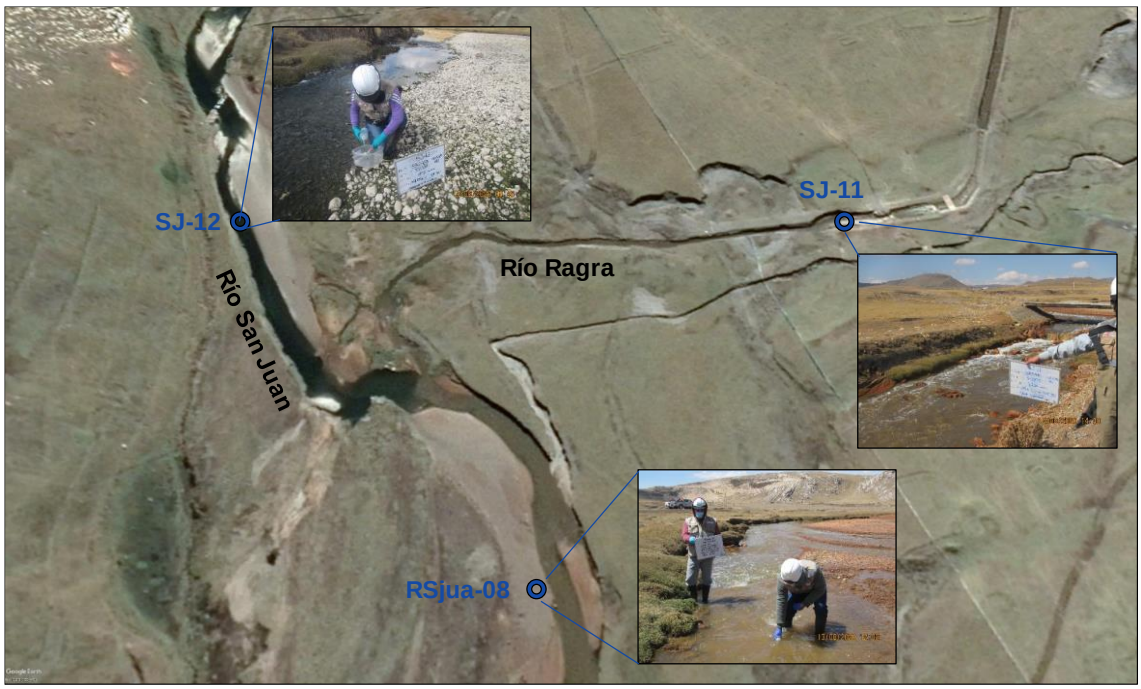


Figura 7.27. Ubicación de los puntos de muestreo SJ-11, SJ-12 y RSjua-08

En la Figura 7.27 se muestra el punto SJ-12 (ubicado en el río San Juan, antes de la confluencia con el río Ragra) el cual presentó calidad de agua malo y tuvo concentraciones de coliformes totales (4300 NMP/100 mL), cobre total (0,4893 mg/L) y manganeso total (0,23647 mg/L) fuera de lo establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3; el punto SJ-11 (río Ragra) con calidad de agua pésimosegún el ICARSH presentó concentraciones de oxígeno disuelto (3,62 mg/L), aceites y grasas (10,88 mg/L), DBO_5 (87 mg/L), DQO (134 mg/L), coliformes termotolerantes (1100000 NMP/100 mL) y manganeso total (32,606 mg/L), plomo total (0,05211 mg/L) y zinc total (2,37 mg/L) fuera de lo establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3 y facies sulfatadas cálcicas y magnésicas; y el punto RSjua-08 (ubicado en el río San Juan a 500 m aproximados de la descarga del río Ragra) presentó calidad de agua pésimomala y tuvo concentraciones de conductividad (2590 µS/cm), oxígeno disuelto (4,94 mgL), aceites y grasas (6,666 mg/L), DBO_5 (57 mg/L), DQO (87 mg/L), sulfatos (1 810 mg/L), coliformes termotolerantes (700000 NMP/100 mL) y manganeso (32,97 mg/L) fuera de lo establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3, y además presentó cambio de facies de bicarbonatadas cálcicas a sulfatadas cálcicas y magnésicas, en el río San Juan (Tabla 7.4).

Ese cambio de calidad del agua en el río San Juan es producido por las aguas sulfatadas y con alto contenido de metales del río Ragra, río que llega afectado por las actividades mineras, pasivos ambientales mineros y centros poblados (Empresa Administradora Cerro S.A.C., Planta de Óxidos S.A.C., PAM depósito de desmonte Excelsior y depósito de relave Quiulacocha administrados por Activos Mineros S.A.C., sedimentos fluvio-aluvial mezclado con residuos mineros dispuestos en ambas márgenes del río Ragra y descargas de aguas residuales domésticas de los centros poblados ubicados en la provincia Cerro de Pasco y Compañía Minera Aurífera Aurex S.A., todos estos contribuyen en la disminución de la calidad del agua del río Ragra, mencionado en el Plan de cierre integral de pasivos de origen minero río San Juan y delta Upamayo).

Tabla 7.4. Resultados de los puntos de muestreo de agua superficial en el río San Juan SJ-12, RSjua-08 y río Ragra SJ-11, comparado con los ECA para agua 2017, categoría 3

Parámetros	Unidades	Río San Juan	Río Ragra	Río San Juan	ECA Categoría 3 D.S. N.° 004-2017-MINAM	
		SJ-12	SJ-11	RSjua-08	D1	D2
pH		8,01	7,71	7,81	**6,5 – 8,5**	**6,5 – 8,4**
Conductividad eléctrica	µS/cm	296	2480	2590	**2500**	**5000**
Oxígeno disuelto	mg/L	6,36	3,62	4,94	**≥ 4**	**≥ 5**
Aceites y grasas	mg/L	< 0,100	10,88	6,666	**5**	**10**
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)	mg/L	6	87	57	**15**	**15**
Demanda química de oxígeno	mg/L	24	134	87	**40**	**40**
Sulfatos	mg/L	39	1664	1810	**1000**	**1000**
Coliformes termotolerantes	NMP/100 Ml	4300	1100000	700000	**1000**	**1000**
Aluminio Total	mg/L	< 0.002	0,264	0,026	**5**	**5**
Arsénico Total	mg/L	0,00836	0,03181	0,01602	**0,1**	**0,2**
Bario Total	mg/L	0,0253	0,0402	0,0353	**0,7**	**--**
Berilio Total	mg/L	< 0.00001	< 0.00001	< 0.00001	**0,1**	**0,1**
Boro Total	mg/L	0,005	0,042	0,04	**1**	**5**
Cadmio Total	mg/L	0,00004	0,0088	0,00556	**0,01**	**0,05**
Cobalto Total	mg/L	0,0025	0,00302	0,00357	**0,05**	**1**
Cobre Total	mg/L	0,4893	0,0857	0,1567	**0,2**	**0,5**
Cromo Total	mg/L	< 0.001	< 0.001	< 0.001	**0,1**	**1**
Hierro Total	mg/L	0,3	11	4,3	**5**	**--**
Litio Total	mg/L	0,0007	0,104	0,115	**2,5**	**2,5**
Magnesio Total	mg/L	7,51	178	194	**--**	**250**
Manganeso Total	mg/L	0,23647	32,606	32,95	**0,2**	**0,2**
Mercurio Total	mg/L	< 0.000070	0,000241	0,000106	**0,001**	**0,01**
Níquel Total	mg/L	0,0014	0,0067	0,0051	**0,2**	**1**
Plomo Total	mg/L	0,00273	0,05211	0,0201	**0,05**	**0,05**
Selenio Total	mg/L	< 0.00004	0,0004	0,0003	**0,02**	**0,05**
Zinc Total	mg/L	0,005	2,37	1,24	**2**	**24**

«--»: No existe valor en la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales o en los LMP
ECA para agua, categoría 3 (Decreto Supremo N.° 004-2017-MINAM) D1: Riego de vegetales, D2: Bebida de animales
Decreto Supremo N.° 003-2010- MINAM Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales
Decreto Supremo N.° 010-2010- MINAM Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero - metalúrgicas

: Fuera de los valores de la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales
: Fuera de un valor en la Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

En la Figura 7.28 se muestran los valores históricos de conductividad, coliformes termotolerantes, sulfatos, manganeso, plomo y zinc en los puntos de muestreo SJ-02A, SJ-11 y RSjua-08A. Los datos de 2012, 2013, 2015, 2016, 2017 y 2019 pertenecen a los monitoreos participativos de la calidad del agua superficial en la subcuenca del río San Juan realizados por la ANA en los puntos de muestreo RSjua-2 (el cual se encuentra a unos 100 m aproximadamente del punto SJ-02A muestreado por el OEFA), RRagr-3 (el cual se encuentra a unos 100 m aproximadamente del punto SJ-02A muestreado por el OEFA), RSjua-3 (el cual se encuentra a unos 600 m aproximadamente del punto RSjua-08A muestreado por el OEFA), tal como se muestra en la Figura 7.29.

El punto SJ-02A (río San Juan aguas arriba de la confluencia con el río Ragra) presenta históricamente los menores valores de concentraciones en los parámetros conductividad, coliformes termotolerantes, sulfatos, manganeso, plomo y zinc; el punto SJ-11 (río Ragra) históricamente presenta las mayores concentraciones para los parámetros mencionados, y el punto RSjua-08A (río San Juan aguas abajo de la confluencia con el río Ragra), sufre incremento de la concentración de los parámetros después de la descarga del río Ragra.

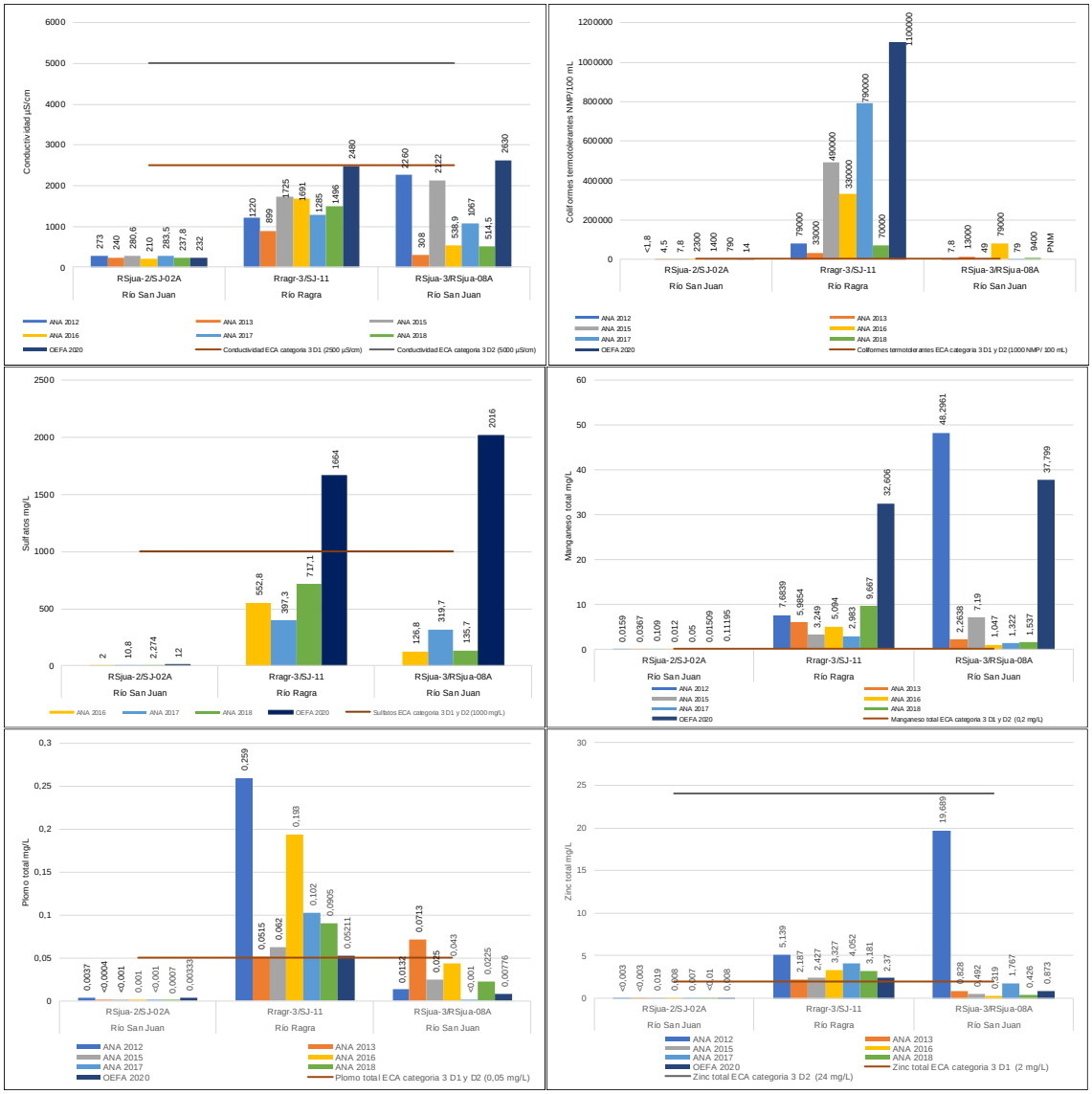


Figura 7.28. Resultados históricos (ANA-2012 a 2018 y OEFA-2020) de conductividad, coliformes termotolerantes, sulfatos, manganeso, plomo y zinc en los puntos de muestreo SJ-02A, SJ11 y RSjua-08A

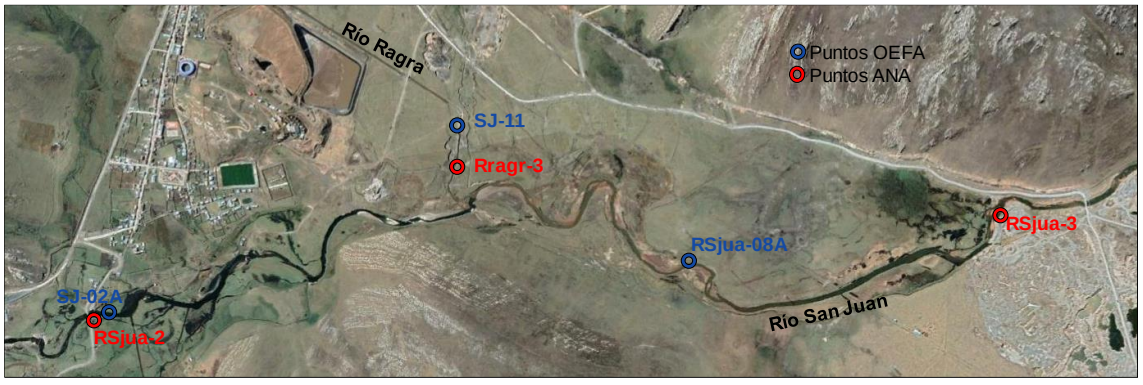


Figura 7.29. Ubicació de los puntos de muestreo SJ-02A, SJ11 y RSjua-08A

En las Figura 7.29 y 7.30 se aprecia que entre los puntos de muestreo de agua superficial RSjua-08C y SJ-18A existen 2 puntos de vertimiento de aguas residuales domésticas, el

primero DFS-01 (agua que sale de una tubería rota, en el poblado Sacrafamilia) y el segundo AR-01 (punto de vertimiento de las aguas residuales tratadas del poblado Sacrafamilia). Las aguas residuales en el punto de muestreo DFS-01 (caudal igual a 0,736 L/s) presentaron concentraciones altas de coliformes termotolerantes (70000 NMP/100 mL) que superan lo establecido en los valores LMP 003-2010, pese a su alta concentración no influye en la calidad de agua del río San Juan, debido a que su caudal es relativamente muy inferior al caudal del río San Juan (582 L/s, punto SJ-18) registrado aguas abajo de esta descarga.

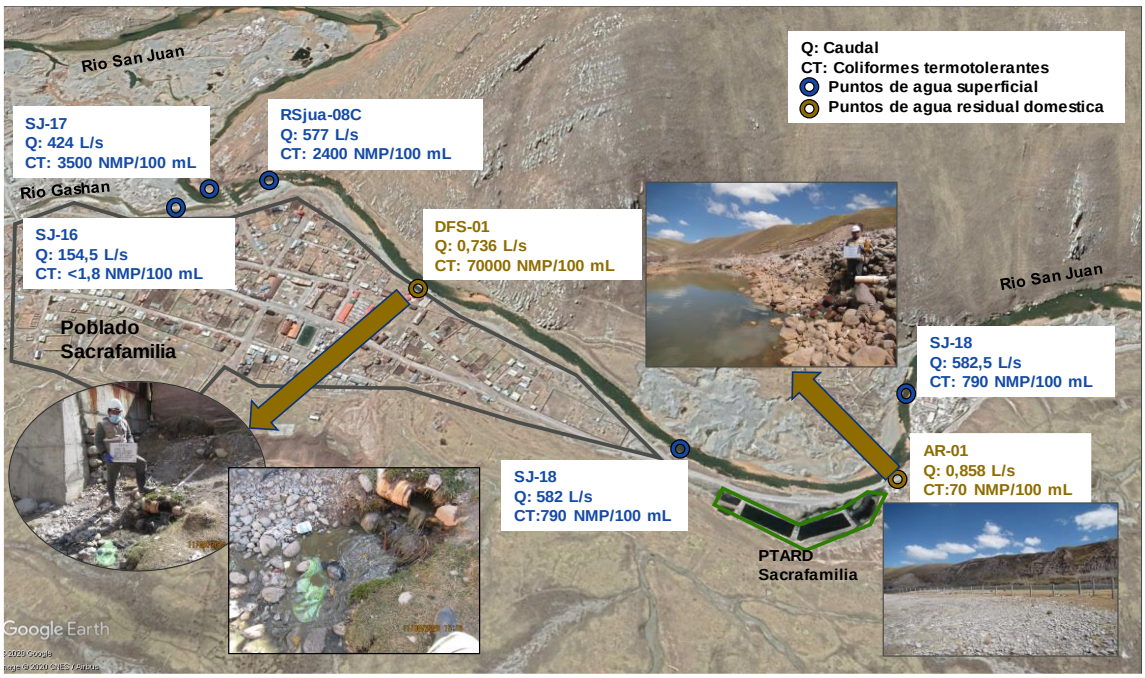


Figura 7.30. Esquema de ubicación de puntos de las aguas residuales domésticas DFS-01 y AR-01 y aguas superficiales

Los sulfatos al igual que los metales y conductividad eléctrica, también disminuyen conforme avanzan el recorrido del río San Juan, observándose un incremento en su concentración en los puntos RSjua-12 (3685 mg/L), RSjua-13 (2826 mg/L) y RSjua-14 (2854 mg/L) ubicadas aguas abajo de la unidad minera Colquijirca, para volver a disminuir desde el punto RSjua-15 (653 mg/L), tal como se muestra en la Figura 7.31.

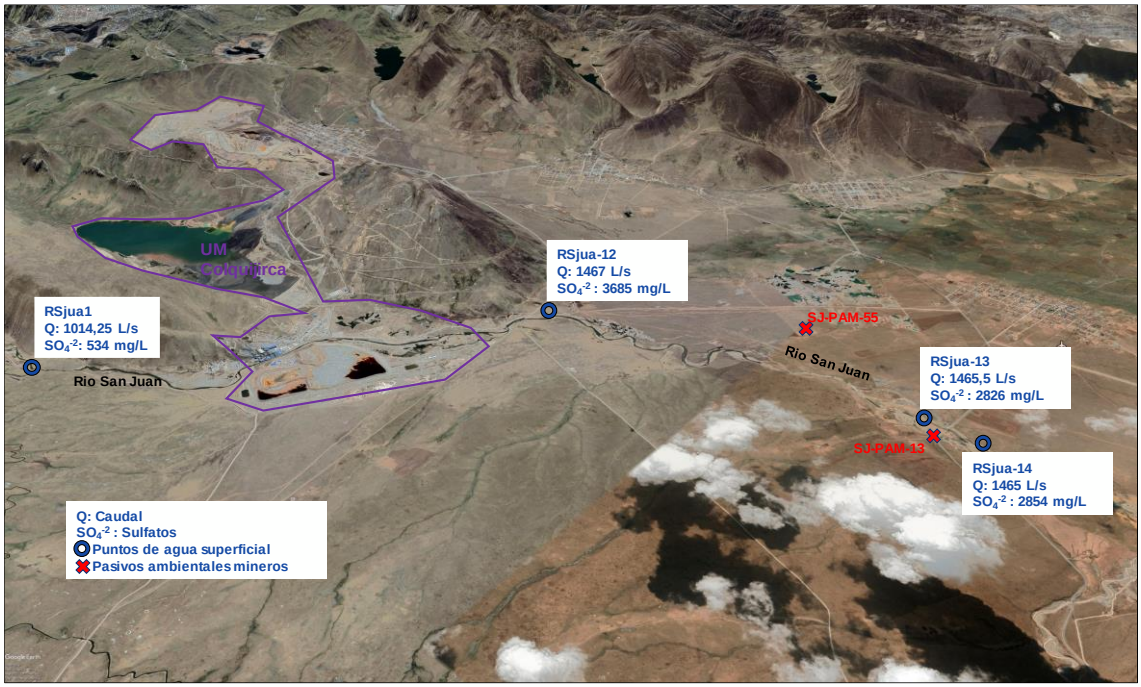


Figura 7.31. Esquema de ubicación de puntos de las aguas superficiales RSjua1, RSjua-12, RSjua-13 y RSjua-14

En la Figura 7.31 se observa que el sulfato se incrementa de 535 mg/L en el punto RSjua1 a 3685 mg/L en el punto RSjua-12, en estos puntos también se observa aumento de caudal de 1014,25 L/s a 1467 L/s; el aumento de conductividad puede ser causado por las aguas residuales de las actividades y procesos de la unidad minera Colquijirca, ya que los sulfatos son liberados de las rocas cuando son expuestas y posteriormente llegan a cuerpos de agua (Campos-Sanchez, 2016). Se precisa que, el equipo evaluador durante el muestreo a la subcuenca del río San Juan, no contaba con el permiso para acceder a las áreas de la unidad minera Colquijirca; por tanto, no se pudo muestrear las aguas residuales de esta unidad.

En relación a los sedimentos, en la Figura 7.32A, se muestra la distribución de puntos en el río San Juan y sus tributarios, orientados desde su naciente (RSjua-01) hasta la desembocadura en el delta Upamayo (SJ-35), y la predominancia del calcio en la mayoría de puntos (23 de 34 muestras) los cuales están asociados a la litología dominante de rocas calizas (presencia de carbonato de calcio) evidenciadas por los minerales como la calcita y plagioclasas (Figura 7.2), este dominio de rocas calizas define el potencial de hidrógeno alcalino del río San Juan que varió de 7,28 (RSjua-03) a 9,56 (RSjua-17) unidades de pH; sin embargo, se observó mayor porcentaje de hierro en 11 de 34 muestras (RSjua-01, QSnom-16, RQuic-01, RSjua-07, SJ-12, SJ-10, RSjua-08, RSjua-08A, QSnom-12, SJ-18 y RSjua-20A), tal como se muestra en la Figura 7.33B, de los cuales las mayores concentraciones de metales y metaloides se presentaron en 8 puntos (RQuic-01, RSjua-07, SJ-12, SJ-10, RSjua-08, RSjua-08A, SJ-18 y RSjua-20A), en comparación a los valores obtenidos en la naciente del río San Juan (RSjua-01), quebrada s/n 16 (QSnom-16) y quebrada s/n 12 (QSnom-12), las cuales no presentaron evidencia de haber sido influenciadas por actividades mineras (Figura 7.32A).

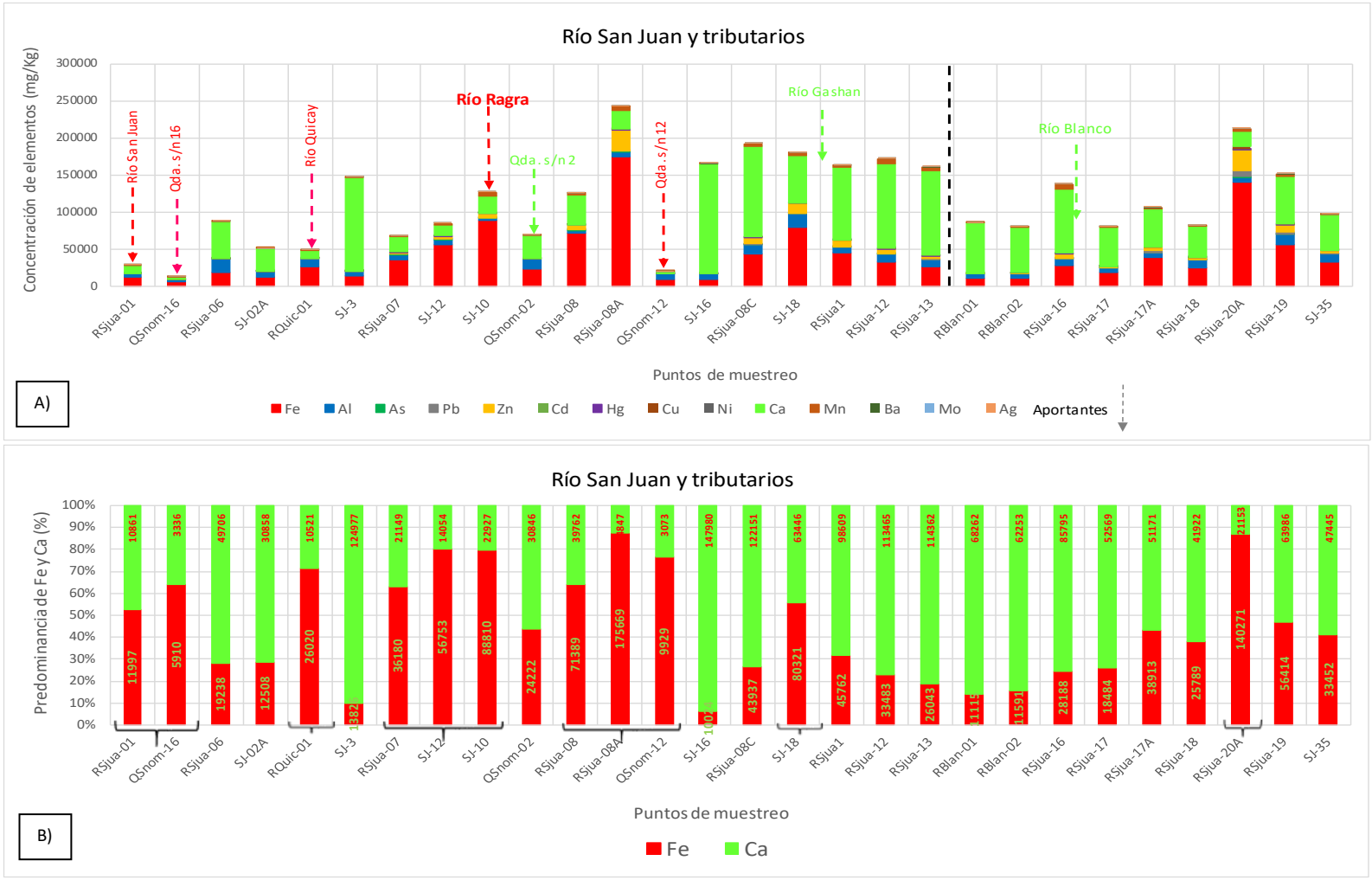


Figura 7.32. A) Comparación de las concentraciones de Fe, Al, As, Pb, Zn, Cd, Hg, Cu, Ni, Ca, Mn, Ba, Mo, Ag entre los sedimentos del río San Juan y sus tributarios, y B) predominancia de hierro y calcio (%)

En la Figura 7.33, se muestra los 8 puntos donde se presentaron las mayores concentraciones de hierro, aluminio, arsénico, plomo, zinc, cadmio, mercurio, cobre, níquel, calcio, manganeso, bario, molibdeno y plata, están ubicados aguas abajo de actividades mineras o poblacionales, siendo estos:

- El punto RQuic-01 (aguas abajo de la UM Quicay)
- El punto RSjua-07 (aguas de UM Quicay, descarga de aguas residuales poblacionales [DRSjuan-07 y DRSjuan-07B]–Comunidad San Juan de Rancas y Jurajhuanca- y aproximadamente a 20 metros de la antigua desembocadura del río Ragra)
- El punto SJ-12 (corresponde al depósito de sedimentos del río San Juan, sector contemplado en el Plan de cierre integral)
- El punto SJ-10 (aguas abajo de la descarga de aguas residuales de la provincia Cerro de Pasco, las actividades mineras del Empresa Administradora Cerro S.A.C., los pasivos ambientales mineros depósito de desmonte Excelsior, depósito de relave Quiulacocha administrado por Activos Mineros S.A.C. y los sedimentos fluvio-aluviales mezclados con residuos mineros dispuestos en ambos márgenes del río Ragra (Ragra1, Ragra2, Ragra3, Ragra4, Ragra5, Ragra6),
- Los puntos RSjua-08 y RSjua-08A (aguas abajo de la confluencia con río Ragra)
- El punto SJ-35 (depósitos de sedimentos delta Upamayo)
- El punto SJ-18 (ubicado aguas abajo de las actividades extractivas de cal y la descarga de agua residuales doméstica [DSF-01 y AR-01] poblado de Sacrafamilia)

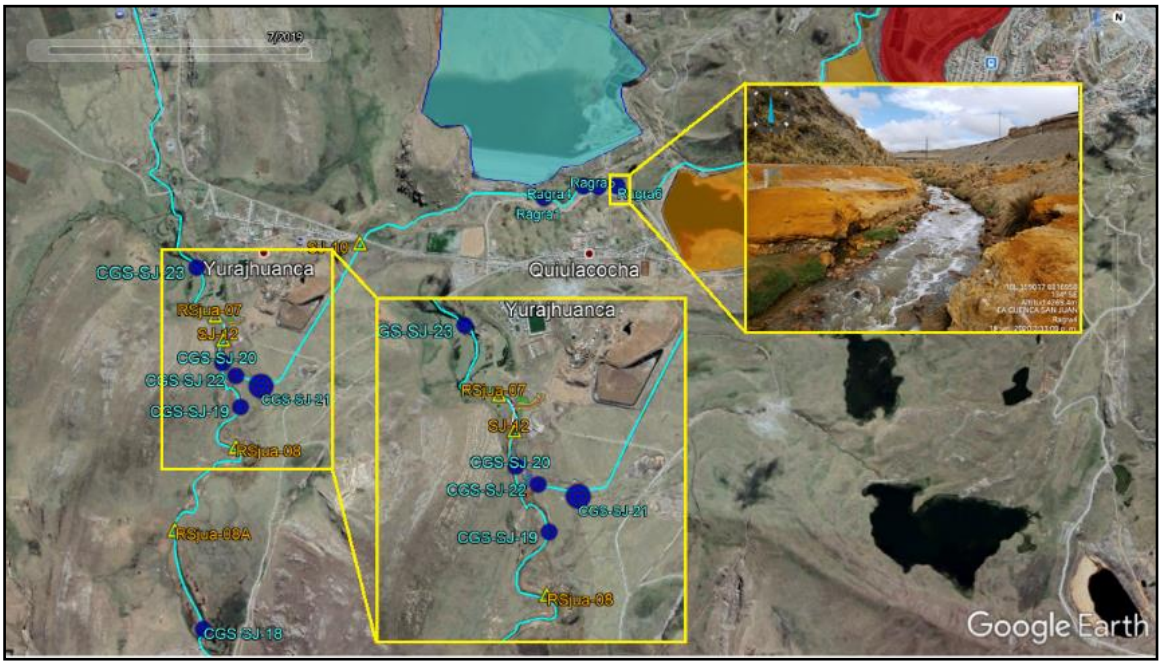


Figura 7.33. Ubicación de los puntos RSjua-07, SJ-12 (CSG-SJ-20), SJ-10 (Ragra6, Ragra5, Ragra4, Ragra1, CSG-SJ-22), RSjua-08 (CSG-SJ-19), RSjua-08A (CSG-SJ-18), además se observa los depósitos de sedimentos fluvio-aluviales mezclados con residuos mineros dispuestos en ambos márgenes del río Ragra (color ocre)

Según el análisis mineralógico por microscopia electrónica de barrido entre los sedimentos del río San Juan (CGS-SJ20 [SJ-12]) y los sedimentos del río Ragra (CGS-SJ-22 y Ragra4 [SJ-10], Ragra1, Ragra4, Ragra5, Ragra6), los minerales traza en común son calcopirita, hematita, rutilo y baritina, los cuales no están «presentes» en el sedimento del río San Juan, aguas arriba de la exdesembocarura del río Ragra y el depósito de sedimentos del río San

Juan (CGS-SJ-23). (Figura 7.34). En general, los contenidos de Ba, Zn, Cu y Pb están asociados a la ocurrencia de yacimientos minerales en la subcuenca San Juan al igual que el Hg, sin embargo, este último se muestra con concentraciones mucho mayores en las muestras del río Ragra, posiblemente debido a su uso en la actividad minera previo a las operaciones de Centromin Perú S.A. y residuos de relaves coloniales.

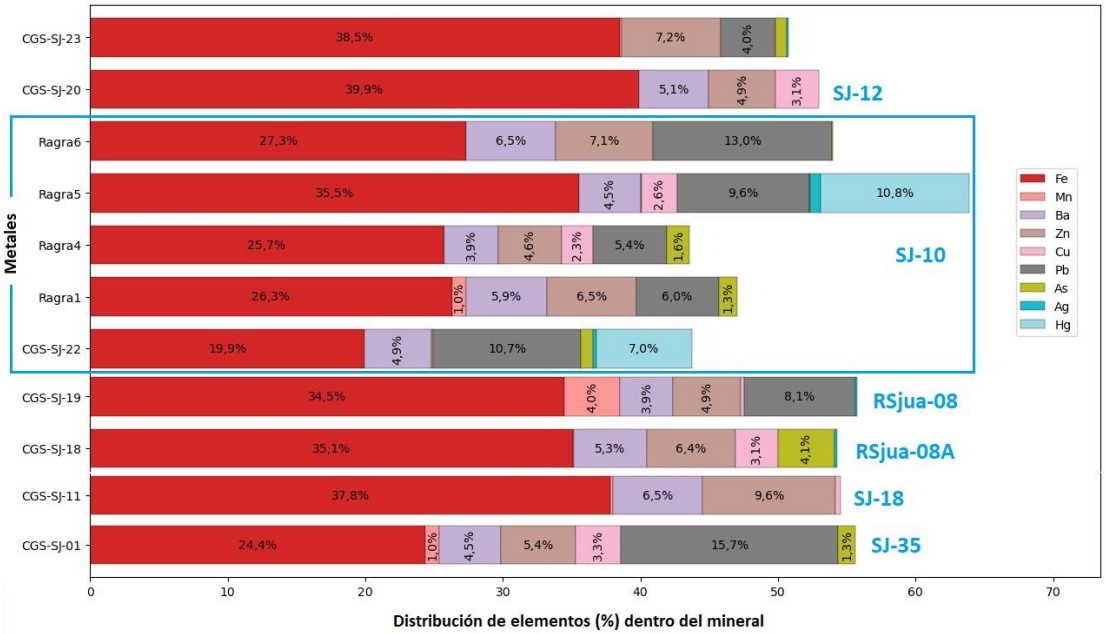


Figura 7.34. Distribución de metales de acuerdo a la presencia de minerales traza reportados en el análisis mineralógico por microscopia electrónica de barrido en muestras de roca (sedimentos fluviales y fluvio-aluviales de los ríos San Juan y Ragra respectivamente)

En relación a los sedimentos, se colectaron 22 puntos en el río San Juan y 7 puntos en sus tributarios (quebrada s/n 16, río Quicay, río Ragra, quebrada s/n 2, quebrada s/n 12, río Gashan y río Blanco), para el análisis se adicionaron 2 puntos muestreados en el río San Juan (CGS-SJ-15, CGS-SJ-16), ver Figura 7.35; además, se muestrearon 7 puntos en el río Huaraupampa, Gashan y Blanco, ver Figura 7.36, los cuales presentaron concentraciones de arsénico, plomo, zinc, cadmio, mercurio y cobre que al ser comparados referencialmente con el valor PEL de la guía canadiense de sedimento superan los valores establecidos, en arsénico (30 de 36 muestras), plomo (27 de 36 muestras), zinc (20 de 36 muestras), cadmio (19 de 36 muestras), mercurio (30 de 36 muestras) y cobre (23 de 36 muestras).

En la Figura 7.35. se observa 3 tramos en el río San Juan, donde se presentan las mayores concentraciones de arsénico, plomo, zinc, cadmio, mercurio y cobre, definidos de la siguiente manera:

- **Tramo 1**, está conformado por los puntos RSjua-07, SJ-12, RSjua-08 y RSjua-08A (una extensión de aproximadamente 1,45 km) este tramo presenta 2 tributarios, el río Ragra (SJ-10) y quebrada s/n 2 (QSnom-02), se observó que la quebrada s/n 2 no presentaba flujo de agua al momento de la evaluación. Este tramo abarca el depósito de sedimento del río San Juan, sector que forma parte de Plan de cierre integral.
- **Tramo 1-2**, está conformado desde el punto CGS-SJ-16 hasta el punto RSjua-18, este tramo presenta 3 tributarios, la quebrada sin nombre 2 (QSnom-02), el río Gashan (SJ-16) y el río Blanco (RBlan-02), se aclara que este tramo corresponde a una zona de transporte de sedimento. Se precisa que, el equipo evaluador

durante el muestreo del río San Juan, no contaba con el permiso para acceder a las áreas de la unidad minera Colquijirca, por lo que no se pudo tomar muestras en el sedimento del río Andacancha.

- **Tramo 2**: conformado por los puntos RSjua-19, RSjua-20A, SJ-35 (7 km^2 aproximadamente de área), los cuales están ubicados dentro de los depósitos de sedimentos del delta Upamayo, sector que forma parte de Plan de cierre integral. El delta Upamayo actúa como un sumidero de sedimentos.



Figura 7.35. Concentraciones de A) arsénico, B) plomo, C) zinc, D) cadmio, E) mercurio y F) cobre en los sedimentos del río San Juan y tributarios, comparados con el valor PEL de la guía canadiense de sedimento



Figura 7.36. Concentraciones de A) arsénico, B) plomo, C) zinc, D) cadmio, E) mercurio y F) cobre en los sedimentos del río Huaraupampa, Gashan y Blanco, comparados con el valor PEL de la guía canadiense de sedimento

En el tramo 1, el punto RSjua-08A, presentó la mayor concentración de arsénico (539 mg/kg), zinc (27869 mg/kg), cadmio (170,29 mg/kg), mercurio (9,05 mg/kg) y cobre (1941 mg/kg); a excepción del plomo en el punto SJ-10 (1974 mg/kg) y mercurio en el punto SJ-12 (9,05 mg/kg). Las elevadas concentraciones de metales en el punto RSjua-08A estan asociadas al aporte de sedimentos del río Ragra (SJ-10), los depósitos de sedimento del río San Juan (SJ-12), además, de la presencia de oxi-hidróxidos de hierro, óxidos de hierro (Figura 7.2), según Rendell (2007), la adsorción de metales pesados es una función del pH, la mezcla de las aguas del río Ragra con el agua alcalina del río San Juan incrementa ligeralmente el pH, esta condición permite la precipitación de hidróxidos de hierro que incorporan más metales pesados al sedimento (Smith, 1991), ver Figura 7.37; además, el contenido de arcilla (5,19 %), es el material que adsorbe los metales debido a su capacidad especifica (Figura 7.38A).

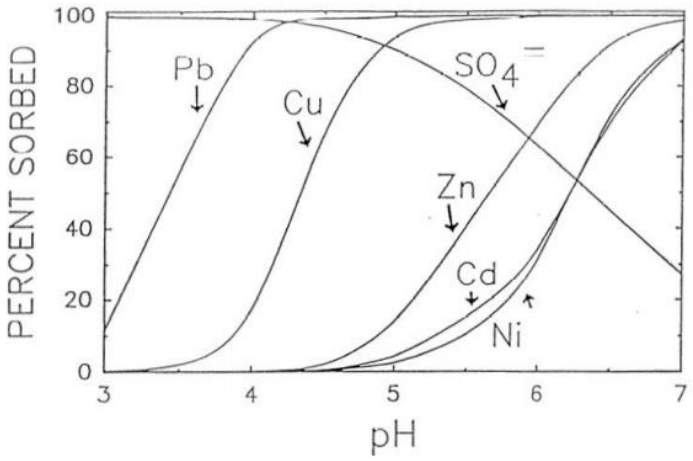


Figura 7.37. Curvas de absorción de metales pesados sobre hidróxidos de hierro (Smith, 1991)

Las bajas concentraciones de metales en la columna de agua del río San Juan, Quicay, Gashan, Huarupampa, Tingra y Blanco, y las altas concentraciones en sedimento se puede explicar por el potencial de hidrógeno alcalino (producto de las rocas calizas con alto contenido de carbonatos de calcio), el cual disminuye la solubilidad de los metales pesados (Norma, 2009); la presencia de óxidos de hierro con elevada superficie especifica las cuales permiten la adsorción de aniones como fosfato, molibdato, silicato y elementos como Cu, Pb, V, Zn, Co y Ni (Acevedo-Sandoval, 2004; Salvarredy, 2008); y la poca pendiente del río San Juan lo que permiten la precipitación de los metales (Figura 7.38B).

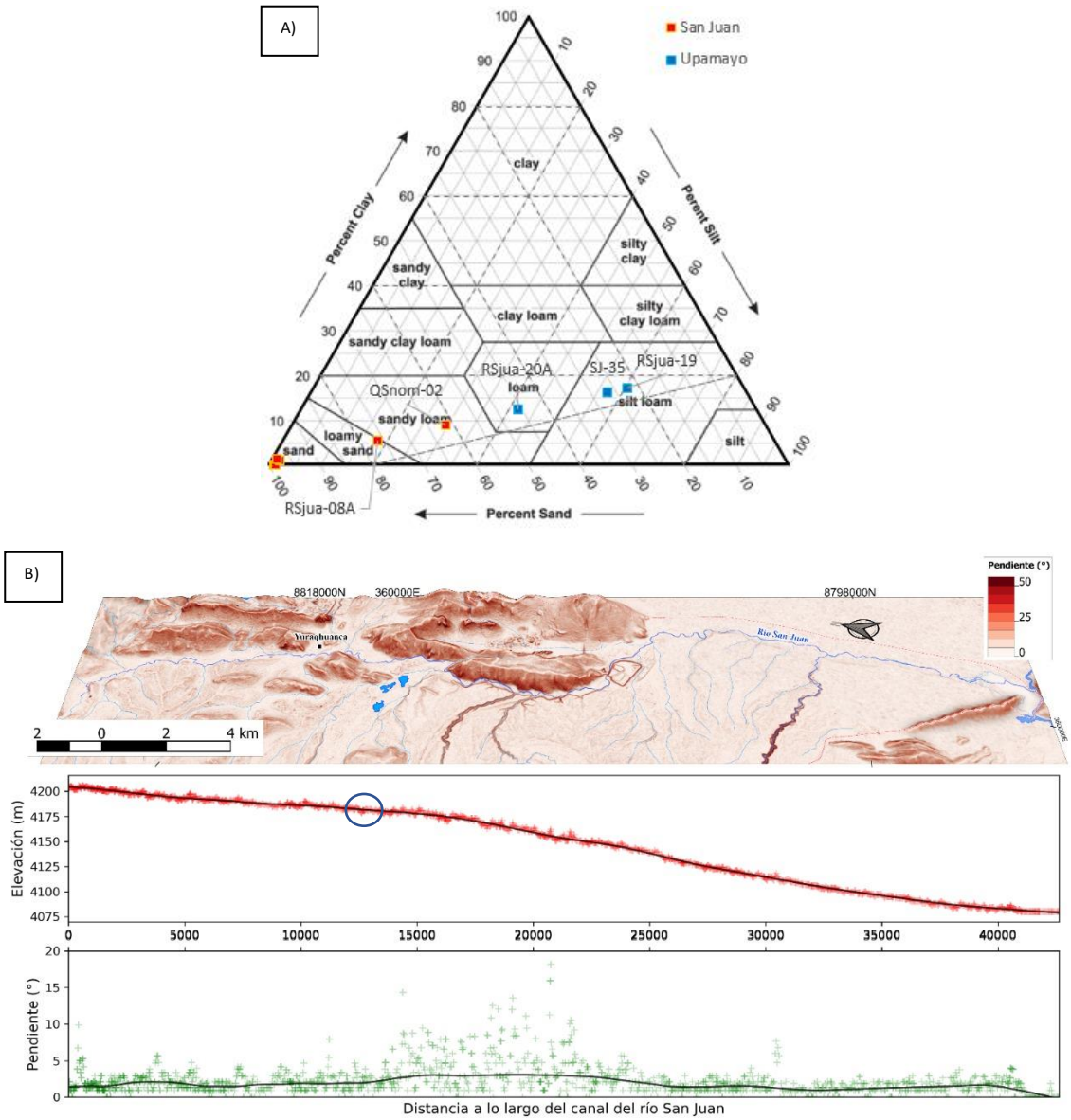


Figura 7.38. A) Textura arena arcillosa en el punto RSjua-08A, los puntos RSjuan-07, SJ-12, SJ-10, RSjuan-08 presentan textura arenosa, y B) mapa de pendientes y perfiles de elevación a lo largo del río San Juan, que muestra el suave relieve y las bajas pendientes dominantes de la zona de evaluación, lo que condiciona los desbordes del río San Juan en épocas de avenida extraordinarias

En el Plan de cierre integral, expediente técnico denominado «Estudio de ingeniería de detalle para ejecutar las obras de plan de cierre integral de los pasivos-Depósitos de sedimentos en el río San Juan y delta Upamayo, Pasco», se presenta el área que contempla los depósitos de sedimento en el río San Juan (plano N.° CSL-137800-1-T0-03), dentro de esta área se muestreó el punto SJ-12 de clase textural arenosa, presentó la máxima concentración de plomo (9,05 mg/kg) en el tramo 1, el punto RSjua-07 se ubicó a aproximadamente 20m en dirección norte de dicha área, debido a su proximidad no se descarta la influencia de los sedimentos, a raíz de que el punto RSjua-07 presentó elevadas concentraciones de As (205 mg/kg), Pb (870 mg/kg), Zn (1816 mg/kg), Cd (4,46 mg/kg), Hg (5,01 mg/kg) y Cu (486 mg/kg), ver Figura 7.39.



Figura 7.39. A) Punto SJ-12, ubicado dentro del sector contemplado en el Estudio de ingeniería de detalle para ejecutar las obras de plan de cierre integral de los pasivos-plano CSL-137800-1-T0-03, donde se presenta los depósitos de sedimentos en el río San Juan, y B) puntos RSjua-07 y SJ-12 ubicados próximos a la exdesembocarura del río Ragra (imagen satelital 2013)

El tramo 1-2 está conformado desde el punto CGS-SJ-16 hasta RSjua-18, este tramo presenta 3 tributarios, la quebrada sin nombre 2 (QSnom-02), el río Gashan (SJ-16) y el río Blanco (RBlan-02), se precisa que este tramo corresponde a una zona de transporte de sedimento. En este tramo, en el punto SJ-18 (ubicado aguas abajo del aporte del río Gashan y descarga de aguas residuales domésticas del poblado Sacrafamilia), se observó mayor porcentaje de hierro respecto del calcio (Figura 7.33B), este punto presentó la mayor concentración de As (200 mg/kg), Pb (433 mg/kg), Zn (13 639 mg/kg), Cd (72,9 mg/kg), Hg (14,50 mg/kg) y Cu (699 mg/kg), luego del aporte alcalino de agua; la precipitación del hierro a partir de una solución iónica puede lograrse por elevación del pH o por oxidación del hierro ferroso en solución, debido a que el producto de solubilidad del hidróxido férrico es mucho más bajo que del hidróxido ferroso (Taylor, 1990). Señalar que, el equipo evaluador durante el muestreo del río San Juan, no contaba con el permiso para acceder a las áreas de la unidad minera Colquijirca, por lo que no se pudo tomar muestras de sedimento del río Andacancha.

En relación a los sedimentos del río Huaraupampa tributario al río Gashan y este al río San Juan, entre los puntos RHuar-05 y RHuar-01, se observa un incremento en las concentraciones de arsénico (de 22,6 mg/kg a 63,3 mg/kg), plomo (de 15,1 mg/kg a 364 mg/kg) y mercurio (<0,01 a 14,3) este incremento está asociado a los relaves coloniales del PAM relave colonial Planta Santa Rita y Lucero (PAM-32), que presentó concentraciones de 1149 mg/kg de arsénico, 12373 mg/kg de plomo y 223 mg/kg de mercurio, cuyo riesgo ecológico potencial varió de «grado bajo» en el punto RHuar-01 a «moderado» en el punto RHuar-05.

En tramo 2 corresponde al delta Upamayo, conformado por los puntos RSjua-19, RSjua-20A, SJ-35 (7 km^2 aproximadamente de área), los cuales están ubicados dentro de los depósitos de sedimentos del delta Upamayo, sector que forma parte de Plan de cierre integral. El delta Upamayo actúa como un sumidero de contaminantes presentes el sedimento, los cuales on transportados desde la parte alta, el punto RSJuan-20A de textura limosa, presentó el mayor porcentaje de hierro respecto del calcio (Figura 7.33), este punto registró la mayor concentración de As (729 mg/kg), Pb (8441 mg/kg), Zn (28159 mg/kg), Cd

(49,19 mg/kg), y Cu (699 mg/kg), excepto el Hg (14,50 mg/kg) en el punto SJ-35 de textura franco limoso. La concentración de Fe disuelto se controla mediante la precipitación de oxi-hidróxidos u oxi-hidroxidos-sulfatos férricos, entre otras fases sólidas, cuya formación y estabilidad dependen en gran medida de las condiciones de potencial redox (Eh) y potencial de hidréogeno (pH). Además de esto, la precipitación de Fe (Fe^{+3}) es de considerable importancia como posible control de otras concentraciones de metales, debido a los fenómenos de adsorción y co-precipitación (Krauskopf y Bird, 1994; Schmiermund y Drozd, 1997; Jönsson *et al*., 2006).

En el río San Juan entre los puntos RSjua-16 y RSjua-17A se observa un incremento de plomo (de 427 mg/kg a 2522 mg/kg) y mercurio (de 5,48 mg/kg a 11,8 mg/kg), debido al aporte de metales por escorrentía superficial provenientes del sitio contaminado API-DR (cuya máxima concentración en el punto CS-DR-17 presentó 11665 mg/kg de plomo y 17,1 mg/kg de mercurio, y a los residuos del PAM relave colonial Chaquiniyo (PAM-54) que presentó 9711 mg/kg de plomo y 31,3 mg/kg de mercurio, cuyo riesgo ecológico potencial fue de «grave».

Respecto al tramo 1, y con la finalidad de determinar el factor de enriquecimiento (EF) de metales en los sedimentos del río San Juan y sus tributarios, se tomó en cuenta el cálculo realizado por Simex y Helz (1981), comúnmente usado para evaluar el grado de contaminación de origen antrópico, para ello se halló el umbral del nivel de referencia utilizando los datos de todas las muestras de sedimento y depósitos cuaternarios fluviales y fluvio-aluviales a lo largo del río San Juan y sus tributarios (Figura 7.40). Dicho tramo, conformado por los puntos (RSjua-07, SJ-12, SJ-10, RSjua-08, RSjua-08), el EF del Cu varió entre 6,34 y 15,74 y se clasifica como «enriquecimiento significativo»; la EF de Zn varió entre 8,74 y 27,62 y se clasifica como un «enriquecimiento significativo» a «enriquecimiento alto»; la EF de Pb varió entre 2,97 y 16,27 y se clasifica como «enriquecimiento moderado» a «enriquecimiento significativo»; el EF de Cd varió de 2,61 y 28,07 que se clasifica de «enriquecimiento moderado» a «enriquecimiento muy alto»; la EF de As varió entre 1,69 y 3,71 y se clasifica «agotamiento al enriquecimiento mínimo» a «enriquecimiento moderado»; la EF de Hg, Ba, Mo, Ag y Se fue menor a 1 y se clasifica como «concentración de fondo geoquímico».

Adicionalmente, se calculó los índices de geoacumulación (Igeo) propuesto por Müller (1969) en los sedimentos del tramo 1, donde el valor negativo significa no contaminado. Según el Igeo, este tramo del río San Juan se encuentra «fuerte a extremadamente contaminado» por Cu y Pb, «fuertemente a extremadamente contaminado» por Zn, «moderadamente a extremadamente contaminado» por Cd, «moderadamente a fuertemente contaminado» por As, «no contaminado a moderadamente a fuertemente contaminado» por Fe y Mn (Figura 7.41). Finalmente, se determinó el riesgo potencial ecológico (PER) comúnmente empleado para evaluar el riesgo ecológico potencial de 6 metales (Cd, Cu, Pb, Zn, Hg y As) en los sedimentos evaluados en el tramo 1, propuesto por (Guo *et al*., 2010). El sedimento de los puntos RSjua-07, SJ-12, SJ-10, RSjua08 y RSjua08A presentó un PER de 668, 3818, 2374, 1589, 8479 respectivamente, cuya clasificación es «grave».

Por tanto, el río Ragra (SJ-10) es una fuente de contaminación para el río San Juan, debido a que presentó concentraciones de As (410 mg/kg), plomo (1974 mg/kg), Zn (6373 mg/kg), Cd (34,96 mg/kg), Hg (4,7 mg/kg) y Cu (662 mg/kg) que al ser comparados referencialmente con el valor PEL de la guía canadiense de sedimento superaron los valores establecidos; un índice de geoacumulación (Igeo) de «extremadamente contaminado» por Zn, Pb, Cd, «fuerte a extremadamente contaminado» por Cu, «fuertemente contaminado» por As,

«moderadamente a fuertemente contaminado» por Mn, «moderadamente contaminado» por Fe (Figura 7.41); y un riesgo ecológico potencial (PER) de «grave» para 6 elementos (Cd> Pb>Cu>As>Zn> Hg).

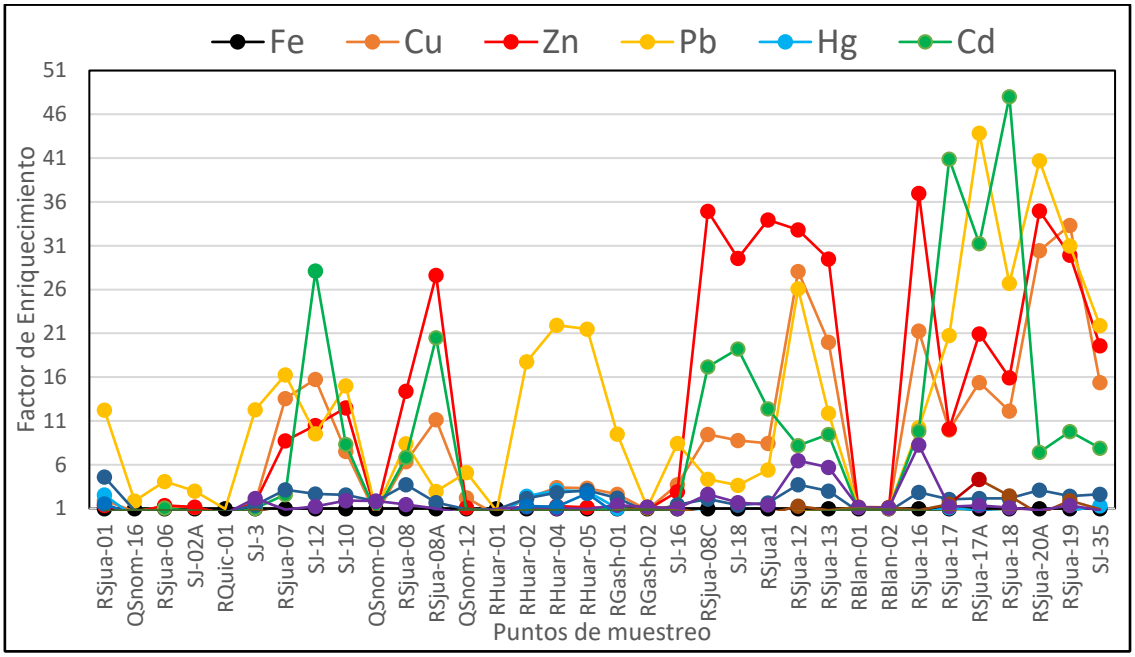


Figura 7.40. Factor de enriquecimiento de los sedimentos del río San Juan y sus tributarios

En el tramo 1-2, que comprende desde el punto RSjua-08C hasta RSjua-18, el EF del Cu varió entre 8,44 y 28,07 y se clasifica como «enriquecimiento significativo» a «enriquecimiento muy alto»; la EF de Zn varió entre 10,08 y 36,99 y se clasifica como un «enriquecimiento significativo» a «enriquecimiento muy alto»; la EF de Pb varió entre 3,65 y 43,85 y se clasifica como «enriquecimiento moderado» a «enriquecimiento extremadamente alto»; el EF de Cd varió de 8,17 y 48,03 que se clasifica de «enriquecimiento significativo» a «enriquecimiento extremadamente alto»; la EF de As varió entre 1,37 y 3,73 y se clasifica «agotamiento al enriquecimiento mínimo» a «enriquecimiento moderado»; la EF de Hg, Ba y Mn fue menor a 2 y se clasifica de «concentración de fondo geoquímico» a «agotamiento al enriquecimiento mínimo»; el índice de geoacumulación en este tramo del río San Juan se encuentra «fuerte a extremadamente contaminado» por Cu, Zn, Cd y Pb; «no contaminado a moderadamente a fuertemente contaminado» por As, Ba y Mn; «no contaminado a moderadamente contaminado» por Fe (Figura 7.42). Asimismo, se determinó el riesgo potencial ecológico (PER) comúnmente empleado para evaluar el riesgo ecológico potencial de 6 metales (Cd, Cu, Pb, Zn, Hg y As) en los sedimentos evaluados en el tramo 1-2, propuesto por (Guo *et al*., 2010). El sedimento de los puntos RSjua-08C, SJ-18, RSjua1, RSjua-12, RSjua-13, RSjua-16, RSjua-17, RSjua-17A y RSjua-18 presentó un PER de 1918, 3699, 1504, 1327, 898, 996, 1771, 3347, 2880 respectivamente, cuya clasificación es «grave».

En tramo 2, comprende los puntos RSjua-19, RSjua-20A, SJ-35 donde el EF del Cu varió entre 15,37 y 33,34 y se clasifica como «enriquecimiento significativo» a «enriquecimiento muy alto»; la EF de Zn varió entre 19,57 y 34,96 y se clasifica como un «enriquecimiento significativo» a «enriquecimiento muy alto»; la EF de Pb varió entre 21,88 y 40,71 y se clasifica como «enriquecimiento muy alto» a «enriquecimiento extremadamente alto»; el EF de Cd varió de 7,42 y 9,58 que se clasifica de «enriquecimiento significativo»; la EF de As

varió entre 2,40 y 3,12 y se clasifica «enriquecimiento moderado»; la EF de Hg, Ba y Mn fue menor a 2 y se clasifica de «concentración de fondo geoquímico» a «agotamiento al enriquecimiento mínimo» (Figura 7.40); finalmente, se determinó el riesgo potencial ecológico (PER) comúnmente empleado para evaluar el riesgo ecológico potencial de 6 metales (Cd, Cu, Pb, Zn, Hg y As) en los sedimentos evaluados en el tramo 2, propuesto por (Guo *et al*., 2010). El sedimento en los puntos RSjua-19, RSjua-20A, SJ-35 presentó un PER de 2597, 5984 y 1150 respectivamente, cuya clasificación es «grave».

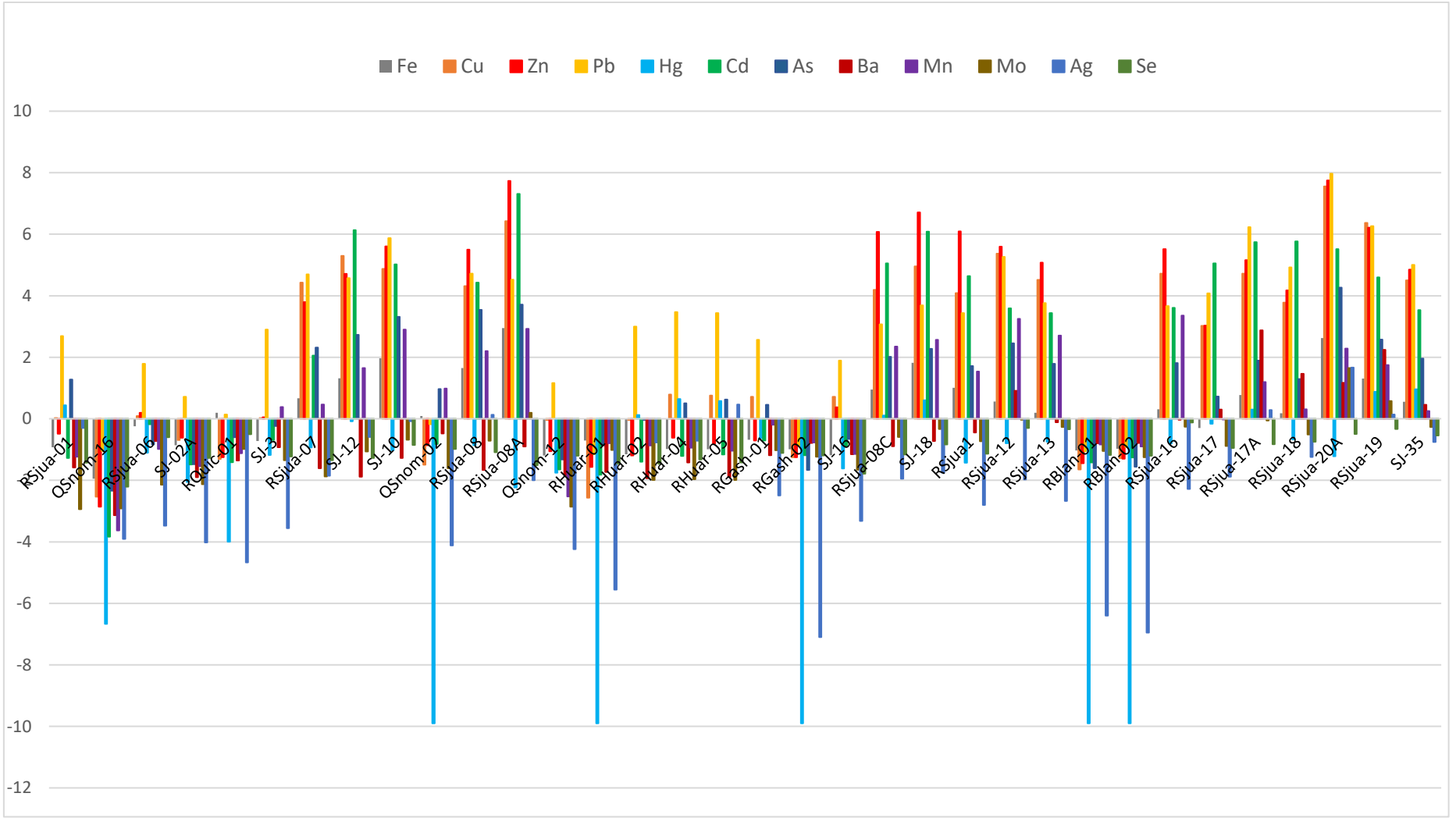


Figura 7.41. Índices de geo acumulación en los sedimentos del río San Juan y tributarios

En cuanto a la evaluación de la comunidad de perifiton, se utilizó el análisis de cluster (*cluster*) y escalamiento multidimensional no métrico (nMDS) realizado en los resultados de agua para un análisis de coordenadas principales (PCO, del inglés *Principal Coordinates)* a la parte vegetal del perifiton, esto dió como resultado un agrupamiento donde se evidencia la influencia de los grupos generados en el análisis de cluster para el agua superficial. En la Figura 7.42 se puede ver una clara tendencia de agrupación por los cluster de agua superficial en donde se han incluido las especies similares con una correlación mayor a 60 %. Los cálculos estadísticos se muestran en el Anexo 4.2.

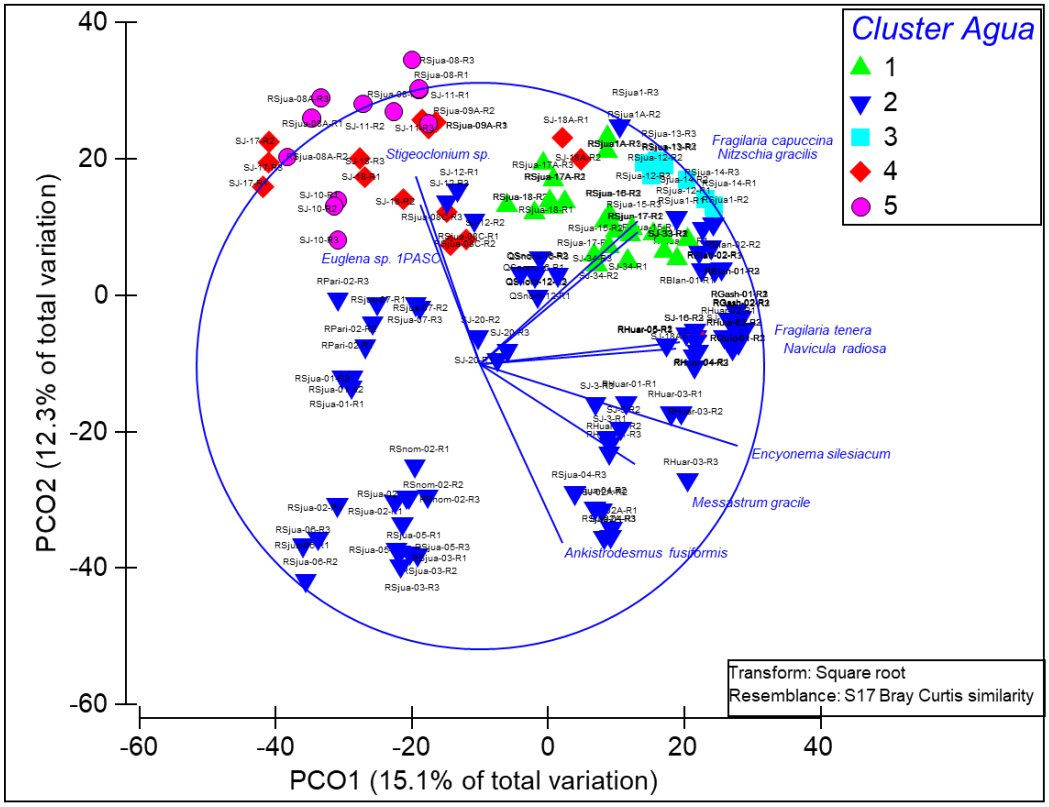


Figura 7.42. Correlación de la similaridad de especies en los puntos de muestreo mediante el análisis de Coordenadas Principales (PCO) de la comunidad de perifiton vegetal teniendo como referencia los cluster de agua superficial

En los puntos de muestreo de los cluster 4 y 5, excepto en SJ-10 y SJ-11, se presenta el alga filamentosa *Stigeoclonium* sp., género típicamente del perifiton que se encuentra generalmente adherido a las rocas sumergidas o sobre plantas acuáticas, principalmente en ríos o quebradas con velocidad de corriente. La literatura refiere que es abundante en aguas contaminadas, como la salida de las plantas de tratamiento de aguas residuales, y es tolerante a los metales, especialmente a cadmio y zinc como otras chlorophytas registradas para el perifiton (Verb y Viss, 2005; Takamura *et al*., 1989).

Los puntos, SJ-11 y RSjua-08A del grupo 5 están dentro de aquellos cuyo análisis histórico han tenido un aumento en la conductividad eléctrica, sulfatos y manganeso para el 2020; sin embargo, difieren en la carga de coliformes totales (Figuras 7.20, 7.21, 7.22, 7.23) lo que explicaría la presencia de *Stigeoclonium* sp., solo en RSjua-08A punto en el que también se supera el valor de zinc en sedimento de acuerdo al valor PEL de la guía canadiense de sedimento. Mediante el análisis de datos fisicoquímicos del agua relacionados con la composición de especies y sus abundancias en la comunidad del perifiton según la distancia basada en modelos lineares con el Criterio de información de Akaike corregido (AICc, por sus

siglas en inglés), ver Figura 7.43; se evidenció que la conductividad eléctrica, sólidos totales en suspensión, aniones (sulfatos, cloruros, fluoruros) y metales totales (cadmio, zinc, manganeso) tienen una correlación directa sobre las asociaciones de especies presentes en la mayoría de puntos de agua superficial de los cluster 4 y 5, especialmente los puntos SJ-10, SJ-11, SJ-17, RSjua-08, RSjua-08A, RSjua-09A y RSjua-08C (para los cálculos estadísticos ver el Anexo 4.2).

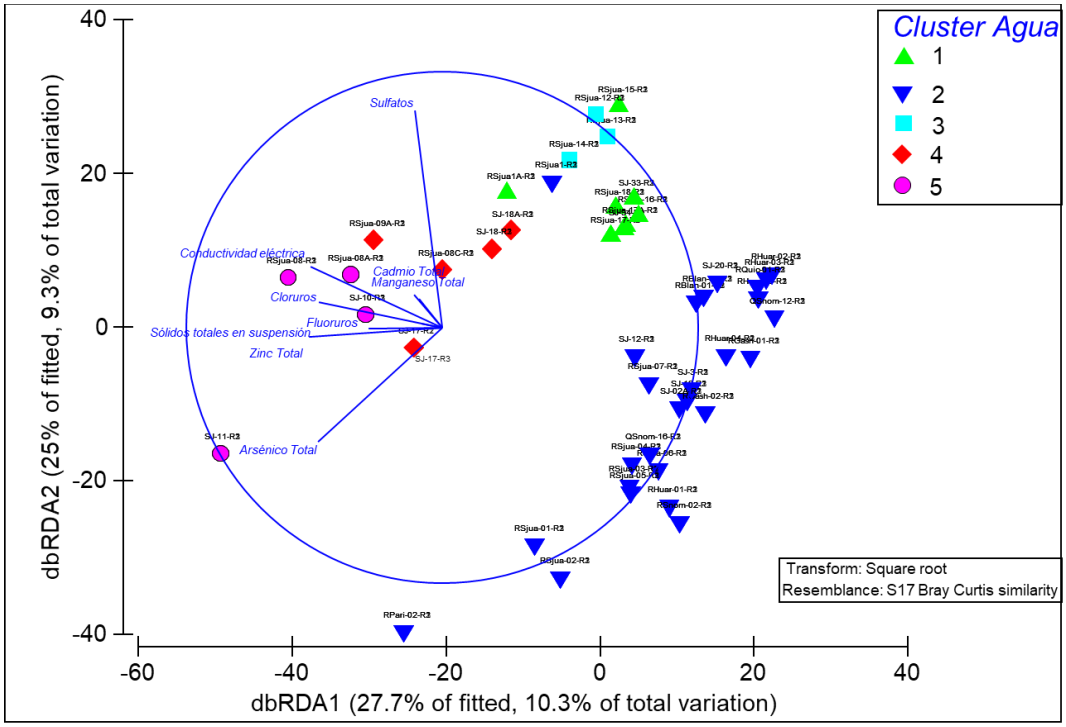


Figura 7.43. Correlación mediante el análisis de distancias con el Criterio de información de Akaike corregido (AICc) entre la comunidad de perifiton y parámetros ambientales teniendo como referencia los cluster de agua superficial

En cuanto a la relación de la comunidad del perifiton con el sedimento, se realizó un análisis de Coordenadas principales (PCO) a los datos de riqueza y abundancia. Con la finalidad de hacer notar las tendencias de agrupaciones de los puntos se nominó aquellos puntos que están abajo de algún residuo minero como ResM y corresponde a los círculos sin relleno en la Figura 7.44, y aquellos que se encuentran aguas abajo de un efluente municipal o doméstico EflMu y EflD respectivamente.

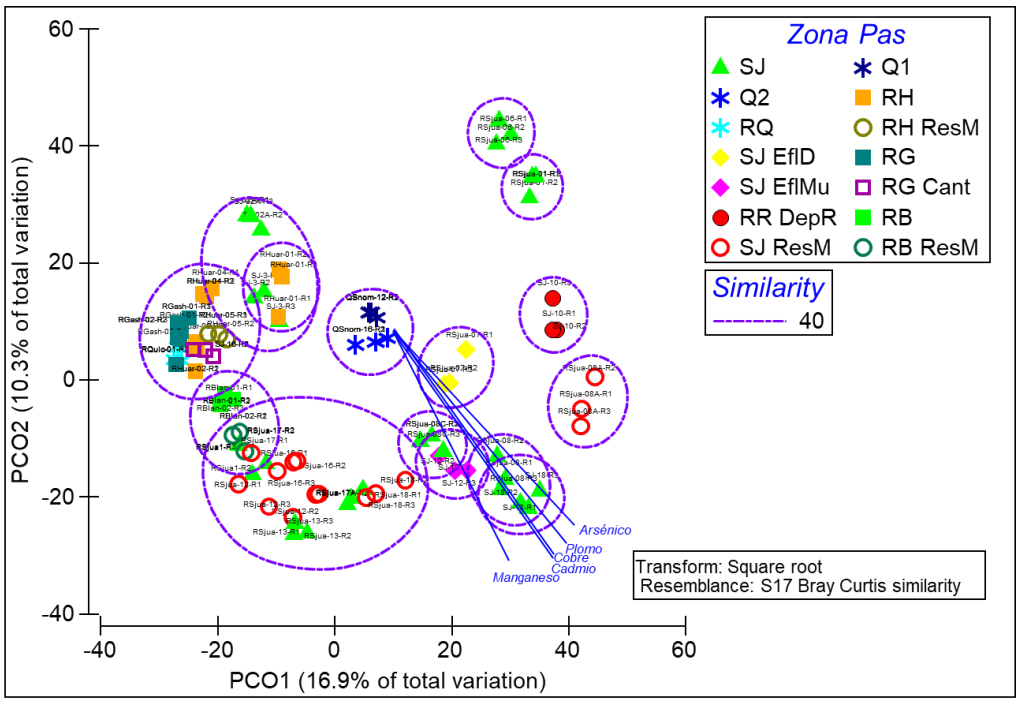


Figura 7.44. Análisis de Coordenadas Principales (PCO) del perifiton vegetal con un nivel de similaridad de 40 % para el agrupamiento y relacionado con los valores de sedimento al 60 % de confianza

De esta manera se observa que en el sector 1, el punto SJ-10 que se encuentra aguas abajo del depósito de relaves Ocroyoc, el cual se separa, evidenciando que la composición de especies es diferente a las del resto. Toda vez que este punto presenta un enriquecimiento significativo en el sedimento de Pb, Zn, Cd y Cu (Figura 7.40) cuyos valores además superan el PEL.

Del mismo modo la correlación de Sperman al 60 % del perifiton con los valores de arsénico, manganeso, cadmio, cobre y plomo del sedimento evidenció una relación con los puntos en donde se supera los valores PEL de la guía canadiense de sedimento (RSjua-07, RSjua-08, RSjua-08A, RSjua-08C, SJ-12 y SJ-18 principalmente) y en los cuales el análisis de riesgo ecológico potencial es «grave».

Además, se observa que los puntos de muestreo asociados a residuos mineros en el río San Juan (SJ ResM), río Blanco (RB ResM) y río Huaraupampa (RH ResM) se encuentran más cercanos entre sí, en cuanto a composición de especies principalmente por las diatomeas *Fragilaria capuccina* y *Fragilaria* cf. *tenera* que son tolerantes a contaminación por metales (Cattaneo *et al*., 2004), ver Figura 7.45. Por otro lado, el punto RSjua-08A si bien está ubicado aguas abajo de un residuo minero es más similar al punto SJ-10 que se encuentra abajo del depósito de relaves Ocroyoc y que presenta valores elevados de metales y metaloides (As, Pb, Zn, Cd, Hg y Cu) que al resto de puntos asociados a algún residuo minero.

En el río Huaruapampa hay una diferencia en la composición de especies del perifiton entre el punto RHuar-01 ubicado aguas arriba de las poblaciones y actividades mineras con respecto a los puntos aguas abajo del PAM relave colonial Planta Santa Rita y Lucero de acuerdo al análisis de Coordenadas Principales (PCO) del perifiton vegetal; así se tiene que, en RHuar-01 hay 13 especies que se presentaron solamente en este punto; mientras que

en los puntos aguas abajo hay un mayor número de microalgas filamentosas de los géneros *Oedogonium* sp., *Microspora* sp., *Mougeotia* sp. y *Zygnema* sp.

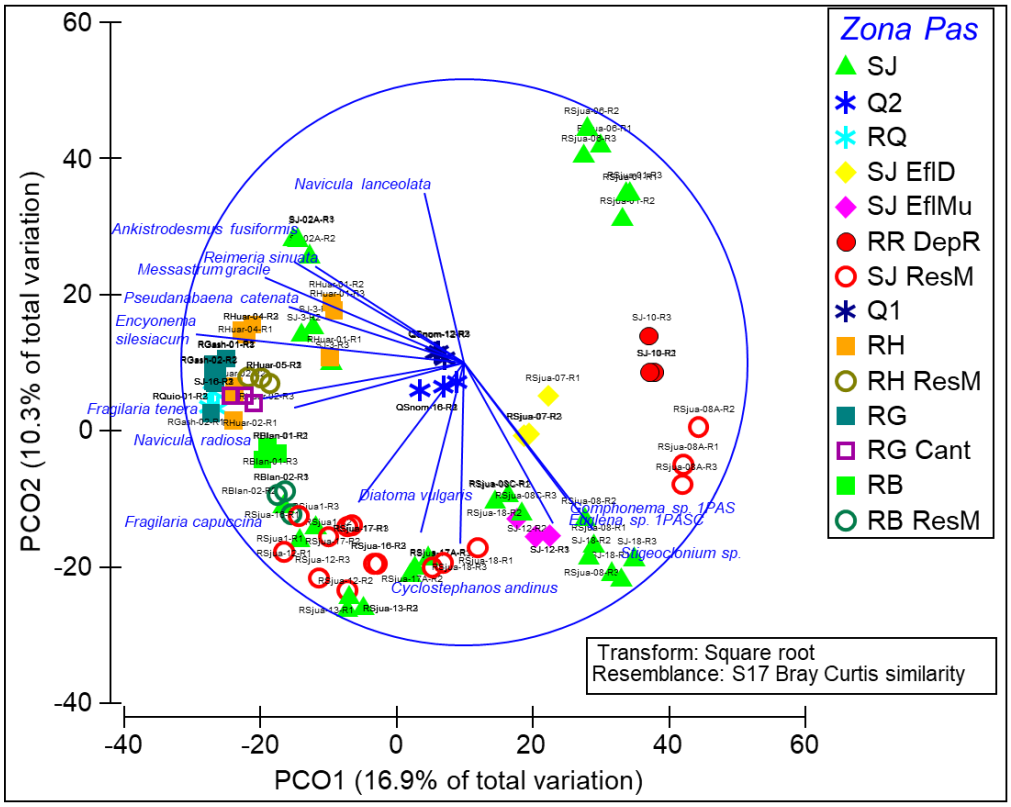


Figura 7.45. Análisis de Coordenadas Principales (PCO) del perifiton vegetal con las especies que presentan una correlación mayor al 60 %. Donde SJ: Río San Juan, RH: Río Huaraupampa, RR: Río Ragra, RG: Río Gashan, RB: Río Blanco, Q1 y Q2: Quebradas sin nombre y RQ: Río sin nombre

Del mismo modo, para los macroinvertebrados bentónicos, y teniendo en cuenta que el comportamiento general de la composición de las comunidades hidrobiológicas está determinado por diversos factores entre locales y regionales (Cornell y Lawton, 1992); en ese sentido, el análisis de similitud (ANOSIM) es una herramienta estadística que permite determinar diferencias en la composición de especies en base a estos factores (Correa *et al*., 2010). Según el análisis de similitud, la composición de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos mostró diferencias significativas entre los puntos de muestreo (R = 0,952 y p= 0,1 %). Esto se vió reflejado gráficamente según el análisis de escalamiento multidimensional no paramétrico (nMDS), ver Figura 7.46; donde se observa que los puntos de muestreo ubicados en la parte alta de la subcuenca San Juan presentaron la mayor riqueza de especies (entre 9 y 16); además, se observó que se relacionaron con una moderada y buena calidad ecológica con predominio de especies consideradas sensibles a los cambios medioambientales (Domínguez y Fernández, 2009), como el ephemeroptero Baetidae y los trichopteros Hydrobiosidae y Limnephilidae.

Por otro lado, los puntos ubicados en la parte media, después de la confluencia con el río Ragra, y en la parte baja presentaron los menores valores de riqueza de especies (entre 1 y 4); además, se relacionaron con una mala y pésima calidad ecológica (CERA-S) con predominio de especies consideradas tolerantes a los cambios medioambientales, como los dípteros Chironomidae y los anélidos Haplotaxidae y Lumbriculidae.

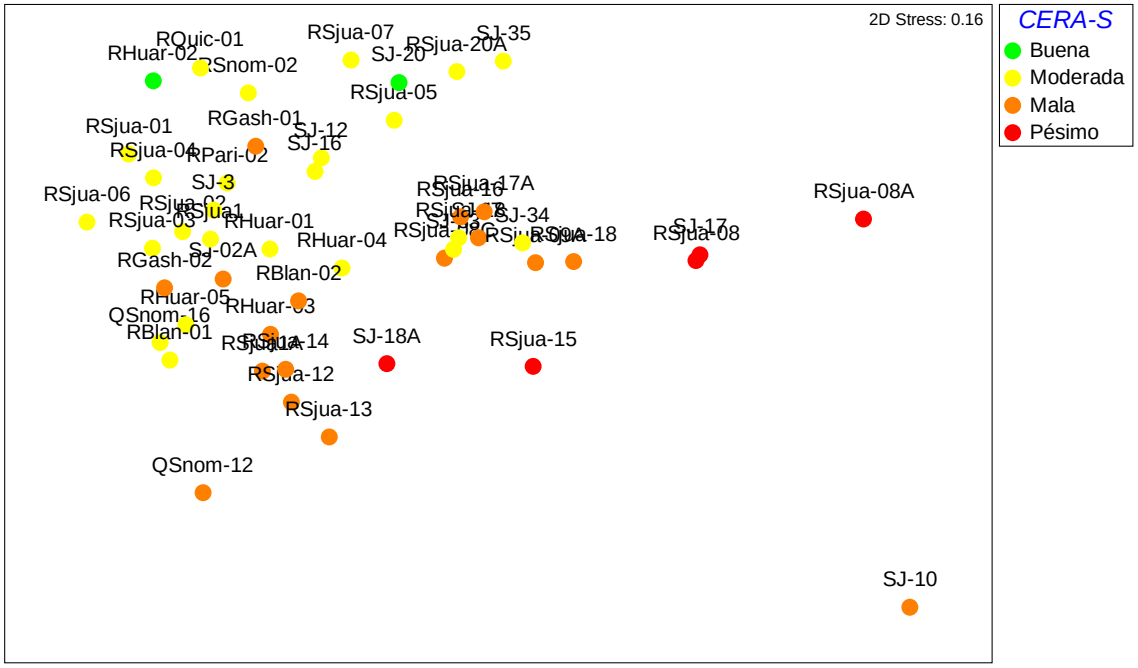
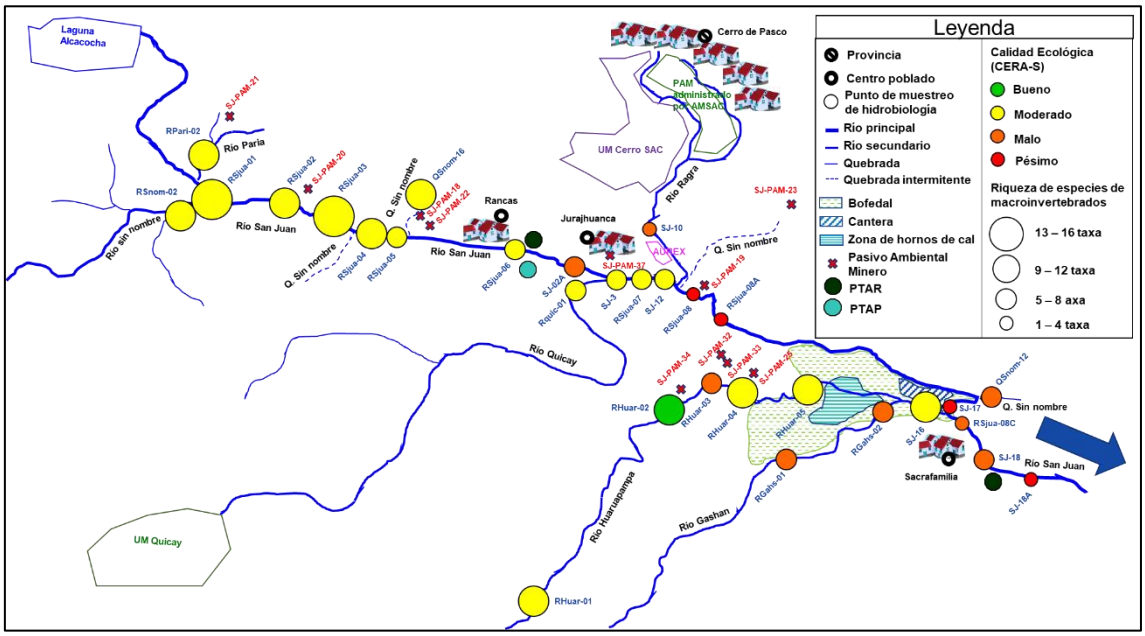


Figura 7.46. Agrupamiento de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos, según la clasificación de la calidad ecológica (CERA-S)

En la Figura 7.47, se describe el comportamiento de la riqueza de especies y de la calidad ecológica (CERA-S) en la subcuenca del río San Juan. En general, se observó que los puntos RPari-02, RSnom-02, RSjua-01, RSjua-02, RSjua-03 y RSjua-04, ubicados en la parte alta de la subcuenca, presentan una moderada calidad ecológica. Por otro lado, los puntos RSjua-08 y RSjua-08A, ubicados en la parte media después de la confluencia con el río Ragra (SJ-10), presentaron los menores valores de riqueza de especies (entre 1 y 4); y, se relacionaron con una pésima calidad ecológica.



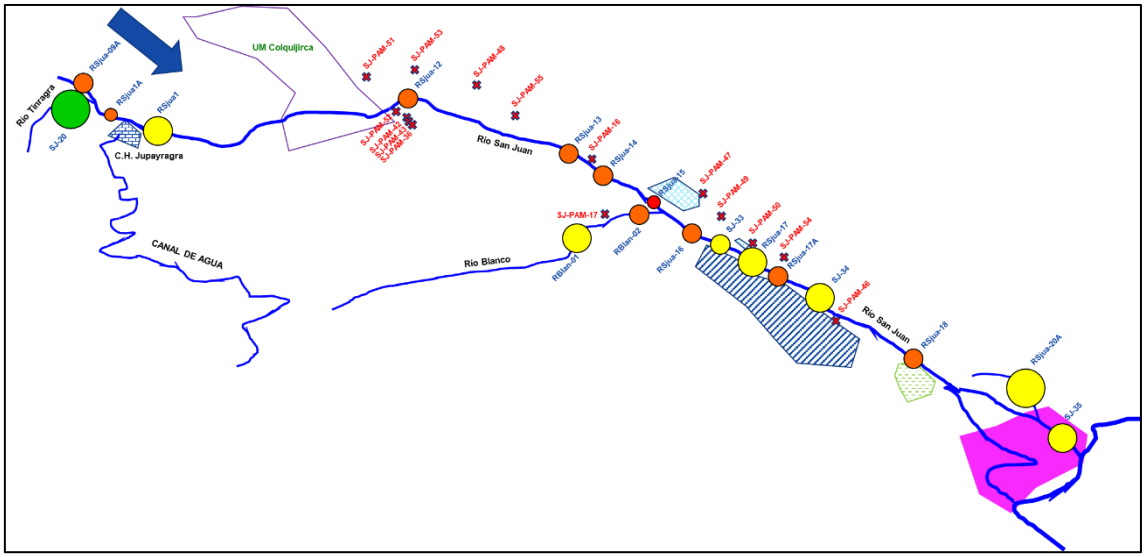


Figura 7.47. Mapa de clasificación de la calidad ecológica (CERA-S) y riqueza de especies de macroinvertebrados bentónicos por punto de muestreo en la subcuenca San Juan

Para describir la relación entre las variables ambientales del agua y sedimento con la composición de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos (Figura 7.48), se utilizó el análisis de correspondencia canónica (ACC). Se observó la separación de los puntos de muestreo RPari-02, RSnom-02, RSjua-01, RSjua-02, RSjua-03 y RSjua-04, ubicados en la parte alta de la subcuenca San Juan, que se relacionaron con una moderada y buena calidad ecológica con predominio de especies consideradas sensibles a los cambios medioambientales (Domínguez y Fernández, 2009), como el ephemeroptero Baetidae y los trichopteros Hydrobiosidae y Limnephilidae; además, se relacionaron a un potencial de hidrógeno neutro-alcalino (entre 7,28 a 8,73 unidades de pH), una baja conductividad eléctrica (hasta 408 µS/cm) y una menor concentración de metales en agua (arsénico, boro, cadmio, cobalto, hierro y litio) y sedimento (arsénico, cadmio, y zinc). Por otro lado, los puntos de muestreo RSjua-08 y RSjua-08A, ubicados en la parte media después de la confluencia con el río Ragra (SJ-10), se relacionaron con una mala y pésima calidad ecológica con predominio de especies consideradas tolerantes a los cambios medioambientales, como el anélido Lumbriculidae; además, se relacionaron a una alta conductividad eléctrica (hasta 3090 µS/cm) y una mayor concentración de metales en agua (arsénico, boro, cadmio, cobalto, hierro y litio) y sedimento (arsénico, cadmio, y zinc).

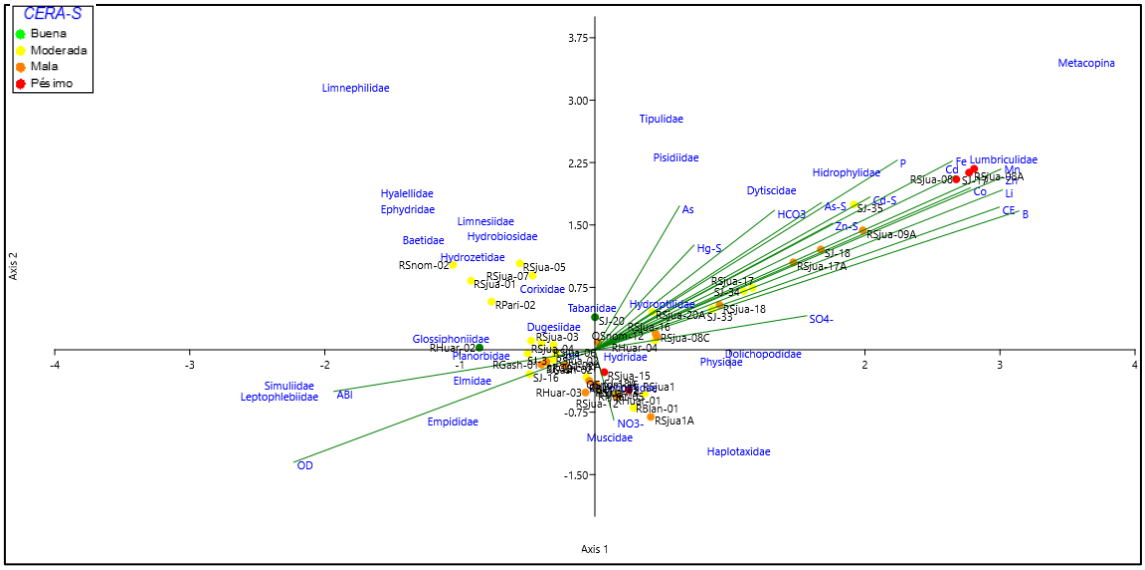


Figura 7.48. Análisis de correspondencia canónica entre las variables ambientales (agua y sedimento) y la comunidad de macroinvertebrados bentónicos

Es importante mencionar que durante la colecta de macroinvertebrados bentónicos con la red surber en los puntos RQuic-01 y QSnom-12, se colectó incidentalmente peces del genero Orestias, reportándose 3 individuos de la especie *Orestias empyraeus* en el río Quicay (RQuic-01) y 1 individuo de *Orestias* sp. en el punto QSnom-12 (Anexo 2.1: RRE-035-2020-STEC). El género *Orestias* es endémico de la región andina (Chocano, 2005) y presenta un grado de fragilidad elevada, ya que los ambientes acuáticos altoandinos donde normalmente se desarrolla están siendo alterados por acciones antrópicas y por la introducción de especies exóticas (Ortega *et al.*, 2012). *Orestias empyraeus* se encuentra incluida en «The IUCN Red List of Threatened species»[64] (IUCN, 2020), en la categoría casi amenazada (Hidalgo y Chocano, 2016) siendo sus principales amenazas la modificación de los sistemas acuáticos y la contaminación de la calidad del agua por descargas domésticas, industriales entre otros.

Las áreas de potencial interés (6) se encuentran a lo largo del río San Juan, 3 áreas están ubicadas en la parte alta de la subcuenca próximos a la comunidad campesina San Antonio de Rancas, un área se encuentra cercana a la comunidad campesina de Yurajhuanca y 2 áreas están próximas a la comunidad campesina de Vicco en la parte baja de la subcuenca. Los resultados de los API fueron comparados con los ECA para suelo 2017, uso agrícola y el nivel de fondo determinado estadísticamente, el nivel de fondo A fue comparado con los API PAM 20, API PAM 22 y API MF, el nivel de fondo C se comparó con el API DR y API PAM 50, y el nivel de fondo D se comparó con el API PRS, y referencialmente con la guía canadiense de suelos para los parámetros de cobre, plata, selenio y zinc.

El tipo de roca madre que ha generado el suelo, determinará directamente la cantidad de metales pesados existente en dicho suelo de forma natural. En áreas mineras, las capas superiores de suelos minerales presentan concentraciones elevadas de cobre, níquel, arsénico, selenio, hierro y cadmio (Garcia *et.al*., 2002). El tipo de roca madre que ha generado el suelo, determinará directamente la cantidad de metales pesados existentes en dicho suelo de forma natural. La presencia de metales es mayor en las rocas ígneas que en las sedimentarias. Así mismo la cantidad de metal que vaya a ser incorporado en el suelo,

64 Traducido al español como Lista Roja de especies amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.

va a depender del grado de resistencia de cada mineral que la constituya (Garcia *et al*., 2002).

El objetivo de este muestreo es determinar la concentración de los químicos regulados por los ECA para suelo 2017, uso agrícola en sitios contiguos al área contaminada, los mismos que pueden encontrase en el suelo de manera natural o fueron generados por alguna fuente antropogénica ajena a la considerada, siendo aplicable a metales y metaloides (Minam, 2014).

Pasco es una zona con alta carga de minerales de aporte natural debido a la formación y distribución de las rocas ricas en minerales, el nivel de fondo A y C presentan concentraciones de nivel de fondo que superan los ECA para suelo 2017, uso agrícola para arsénico y plomo, el nivel de fondo D presenta concentraciones que superan la norma en mención para arsénico, plomo y mercurio; presentando el nivel de fondo D las mayores concentraciones en comparación a los niveles A y C. Los resultados de los cálculos estadísticos para la determinación de nivel de fondo de suelo, se presentan en el Anexo 4.4.

Identificación de sitios contaminados

a. API PAM 20

El área de potencial interés PAM 20 está ubicado en el distrito Simón Bolívar, en esta área se realizó el muestreo de identificación para comprobar la influencia del relave colonial Tauro 6[65] al suelo, durante la investigación histórica y el levantamiento técnico del sitio se pudo determinar que la cobertura vegetal presente en este API es la especie *Festuca rigescens* y *Calamagrostis vicunarum,* entre otras propias de la zona, las cuales forman una terraza aluvial; en la actualidad este relave colonial ya habría sido retirado; en la Figura 7.49 se aprecia el movimiento de tierras en el API PAM 20.

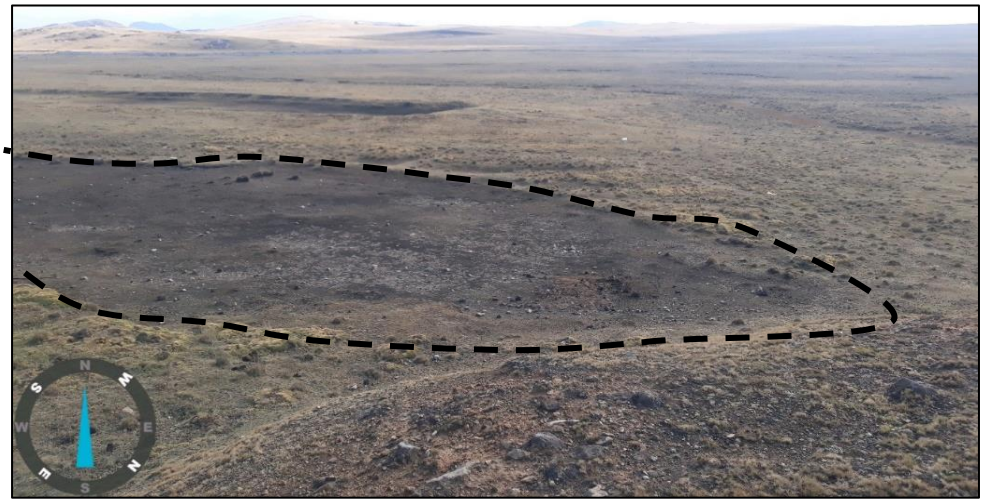


Figura 7.49. Área con evidente retiro de suelo, descubierto para el API PAM 20

En cuanto a la degradación de los suelos, Jiménez *et al*. (2017) supone una destrucción de las condiciones ambientales originales, dando paso a la degradación del suelo, esta degradación se hace evidente debido a la perdida de materia orgánica (degradación biológica), alteración de textura y estructura (degradación física) y finalmente con la acumulación de metales y pérdida de parámetros edáficos (degradación química).

65 Aprobado mediante Resolución Directoral N.° 238-2020-MEM/DM, fue publicada el 24 de agosto de 2020 «Actualización del Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros»

Además de conocer los resultados de cobertura, calculados mediante los índices de vegetación entre cada año, se generó mapas de cambios comparando cada 3 años con el objetivo de conocer los cambios más significativos mediante las tonalidades bien marcadas, como resultado de los cambios generados por algunas actividades externas que se ven reflejados en la cobertura vegetal.

En la Figura 7.50 las concentraciones de arsénico y plomo superaron los valores establecidos en los ECA para suelo 2017, uso agrícola y los valores de nivel de fondo en 5 de 6 puntos muestreados; cabe precisar que, las mayores concentraciones de arsénico y plomo se registraron en los puntos CS-P20-02 y CS-P20-06 respectivamente, donde el arsénico excedió en 892 % a su valor establecido en la norma en mención y 587 % al valor de nivel de fondo, y el plomo excedió en 44,3 % a su valor señalado en esa norma; el cadmio superó en 3 de 6 puntos su valor indicado en dicha norma, la mayor concentración se registró en el punto CS-P20-06 y excedió en 152,4 % su valor estipulado en esa norma y en 187,3 % el valor del nivel de fondo; el mercurio superó su valor establecido en esa norma en 5 de 6 puntos y el nivel de fondo en todos los puntos, su concentración más elevada se reportó en el punto CS-P20-06 donde excedió en 1687,9 % su valor de esa norma y en 9257,7 % el valor de nivel de fondo; las concentraciones de bario no superaron su valor señalado en esa norma, pero superó el valor del nivel de fondo en 11,4 % en el punto CS-P20-03.

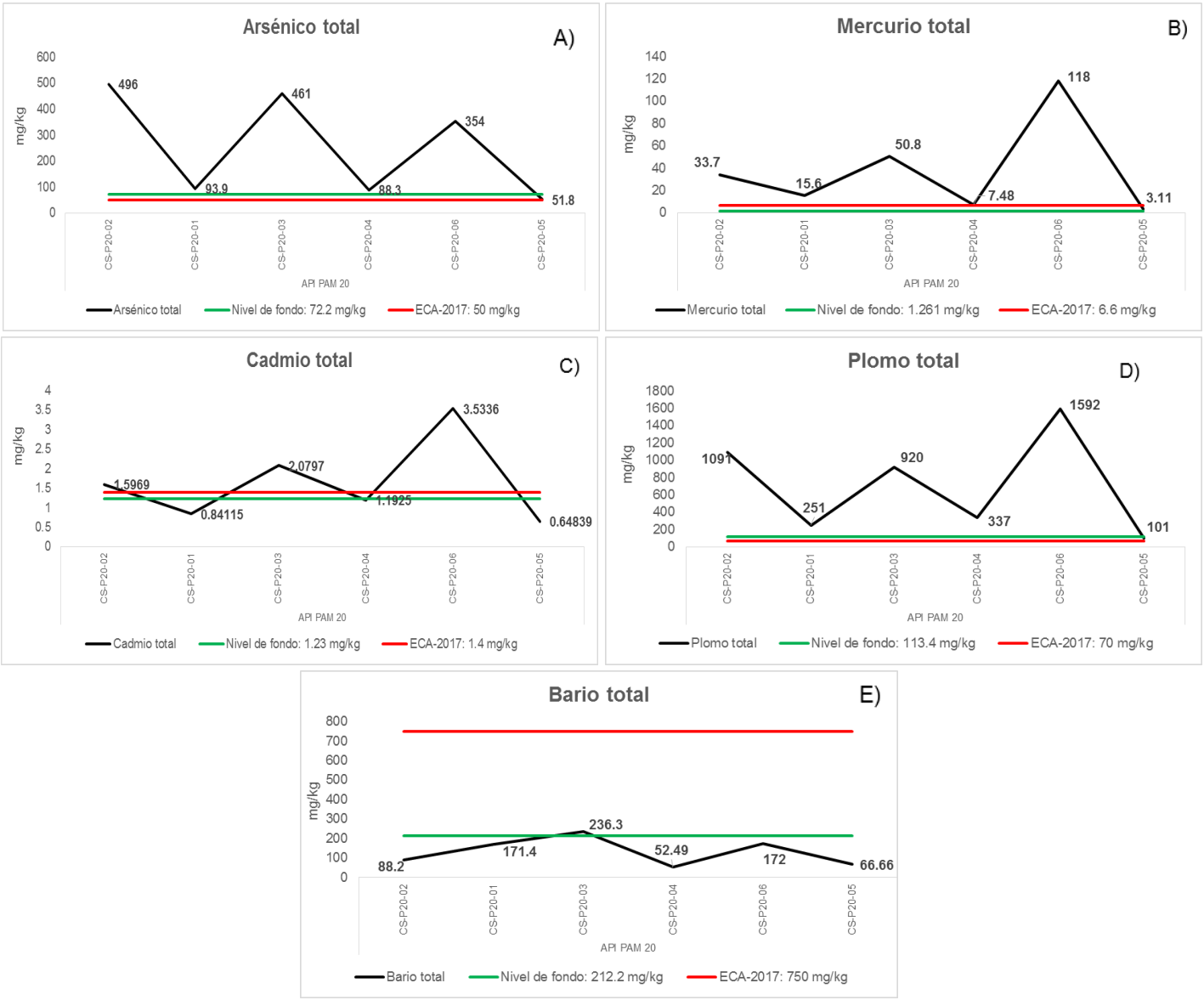


Figura 7.50. Concentraciones de A) arsénico, B) mercurio, C) cadmio, D) plomo y E) bario en el API PAM 20, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y los valores de nivel de fondo

Los puntos CS-P20-02 y CS-P20-06 ubicados en suelos sin cobertura vegetal y de color anaranjado con indicios de ser un suelo removido presentaron las mayores concentraciones de metales; por otra parte, los suelos muestreados con cobertura vegetal y color marrón oscuro presentaron menores concentraciones de metales (CS-P20-01 y CS-P20-05), tal como se detalla en la Figura 7.51.



Figura 7.51. Diferencias entre suelo removido y suelo con cobertura

La movilidad de un metal depende no solo de su especiación química, sino de una serie de parámetros del suelo tales como potencial de hidrógeno, materia orgánica, carbonatos, minerales de arcilla, etc. (Galán *et al*., 2008); mediante la prueba de disponibilidad de metales nos arroja que el plomo y el zinc se encuentran disponibles en la etapa 2 (intercambiable y adsorbidas) y en la etapa 3 (ligado a carbonatos), con concentraciones relativamente altas. En resumen, una extracción secuencial puede valorar de forma aproximada la distribución de los elementos trazas respecto a las distintas fases de un suelo y su movilidad relativa (Galán *et al*., 2008).

Los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola se tomaron como referencia para comparar parámetros que no se encuentran establecidos en los ECA para suelo 2017, uso agrícola; en el punto CS-P20-06 se encuentran las mayores concentraciones de los parámetros evaluados, donde cobre superó en 419 % su valor de la guía en mención y en 4806,2 % al valor de nivel de fondo, plata superó en 222,6 % su valor de esa guía y en 2296,7 % el valor de nivel de fondo, selenio superó en 442,4 % la CEQG y en 571,3 % al valor de nivel de fondo, y zinc superó en 218,4 % la CEQG y en 549,3 % el valor de nivel de fondo (Figura 7.52).

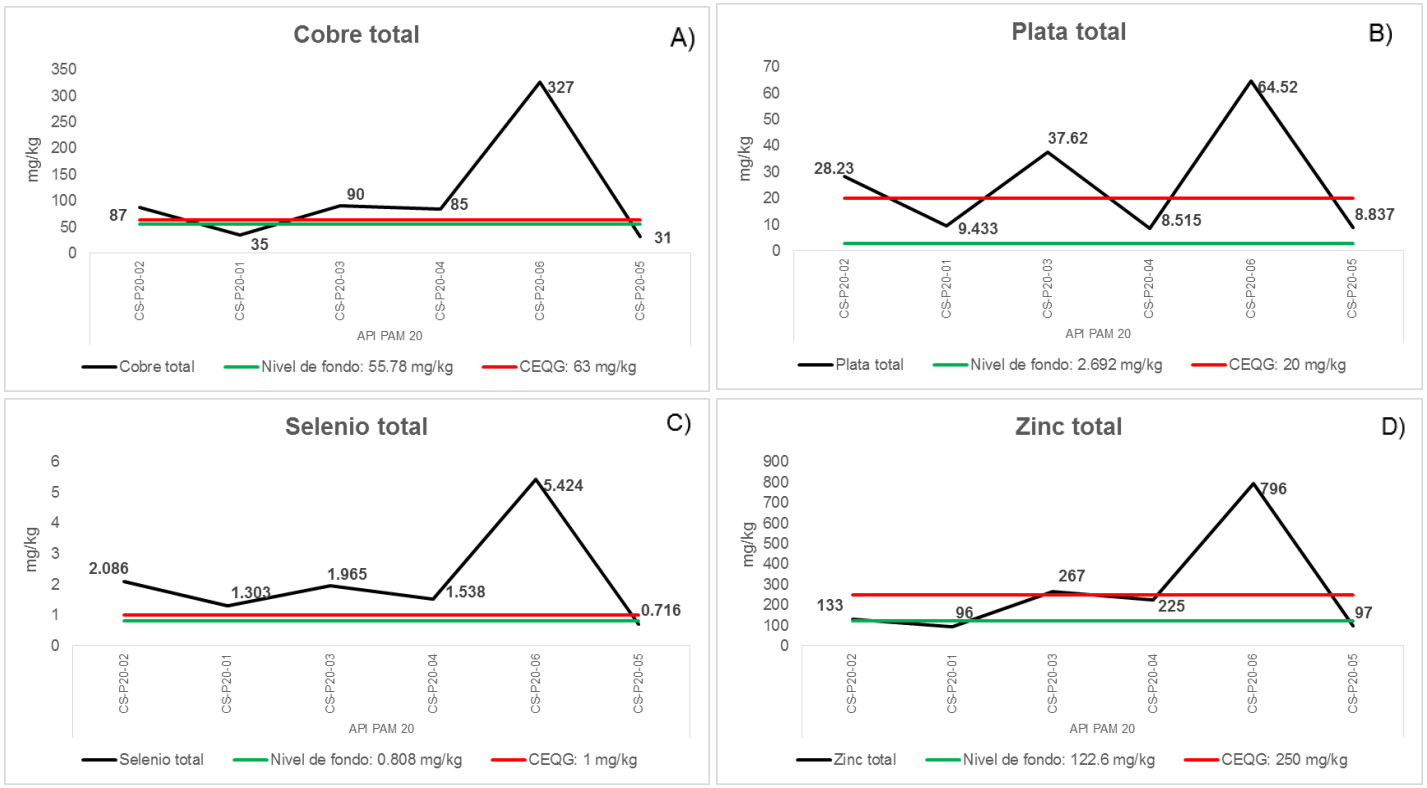


Figura 7.52. Concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc en el API PAM 20, comparadas con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y los valores de nivel de fondo

Se empleó el método de análisis geoestadístico para evaluar la distribución espacial e identificar la fuente de los metales en el API PAM 20 mediante métodos de interpolación espacial. Para la presente evaluación se empleó el método ordinario de kriging (OK), debido a que dicho método se emplea comúnmente para la investigación de suelos y en el mapeo de su contaminación (Xie *et al*., 2011), y se usó el software libre QGIS, para mapear la distribución espacial de los metales en el API. En la Figura 7.53 se observa que las concentraciones más elevadas de cadmio, plomo y mercurio en el API (coloración más intensa), se registraron principalmente en el punto CS-P20-06 y en el punto CS-P20-02 presentó la concentración más alta de arsénico.

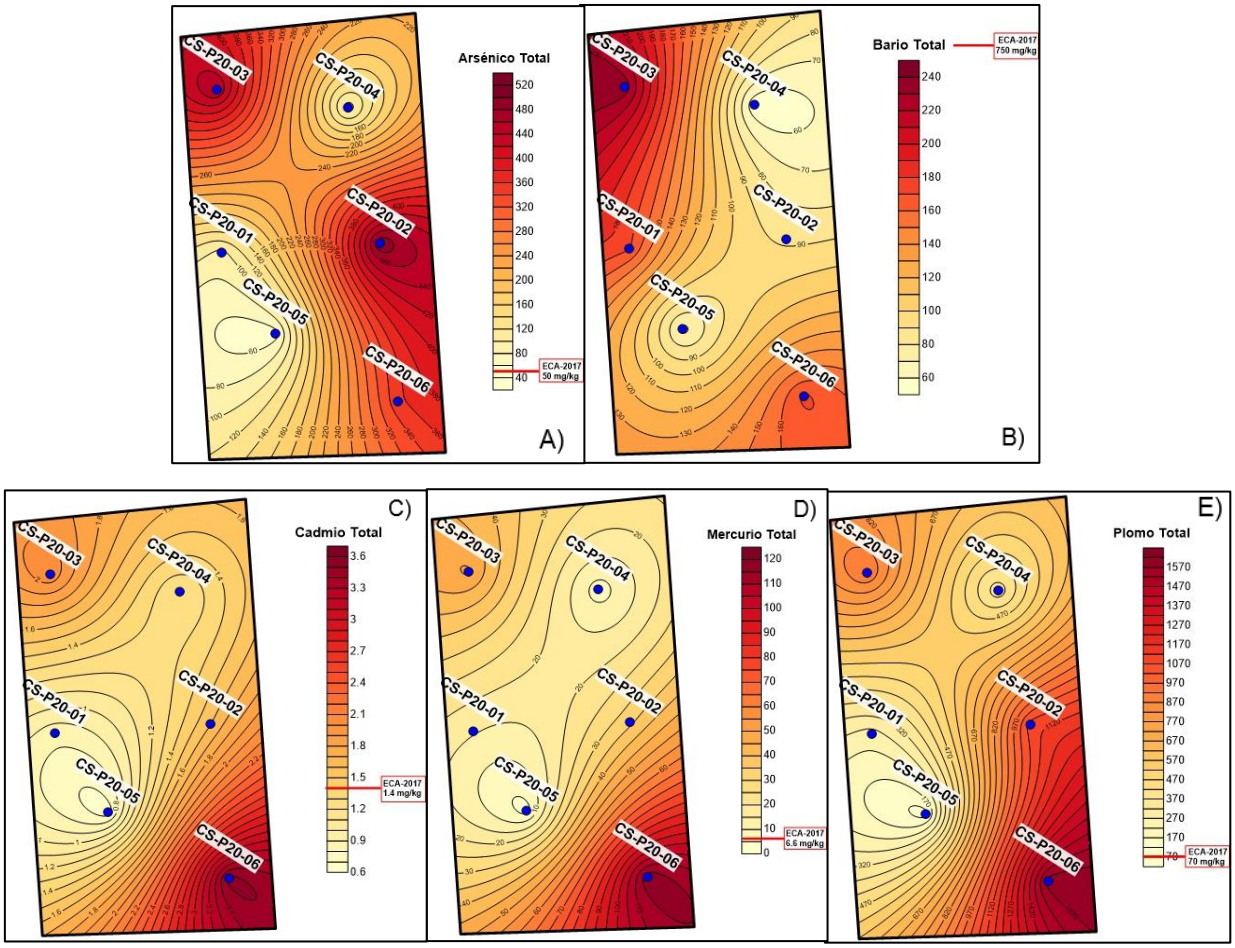


Figura 7.53. Distribución espacial de concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo registradas en el API PAM 20, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola

De la misma forma, en la Figura 7.54 se muestra la distribución espacial de los parámetros cobre, plata, selenio y zinc, donde ocurre el mismo patrón para las concentraciones máximas que se encuentran en el punto CS-P20-06, ubicado al sur del área donde se ubicó el PAM Tauro 6.

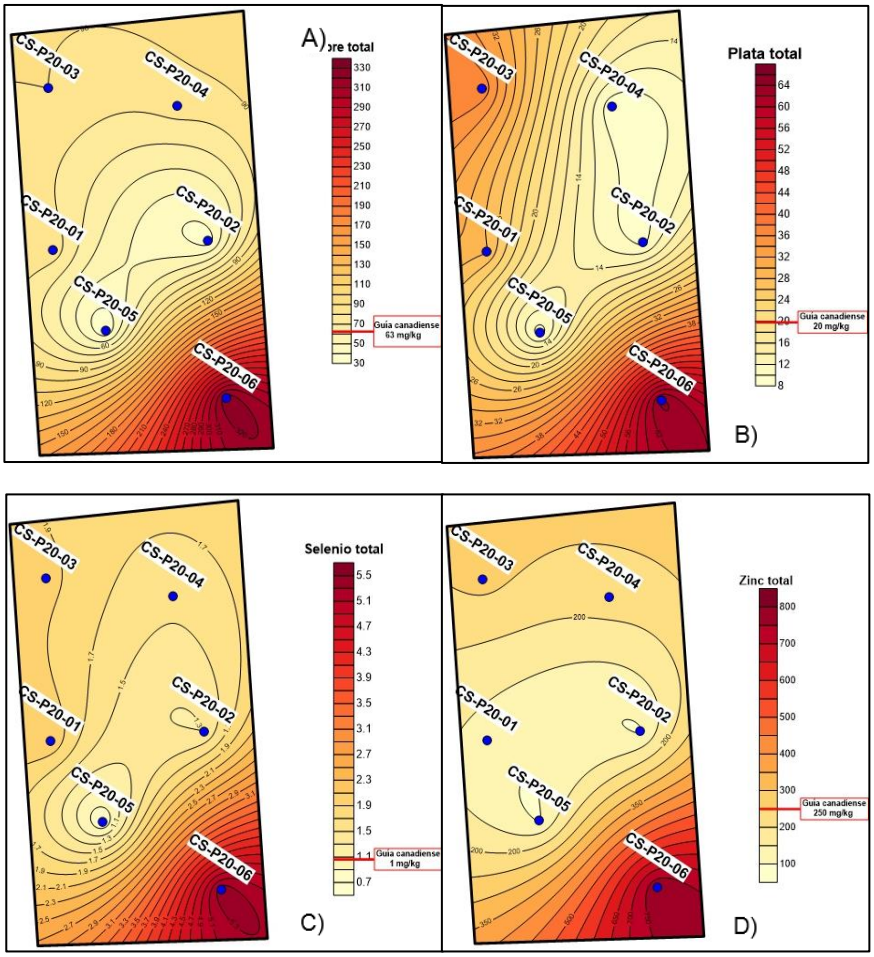


Figura 7.54. Distribución espacial de concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc registradas en el API PAM 20, comparadas con los valores de la guía canadiense, uso agrícola

La degradación del suelo se mide a través del «cambio en la productividad del suelo» utilizando, como *proxy*, la productividad primaria neta (PNP) que se estima a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) detectado de forma remota (Dent *et al.*, 2015).

La pérdida de materia orgánica y la acumulación de metales pesados en el área de potencial interés, respecto a la acumulación de metales pesados en el nivel de fondo, ha ocurrido debido a la acumulación proveniente del PAM Tauro 6 y esta acumulación generó aporte al suelo al sufrir cambios temporales por clima y uso actual de suelos; los cuales fueron corroborados con el análisis NDVI (Figura 7.55 y 7.56).

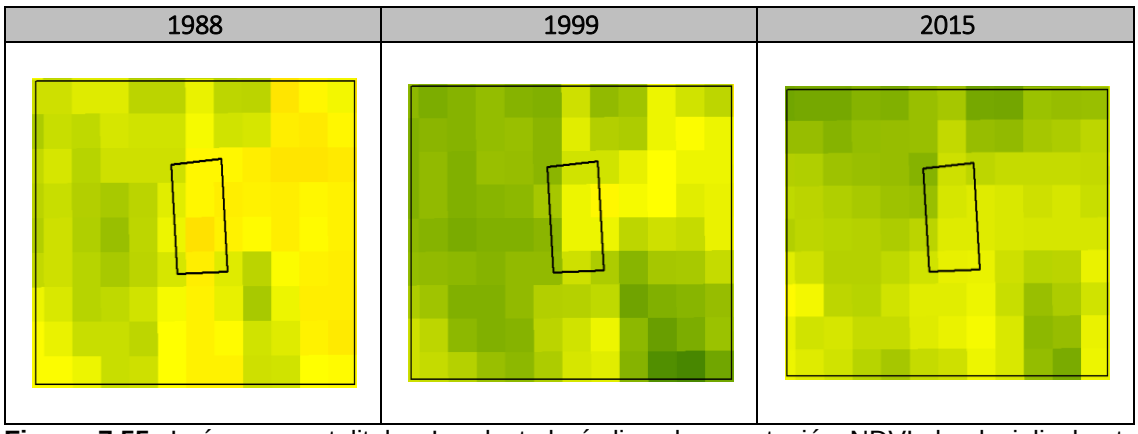


Figura 7.55. Imágenes satelitales Landsat de índice de vegetación NDVI desde julio hasta setiembre para 1988, 1999 y 2015

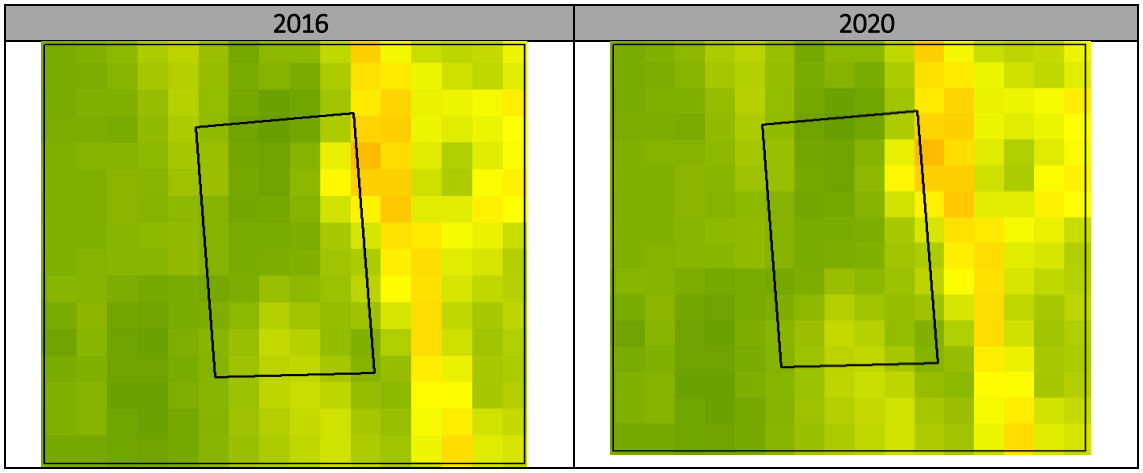


Figura 7.56. NDVI de las imágenes satelitales Sentinel 2A de abril para 2016 y de junio para 2020

En esta API se hizo un sobrevuelo de un área de 0,501 ha que conforma la formación de cobertura vegetal bofedal con parches de césped en la que se realizó el análisis de los índices de vegetación de NDVI y NDRE. Obteniéndose una media de 0,205 de NDVI y 0,115 de NDRE (Tabla 7.5 y Figura 7.57).

Se realizó la relación entre los puntos de muestreo de suelos con cada índice de vegetación (NDVI y NDRE) obtenidos de la cobertura vegetal; demostrando con este medio que existe una relación indirectamente proporcional entre ambas variables; lo que indica que las mayores concentraciones de metales en suelo se encuentran con los valores más bajos de los índices NDVI y NDRE (Figura 7.58).

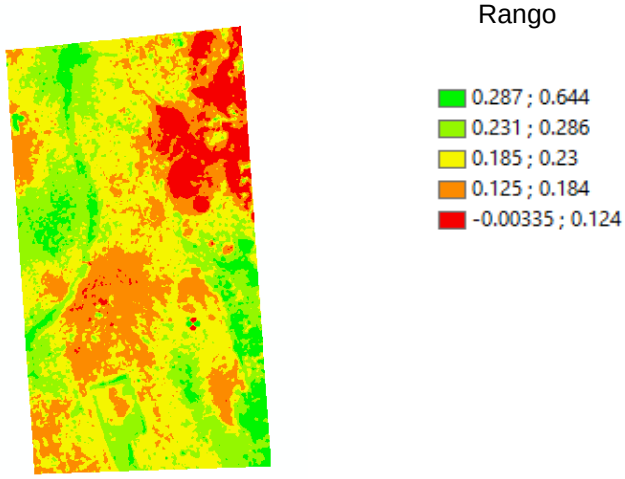
Tabla 7.5. Información estadística de los índices de vegetación NDVI y NDRE

Estadísticos	NDVI	NDRE
Count	501010	501010
Sum	102709	57778
Mean	0,205	0,115
Stdev	0,057	0,017
Min	-0,003	0,028

Max	0,644	0,274

ÍNDICE DE VEGETACIÓN

Área:		5010.105	m^2	Datum:	WGS 1984	
Centroide:	X:	354718	m	Zona UTM:	19 L	
	Y:	8820961	m	Altitud:	4226	m s. n. m.



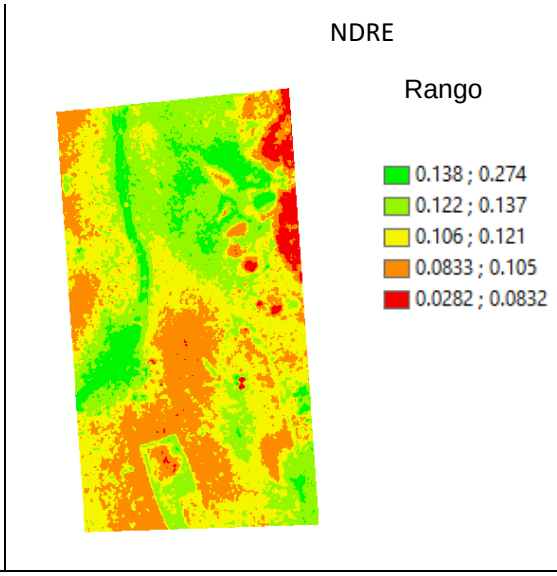


Figura 7.57. Índice de vegetación (NDVI y NDRE) de la formación vegetal césped con parches de bofedal del API PAM 20

Análisis de datos

Se determinó la relación con cada índice de vegetación (NDVI y NDRE) en respuesta a cada punto de muestreo del componente suelo en un radio de 0,5 m entorno al punto según la cobertura vegetal presente, ajustándose mejor el índice NDRE para el análisis, así mismo se observa valores de índices bajos donde la vegetación es escasa y aumentando los valores cuando hay mayor cobertura vegetal principalmente en zonas de bofedales, además se puede observar también valores bajos de coeficiente estadístico considerando un análisis en conjunto debido a encontrarse en una cobertura vegetal en recuperación (Figura 7.58).

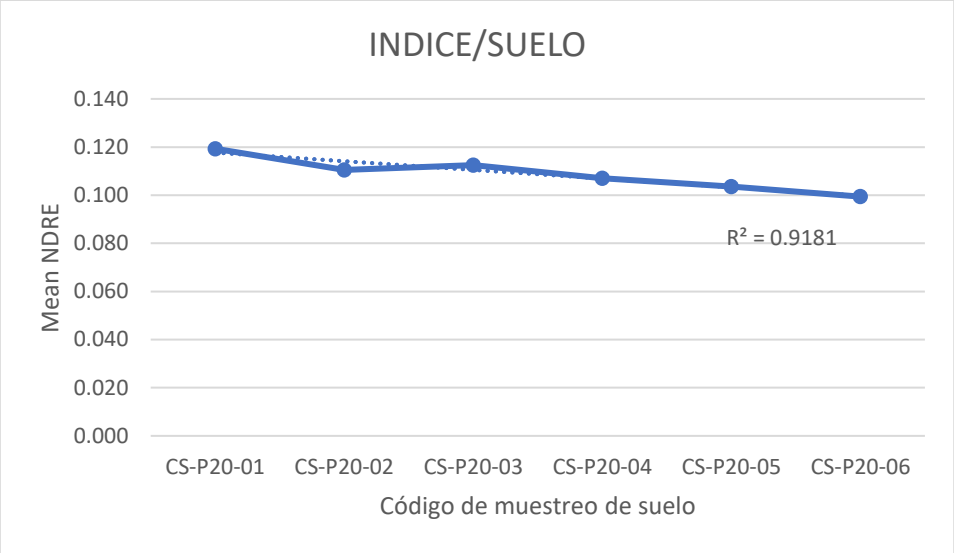


Figura 7.58. Distribución de los puntos de muestreo de suelo en una formación vegetal césped con parches de bofedal con respecto a los valores del índice de vegetación NDRE

El estudio de los índices de vegetación nos permite determinar el estado de la cobertura vegetal, la cual puede estar siendo afectado a consecuencia de diferentes factores que influye en la radiancia detectada por el sensor emitida por la planta a través de la clorofila (Gunamani *et al*., 1991); estos índices nos sirven como indicador para poder explicar como viene siendo afectado la vegetación por factores externos en relación al componente suelo

Composición florística y tejido vegetal

Según García y Dorronsoro (2005) una de las vías comunes de los metales incorporados al suelo puede ser, la absorción de estos por las plantas y así, incorporarse a las cadenas tróficas. En el API PAM 20, la vegetación muestra componentes de césped de puna con dominancia de *Festuca rigescens* y *Calamagrostis vicunarum*, aunque también existen áreas sin vegetación. Entre las especies observadas se seleccionó a *Festuca rigescens* para el estudio de tejido vegetal, por ser la más dominante en esta zona.

La especie *Festuca rigescens*, es una gramínea amacollada de tamaño variable, considerada como una especie poco deseable en su estado maduro (Maldonado, 2010), sin embargo, los brotes son consumidos por ganado ovino y alpacas (Minagri, 2013); asimismo el estudio realizado por Macuri (2017) concluye que es una especie deseable para vicuñas, por lo cual es importante conocer el contenido de metales que contiene.

Los resultados obtenidos en las muestras de tejido vegetal en esta API, muestran valores de concentración de metales diferentes entre la raíz y la parte aérea, con concentraciones más elevadas en la raíz (Figura 7.59). Sin embargo, no se observa una clara diferencia entre las muestras colectadas en el API y el punto control, en comparación a las muestras obtenidas en el API DR y API PAM 50 (Figura 7.94 y Figura 7.115).

Las concentraciones obtenidas en las muestras de la parte aérea de *Festuca rigescens*, colectadas en el API superan, de manera referencial, el contenido máximo de los metales de arsénico y mercurio en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal), de la norma española; asimismo, se registró que ambos metales también superaron los valores referenciales de la norma española, en las muestras tomadas

en el área seleccionada como punto control; esto último se explica por alto contenido en estos metales en los suelos del sitio control (Figura 7.59), en donde se observa que las concentraciones de mercurio y arsénico superan a los valores establecidos en los ECA para suelo 2017, uso agrícola.

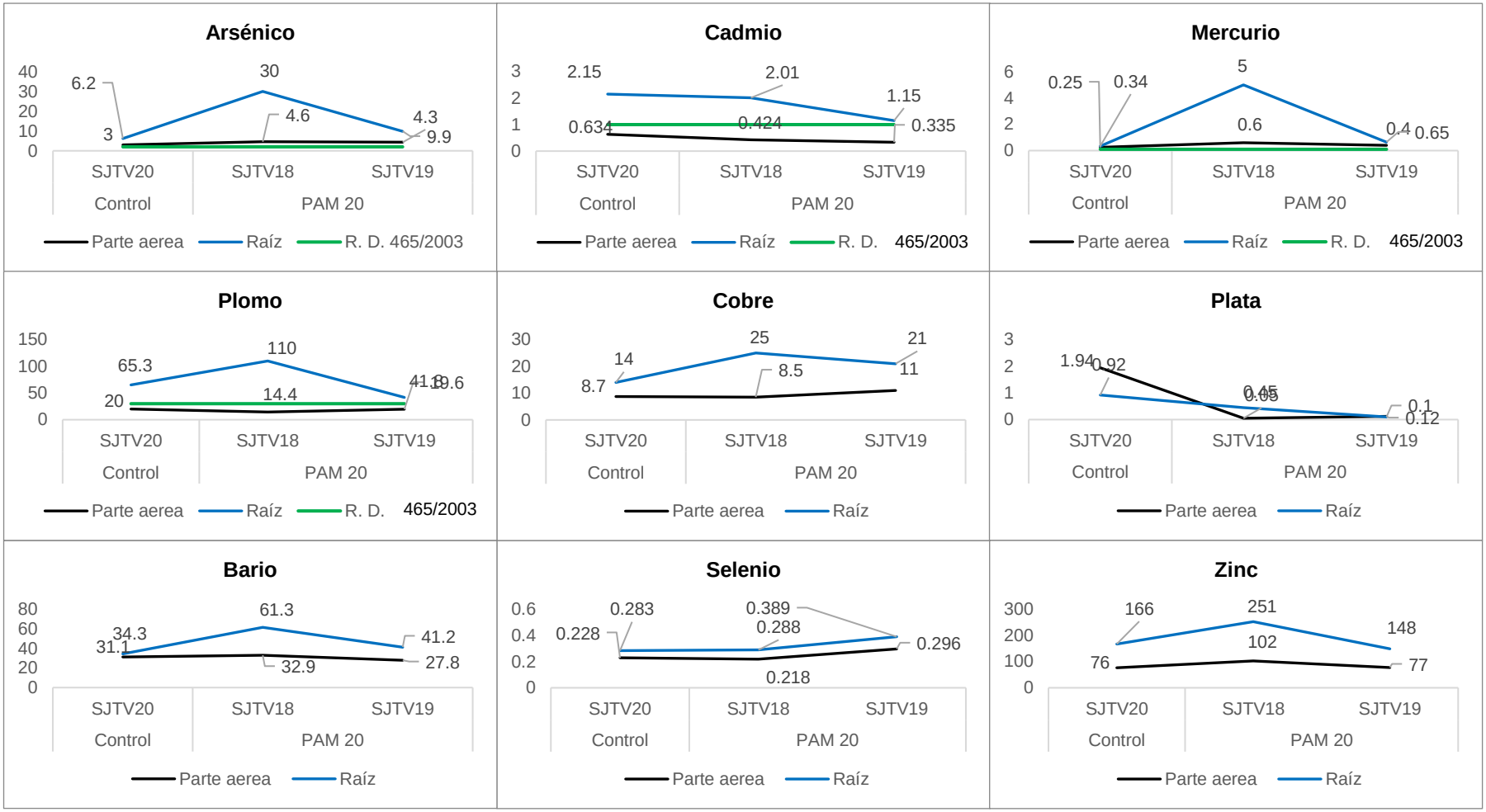


Figura 7.59. Concentración de metales obtenidos en *Festuca rigescens*

b. API MF

El área de potencial interés MF está ubicado en el distrito Simón Bolívar, es un área en donde no se tenía referencia de algún pasivo ambiental existente o de alguna actividad relacionada a la minería, en este API se realizó un muestreo de identificación de muestras compuestas debido a que no se conocía la distribución de los contaminantes y el área afectada, el relave colonial Tauro 6 se encuentra aproximadamente a 450 metros de dicho API, pero de acuerdo a la pendiente baja no se puede atribuir la influencia de este PAM.



Figura 7.60. A) Vista panorámica del API MF y B) carretera cercana al API MF

Durante la investigación histórica y el levantamiento técnico del sitio se pudo determinar que la cobertura vegetal presente en el API MF es una vegetación de césped de puna; conformado principalmente por las especies *Festuca rigescens, Calamagrostis vicunarum* y *Aciachne acicularis* entre otras propias de la zona que son consumidos por los animales que pastorean en el lugar (Figura 7.61), que forman parte de la fisiografía aluvial de este API, el área está cubierta por vegetación en 90 %, tal como se observa en la figura en mención; además por estar próximo al río San Juan, presenta una pendiente corta menor al 1 % aproximadamente.



Figura 7.61. Presencia de animales bovinos consumiendo vegetación en el API MF

De los resultados se determina que toda el área presenta concentraciones elevadas de metales pesados (arsénico, cadmio, mercurio, plomo, cobre, plata, selenio y zinc). Las

concentraciones máximas de arsénico, cadmio, mercurio y plomo superaron los valores establecidos en los ECA para suelo 2017, uso agrícola y el valor del nivel de fondo en todos los puntos muestreados (12 puntos). Cabe precisar que, las mayores concentraciones de arsénico, cadmio y plomo se registraron en el punto MF-06, donde arsénico superó en 2748 % al valor de la norma en mención y 1872,3 % al valor de nivel de fondo, cadmio superó el valor de esa norma en 229,7 % y el valor de nivel de fondo en 275,5 %, plomo superó el valor de la norma señalada en 4682,9 % y al valor de nivel de fondo en 2852,4 %, y bario superó el valor de dicha norma en 6,4 % y el valor del nivel de fondo en 275,3 %; mientras que, en el punto MF-11, el mercurio superó el valor de la norma establecida en 3597 % y al valor de nivel de fondo en 19249,7 % (Figura 7.62).

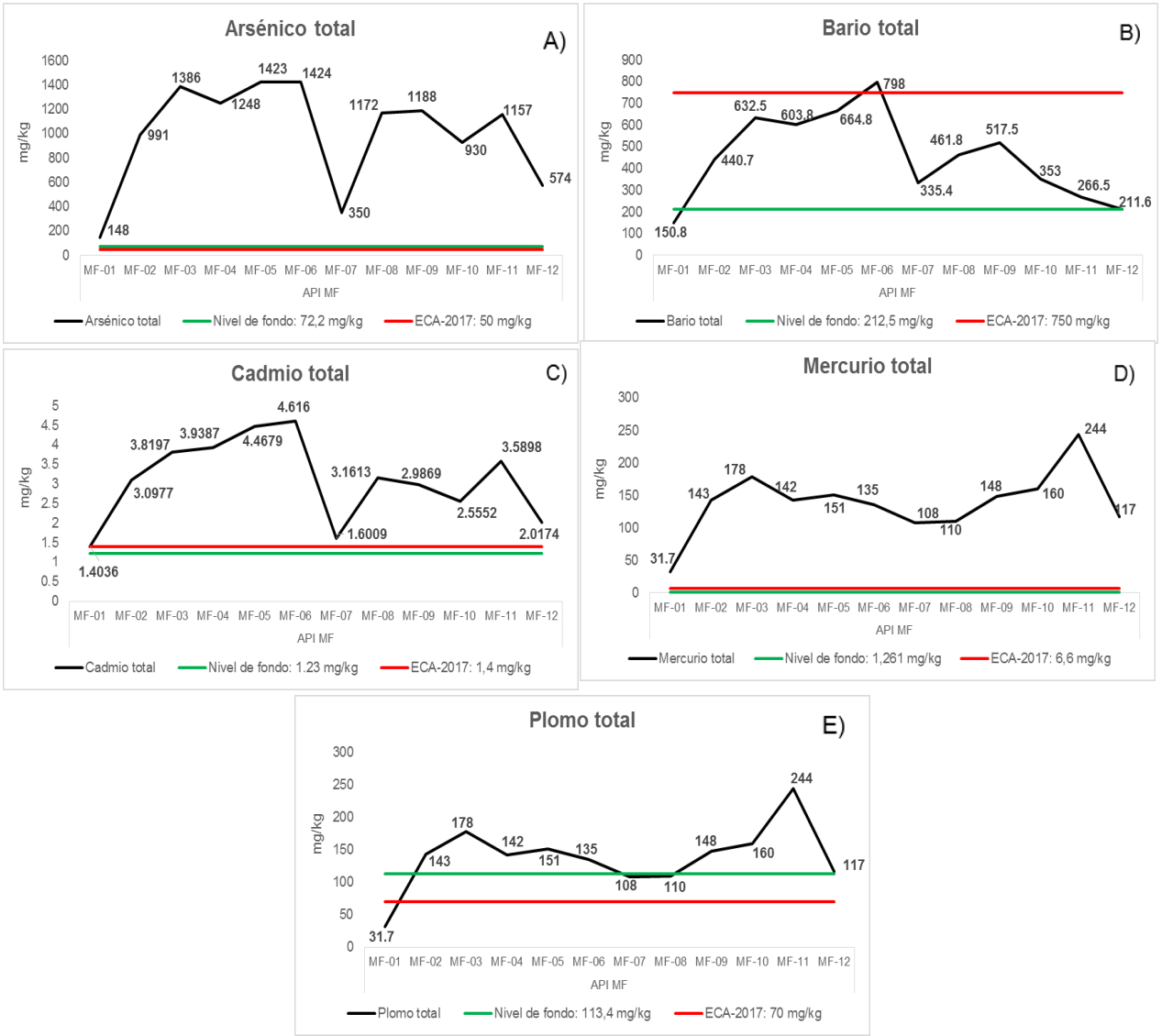


Figura 7.62. Concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo, comparadas con los valores de los ECA para suelo, uso agrícola y nivel de fondo

Así mismo se comparó, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola; donde los concentraciones altas de cobre y zinc estuvieron en el punto MF-11, que para el cobre superó en 414,3 % la guía en mención y al valor de nivel de fondo

en 480,9 %, zinc superó en 255,2 % dicha guía y al valor de nivel de fondo en 624,3 %; además, selenio presentó su máxima concentración en el punto MF-11, que superó el valor de la guía señalada en 243,9 % y el valor de nivel de fondo en 325,6 %. Mientras que, plata presentó su máxima concentración en el punto MF-05 que superó el valor de la guía establecida en 151,1 % y el valor de nivel de fondo en 210,8 % (Figura 7.63).

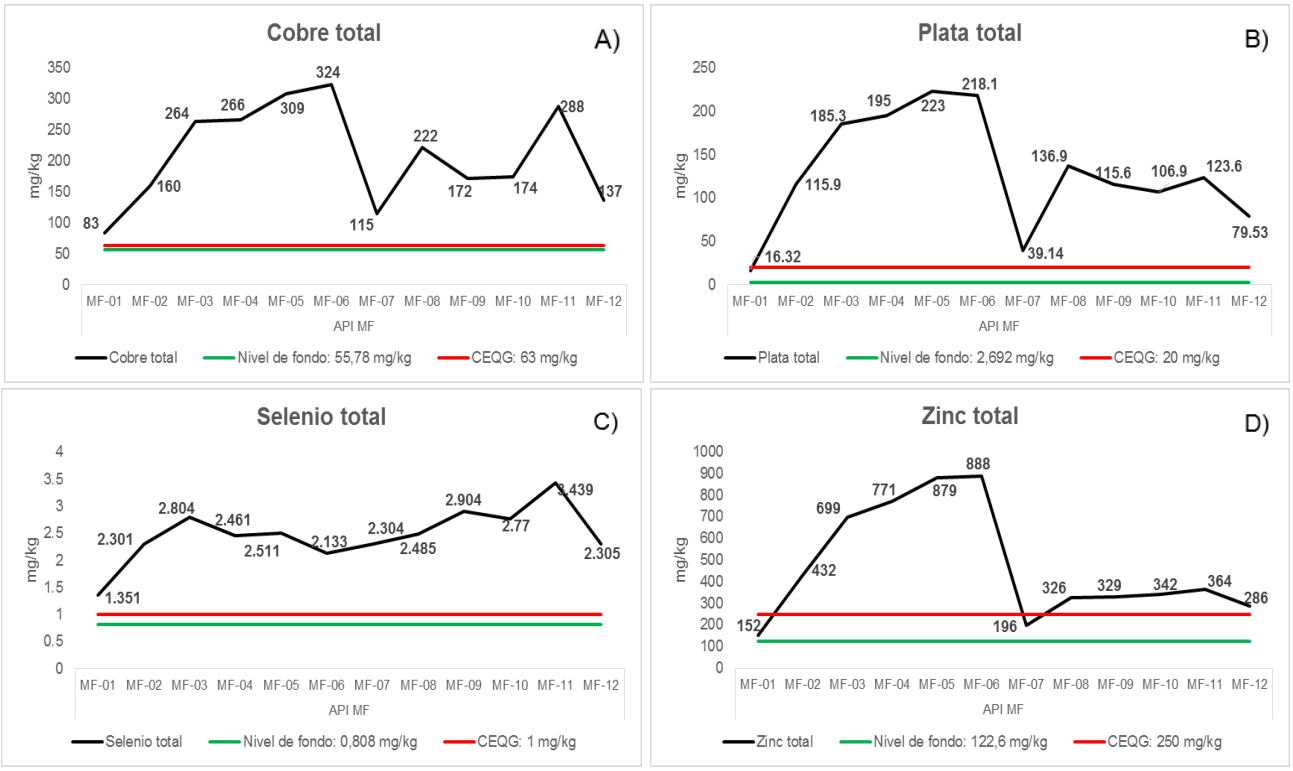


Figura 7.63. Concentraciones de A) cobre, B) zinc, C) selenio y D) plata en el API MF comparadas con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y nivel de fondo

Asimismo, se empleó el método de análisis geoestadístico para evaluar la distribución espacial e identificar la fuente de los metales pesados en el API MF mediante métodos de interpolación espacial. Para el presente estudio se empleó el método ordinario de kriging (OK), debido a que dicho método se emplea comúnmente para la investigación de suelos y en el mapeo de su contaminación (Xie *et al*., 2011), y se usó el software libre QGIS, para mapear la distribución espacial de los metales pesados en el API. En la Figura 5 se observa que las concentraciones más elevadas de arsénico, bario, cadmio, mercurio y zinc en el API (coloración más intensa), se registraron principalmente en los puntos MF-06 y MF-11.

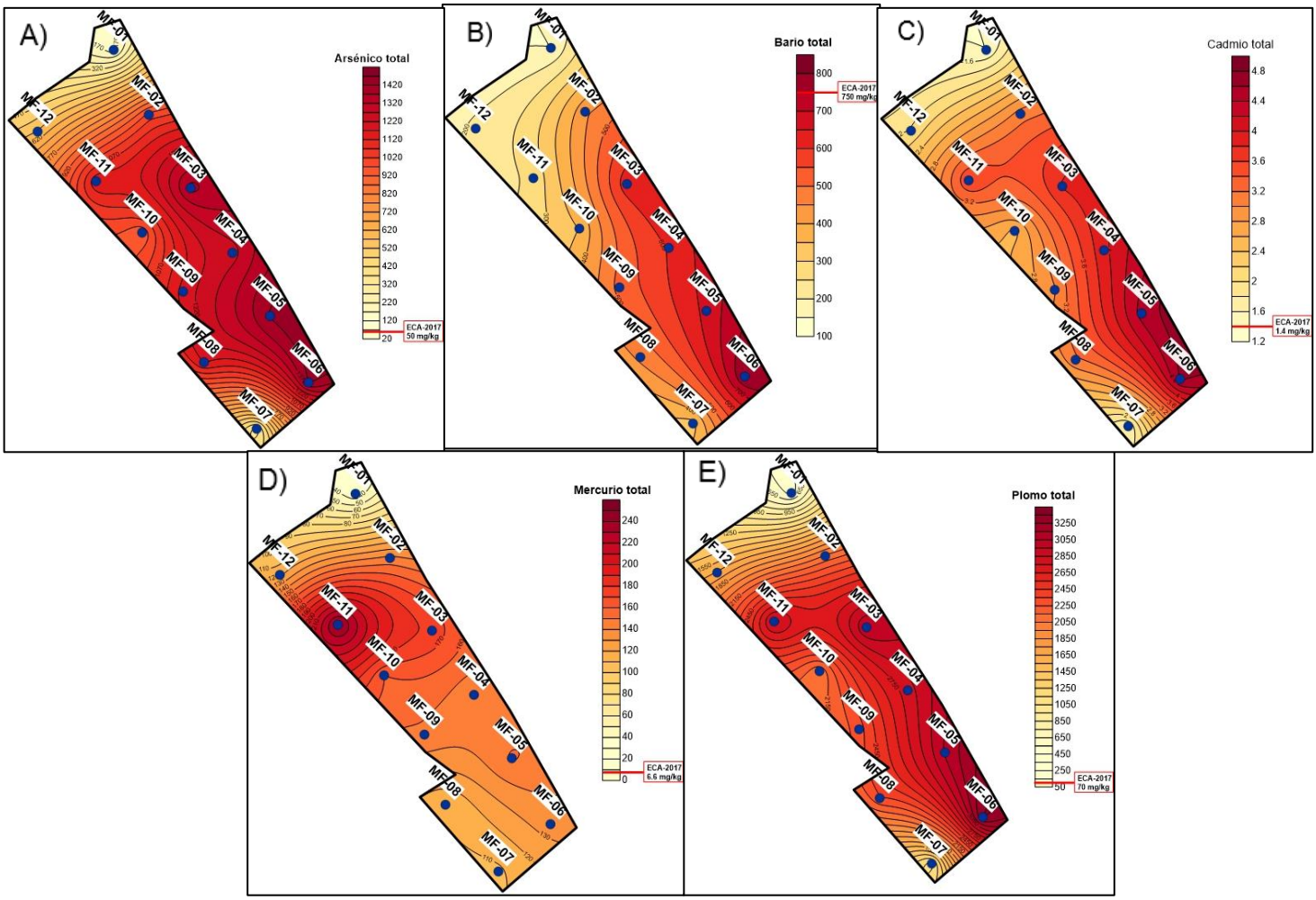


Figura 7.64. Distribución espacial de concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo registradas en el API MF, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola

De la misma forma, en la Figura 6 se muestra la distribución espacial de los parámetros cobre, plata, selenio y zinc, donde ocurre el mismo para las concentraciones máximas se encuentran en los puntos MF-06 y MF-11.

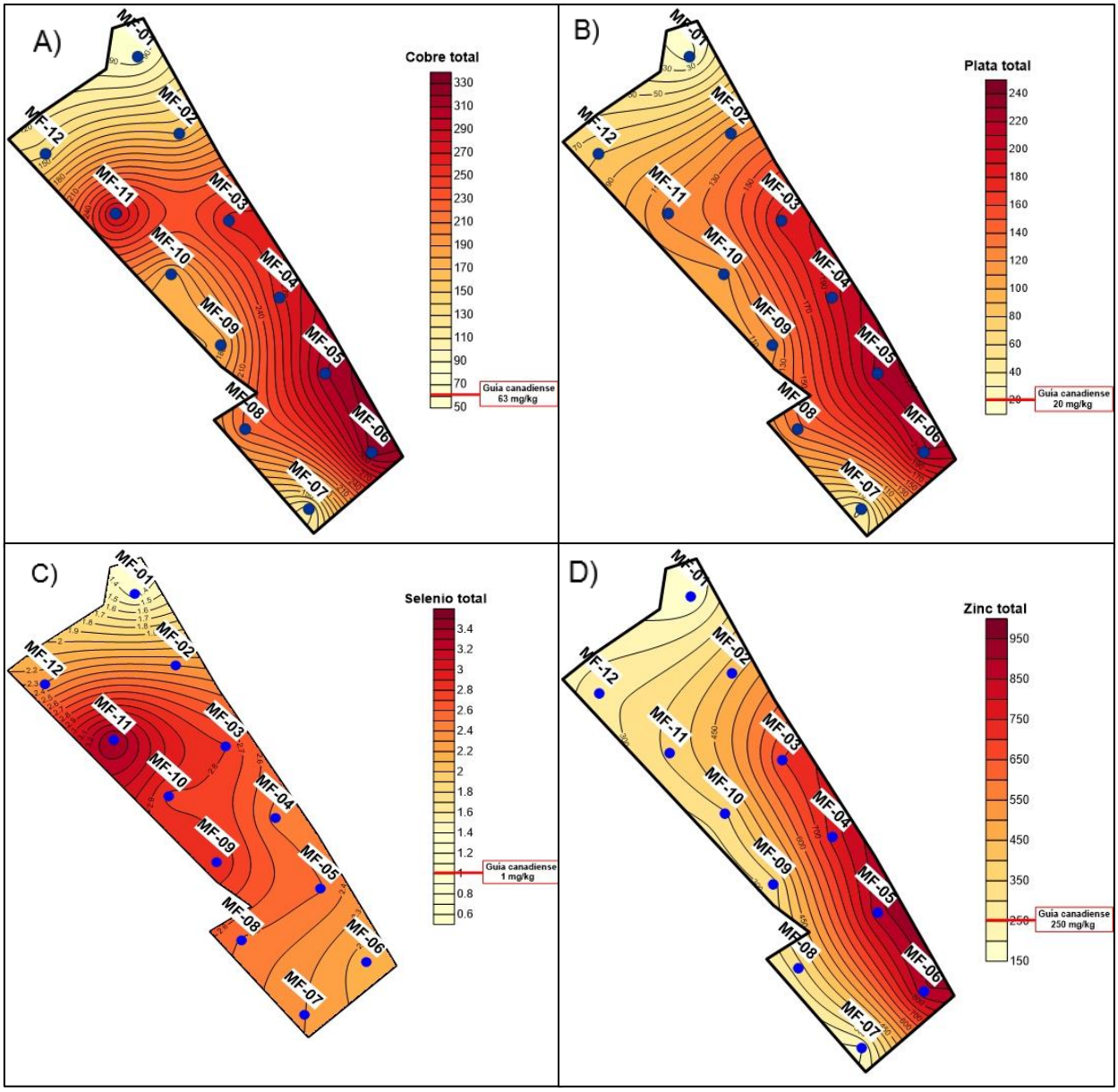


Figura 7.65. Distribución espacial de concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc registradas en el API MF, comparadas con los valores de la guía canadiense, uso agrícola

c. API PAM 22

El área de potencial interés PAM 22 está ubicado en el distrito Simón Bolívar, exactamente cercano al área que se ubicó el relave colonial Canal Rancas[66]; la cobertura vegetal está conformado por césped de puna y bofedal principalmente por las especies *Calamagrostis vicunarum* y *Aciachne acicularis*, formando llanuras aluviales, las cuales están cubiertas parcialmente; el área presenta una pendiente corta de aproximadamente menos a 1 %, con una fisiografía de terraza aluvial, donde se pudo apreciar la influencia de la acumulación de este relave colonial debido a su elevada carga de metales (Figura 7.66).

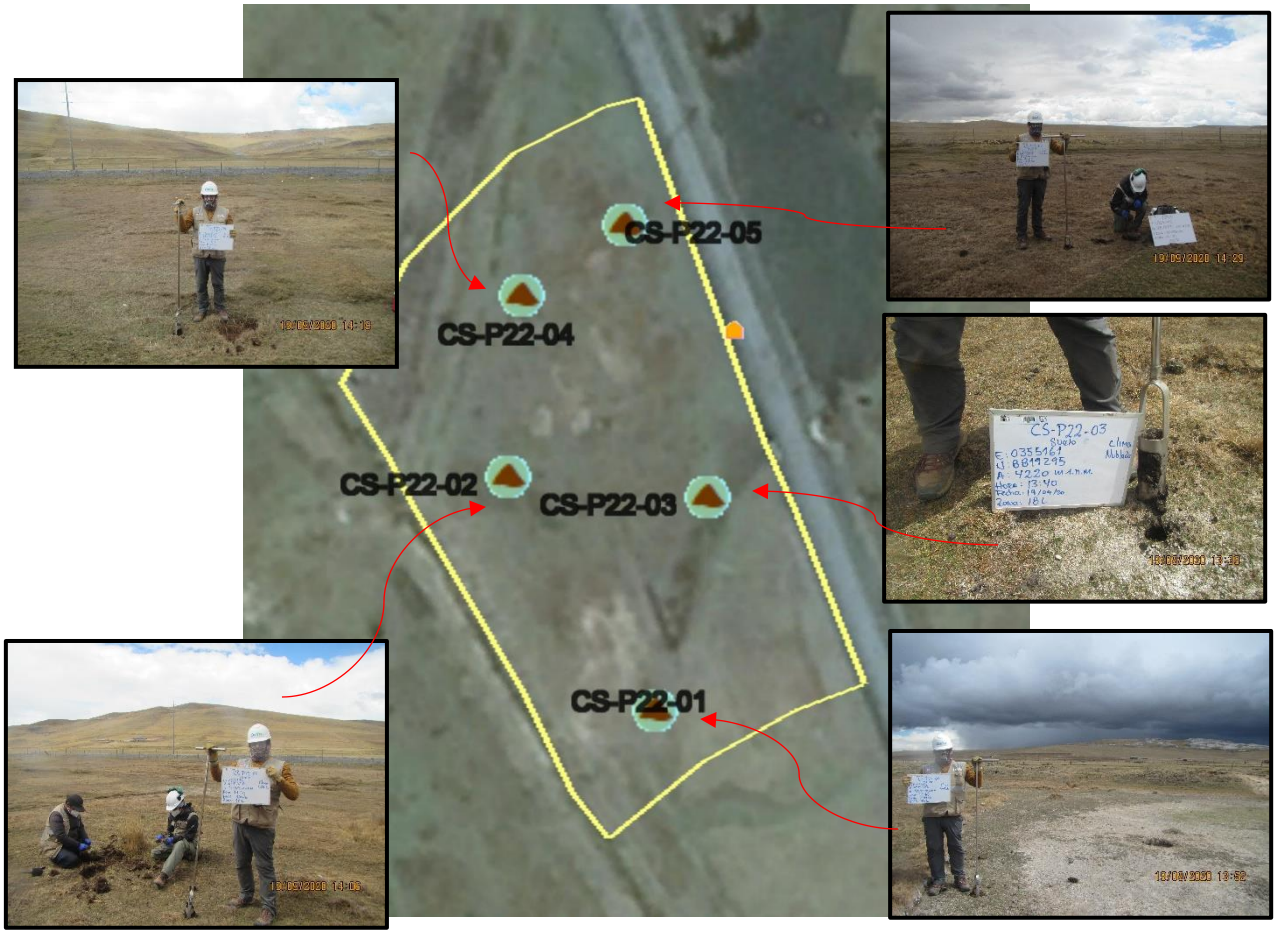


Figura 7.66. Vista panorámica del API PAM 22, donde se aprecia sus puntos de muestreo

66 Aprobado mediante Resolución Directoral N.° 238-2020-MEM/DM, fue publicada el 24 de agosto de 2020 «Actualización del Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros»

A la Compañía Minera Aurífera Aurex S.A. se le autorizó en el 2014, el reaprovechamiento de ese residuo colonial[67], por ese motivo no se encontró el residuo minero, lo que se observó durante la evaluación fue una huella del movimiento de tierra formando una depresión sobre el terreno; siendo uno de los puntos más críticos CS-P22-01 que es justamente el lugar del terreno que muestra signos de remoción. En la Figura 7.67, se puede apreciar que el suelo presenta características diferentes a las áreas aledañas, una de las características es la cobertura vegetal de cada punto.

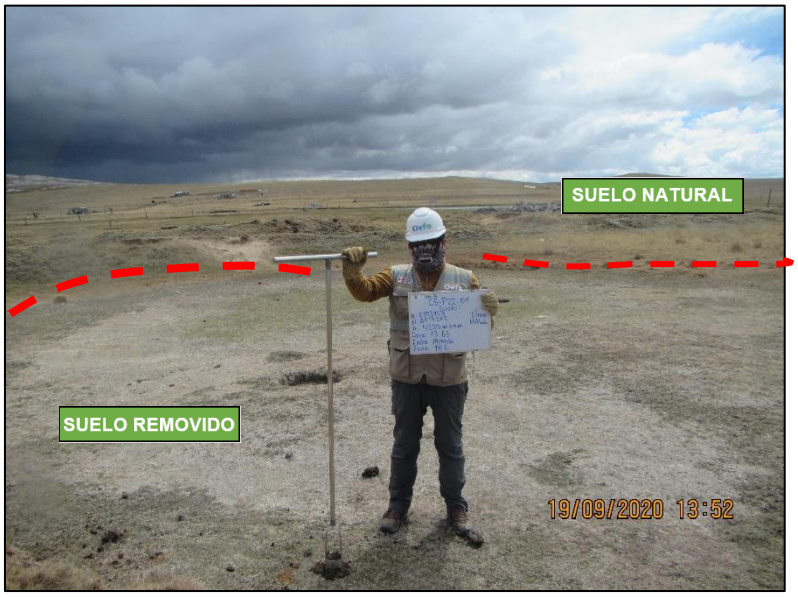


Figura 7.67. Suelo con signos de remoción en el API PAM 22

En cuanto a la degradación de los suelos, Jiménez *et al*. (2017) supone una destrucción de las condiciones ambientales originales, dando paso a la degradación del suelo, esta degradación se hace evidente debido a la perdida de materia orgánica (degradación biológica), alteración de textura y estructura (degradación física) y finalmente con la acumulación de metales y pérdida de parámetros edáficos (degradación química).

Además de conocer los resultados de cobertura, calculados mediante los índices de vegetación entre cada año, se generó mapas de cambios comparando cada 3 años con el objetivo de conocer los cambios más significativos mediante las tonalidades bien marcadas, como resultado de los cambios generados por algunas actividades externas que se ven reflejados en la cobertura vegetal.

El uso de imágenes satelitales y multitemporales[68] de 1988, 1990, 1994, 1997, 1999, 2005, 2007, 2011, 2013, 2015 y 2019 de los cuales se obtuvieron los índices NDVI y NDRE (Figura 7.68), sirvió para determinar el área de potencial interés. Cabe precisar que, la degradación del suelo se mide a través del cambió de productividad y este se estimada a través de los índices de vegetación normalizada y los índices de borde rojo de diferencia normalizada.

67 Aprobada mediante Resolución Directoral N.° 248-2014-MEM-DGM/V, del 8 de julio de 2014.
68 Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS-Glovis): Landsat Landsat 5 (1988, 1990, 1994, 1997, 1999, 2005, 2007, 2011), Landsat 8 (2013, 2015 y 2019).

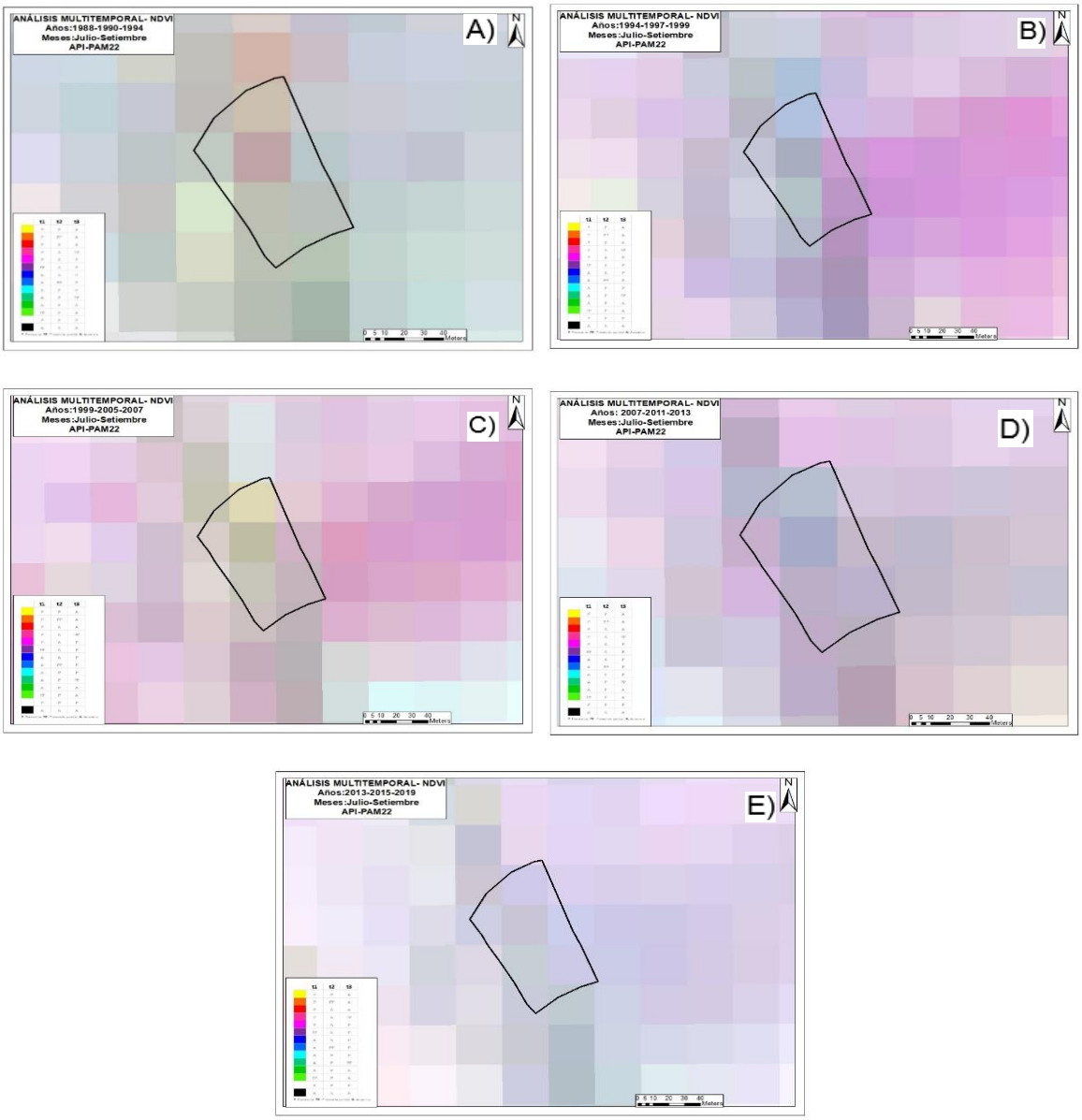


Figura 7.68. Análisis multitemporal de NDVI de la subcuenca San Juan de A) 1988, 1990 y 1994; de B) 1994, 1997 y 1999; de C) 1999, 2005 y 2007; de D) 2007, 2011 y 2013; y de E) 2013, 2015 y 2019

Las concentraciones de arsénico cadmio y mercurio superaron los valores establecidos en los ECA para suelo 2017, uso agrícola y el valor del nivel de fondo en 3 de 5 puntos; cabe precisar que, las mayores concentraciones de arsénico, cadmio y mercurio se registraron en el punto CS-P22-01, donde arsénico superó en 4266% al valor de la norma en mención y al valor de nivel de fondo en 2923,5 %, cadmio superó el valor de esa norma en 439 % y el valor de nivel de fondo en 513,5 %, mercurio superó el valor de la norma establecida en 3097 % y al valor de nivel de fondo en 16632%, plomo registró concentraciones que superaron dicha norma en 4 de 5 puntos, donde la mayor concentración se registró en el punto CS-P22-01, donde superó en 8671,4 % al valor de la norma establecida y al valor de nivel de fondo en 5314,5 %; por su parte cadmio superó el valor de la norma señalada en 3017,5 % y el valor de nivel de fondo en 3024,2%, de la misma manera mercurio superó en

3339,4 % al valor de la norma indicada y al valor de nivel de fondo en 51490,9% (Figura 7.69).

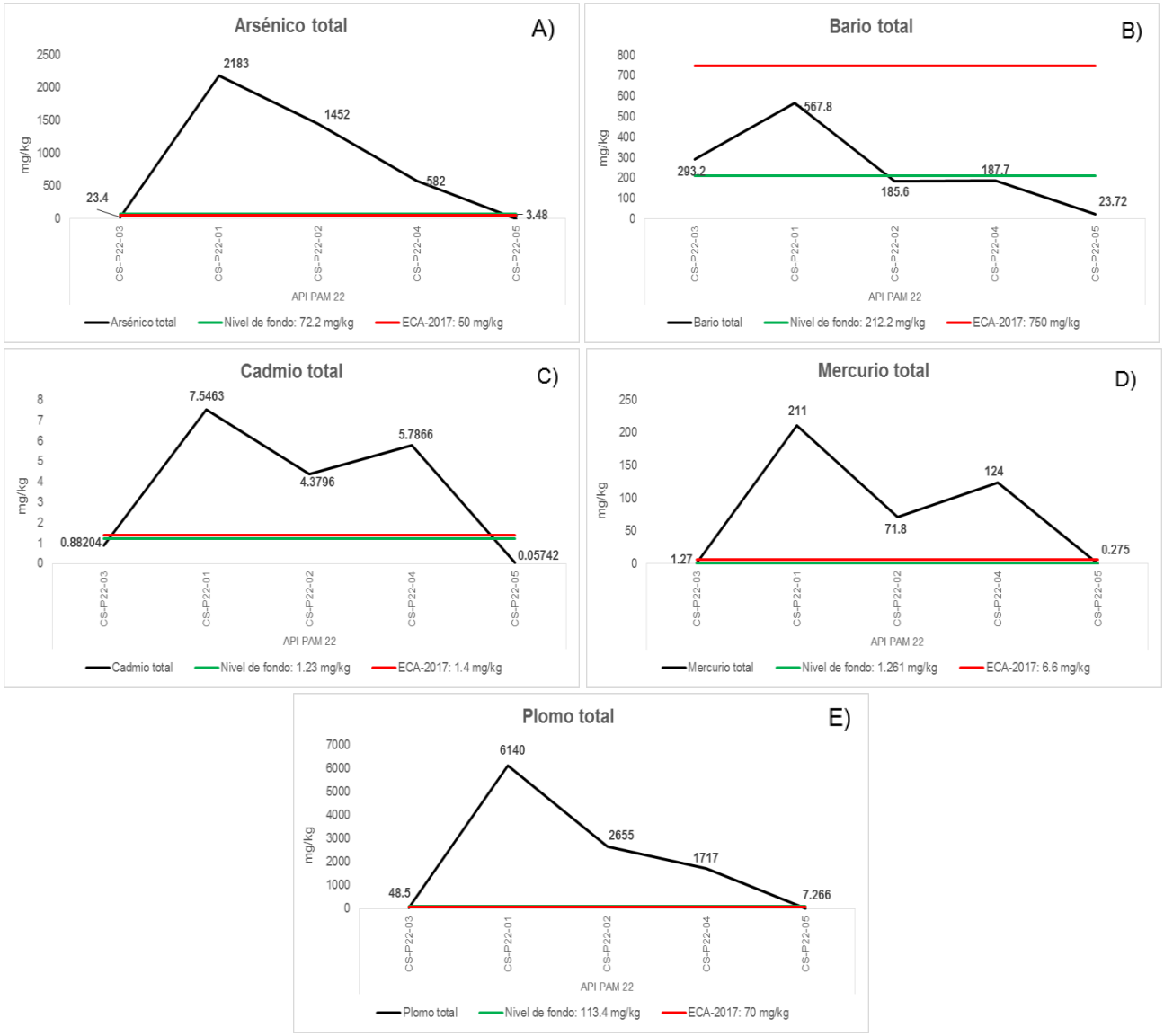


Figura 7.69. Concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo en el API PAM 22, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores de nivel de fondo

Se determinó que los valores de la guía canadiense de suelo de uso agrícola se superaron, de manera referencial, por las concentraciones de cobre, plata y zinc en 3 de 5 puntos, donde en el punto CS-P22-01 se presentó las mayores concentraciones, además para el cobre, plata y zinc se superaron en 2106,3 %, 926 % y 425,2 % los valores de la guía en mención respectivamente, y los niveles de fondo fueron superados en 2391,9 %, 7522,6 % y 971 % respectivamente; la mayor concentración de selenio fue en el punto CS-P22-03 que superó en 416,8 % el valor de guía señalada y el valor del nivel de fondo en 539,6 % (Figura 7.70).

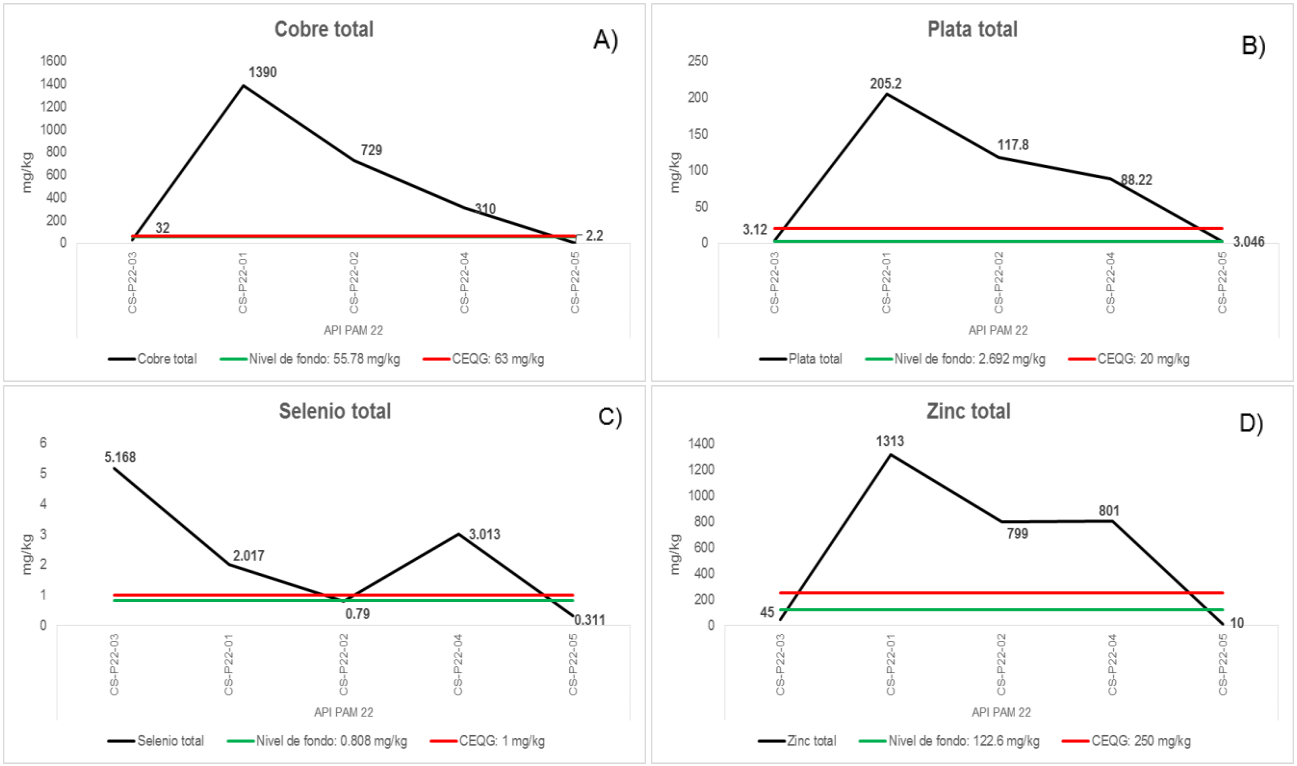


Figura 7.70. Concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc en el API PAM 22, comparadas con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y los valores del nivel de fondo

Asimismo, se empleó el método de análisis geoestadístico para evaluar la distribución espacial e identificar la fuente de los metales pesados en el API PAM 22 mediante métodos de interpolación espacial. Para la presente evaluación se empleó el método ordinario de kriging (OK), debido a que dicho método se emplea comúnmente para la investigación de suelos y en el mapeo de su contaminación (Xie *et al*., 2011), y se usó el software libre QGIS, para mapear la distribución espacial de los metales en las API. En la Figura 7.71 se observa que las distribuciones espaciales de las concentraciones más elevadas de metales como arsénico, cadmio, mercurio y plomo se registraron en los puntos CS-P22-01, CS-P22-02 y CS-P22-04.

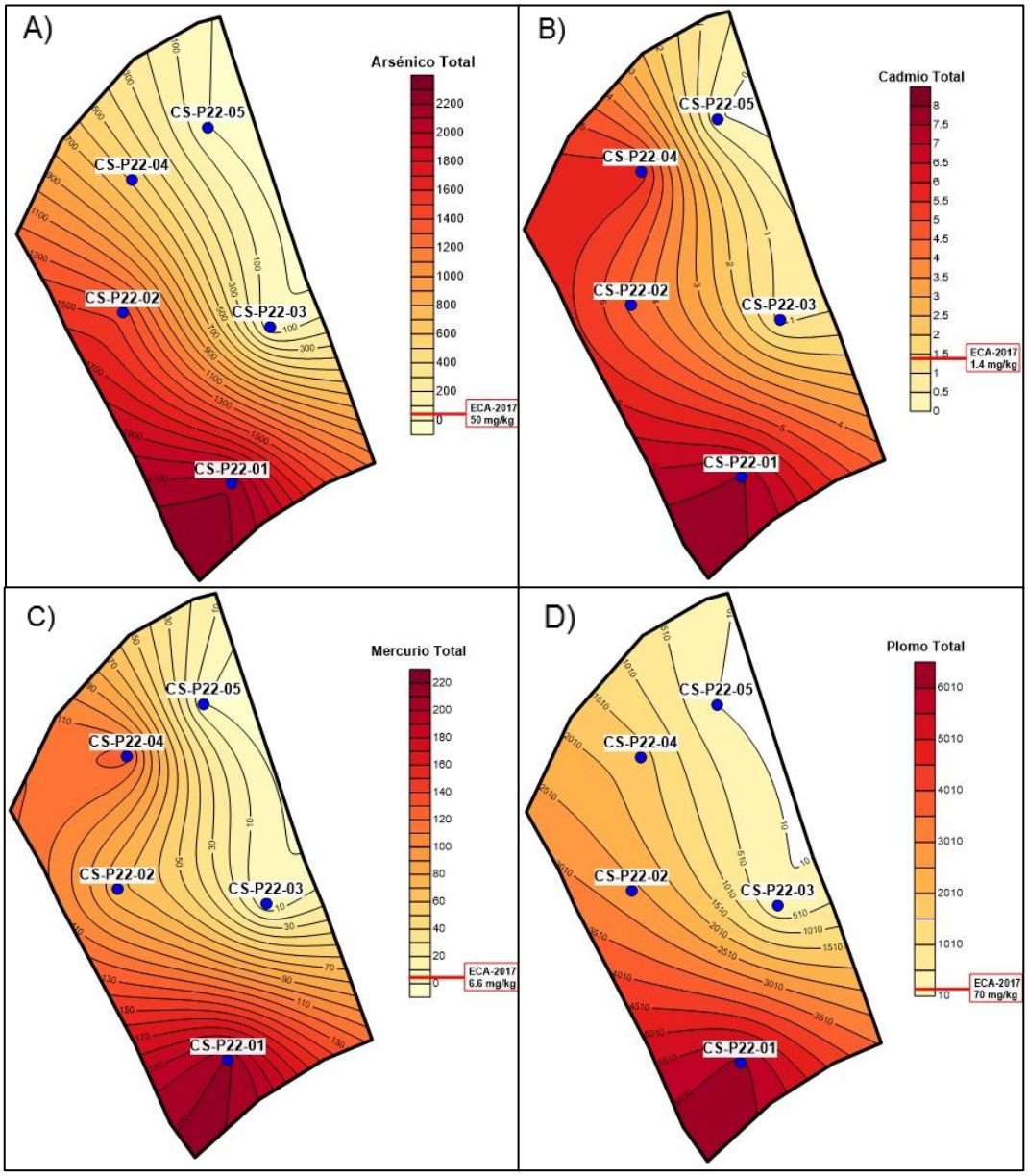


Figura 7.71. Distribución espacial de las concentraciones de A) arsénico, B) cadmio, C) mercurio y D) plomo registradas en el API PAM 22, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola

De la misma manera, se realizó la distribución espacial de las concentraciones de los metales como el cobre, plata, selenio y zinc, donde sucedió el mismo comportamiento de valores máximos para los puntos CS-P22-01, CS-P22-02 y CS-P22-04 (Figura 7.72).

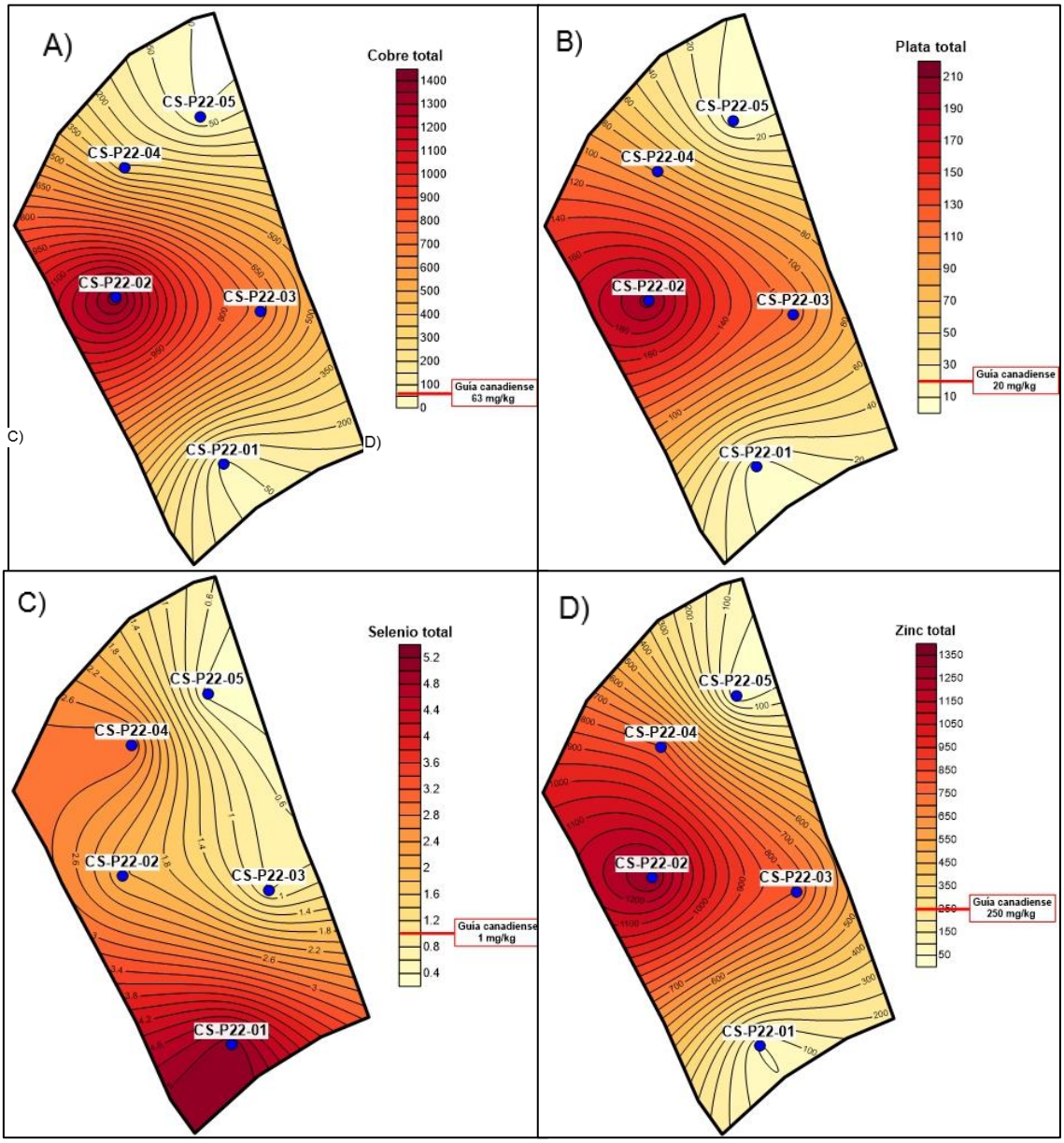


Figura 7.72. Distribución espacial de las concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc registradas en el API PAM 22, comparadas con los valores de la guía canadiense, uso agrícola

La degradación del suelo se mide a través del «cambio en la productividad del suelo» utilizando, como *proxy*, la productividad primaria neta (PNP) que se estima a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) detectado de forma remota (Dent *et al.*, 2015).

La pérdida de materia orgánica y la acumulación de metales pesados en el área de potencial interés, respecto a la acumulación de metales pesados en el nivel de fondo, ha ocurrido debido a la acumulación proveniente de los pasivos ambientales de origen minero específicamente del relave colonial Canal Rancas, esta acumulación generó aporte al suelo

al sufrir cambios temporales por clima y uso actual de suelos, los cuales fueron corroborados con el análisis multitemporal con imágenes satelitales[69] en las áreas de potencial interés API APM 22 de 1988, 1990, 1994, 1997, 1999, 2005, 2007, 2011, 2013, 2015 y 2019) en donde se empleó el índice NDVI (Figuras 7.73 y 7.74).

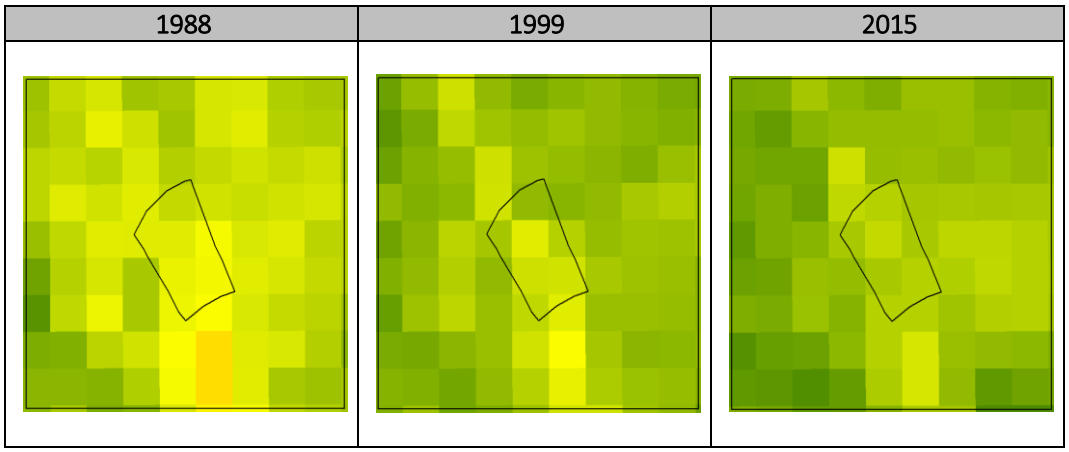


Figura 7.73. Imágenes satelitales Landsat de índice de vegetación NDVI desde julio hasta setiembre para 1988, 1999 y 2015

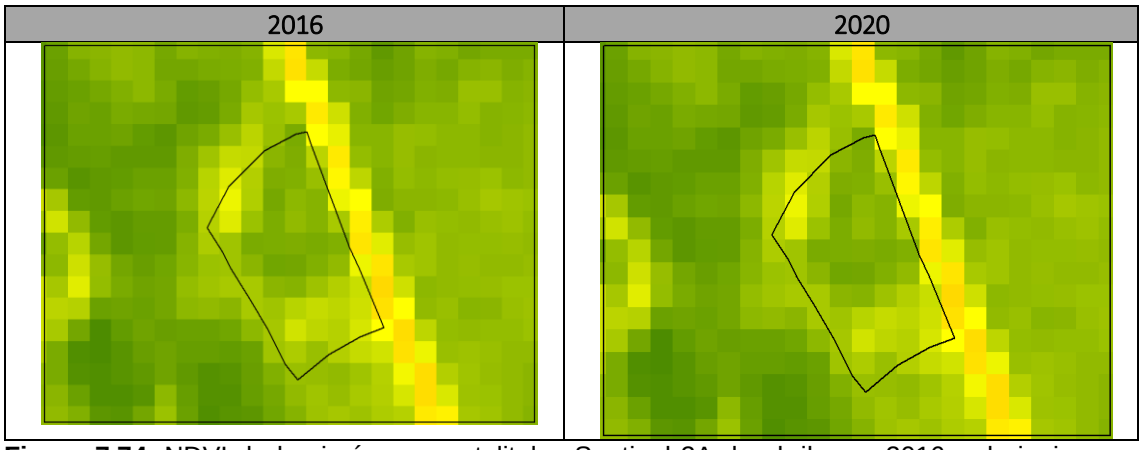


Figura 7.74. NDVI de las imágenes satelitales Sentinel 2A de abril para 2016 y de junio para 2020

En esta API se hizo un sobrevuelo de un área de 0,501 ha, que conforma la formación de cobertura vegetal bofedal con parches de césped en la que se realizó el análisis de los índices de vegetación de NDVI y NDRE. Obteniéndose una media de 0,358 de NDVI y 0,095 de NDRE (Tabla 7.6 y Figura 7.75).

Tabla 7.6. Información estadística de los índices de vegetación NDVI y NDRE

Estadísticos	NDVI	NDRE
Count	372951	372959
Sum	133605,682	35597,8169
Mean	0,358	0,095
Stdev	0,099	0,019
Min	0,070	-0,028
Max	0,706	0,318

69 Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS-Glovis): Landsat 5 (2005, 2007, 2008, 2010), Landsat 8 (2014, 2017).

ÍNDICE DE VEGETACIÓN						
Área:		5010,105	m^2	Datum:	WGS 1984	
Centroide:	X:	354718	m	Zona UTM:	19 L	
	Y:	8820961	m	Altitud:	4220	m s. n. m.

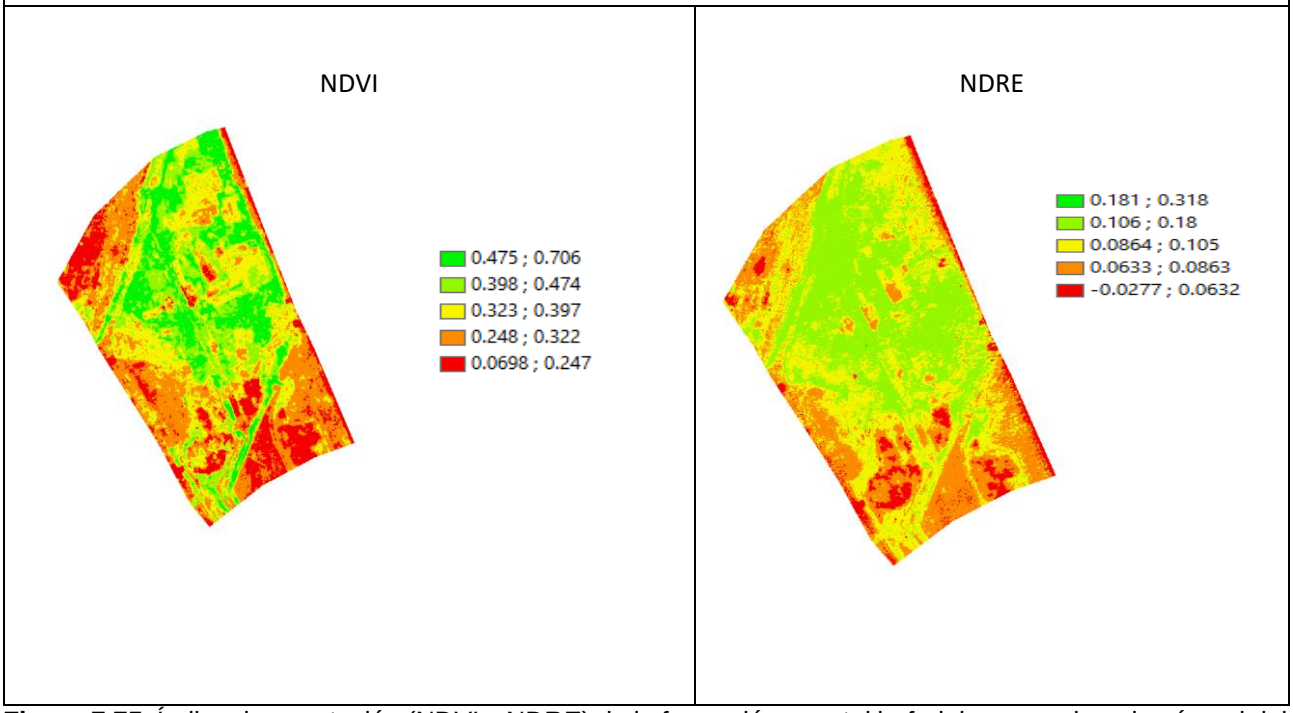


Figura 7.75. Índice de vegetación (NDVI y NDRE) de la formación vegetal bofedal con parches de césped del API PAM 22

Análisis de datos

Se determinó la relación con cada índice de vegetación (NDVI y NDRE) en respuesta a cada punto de muestreo del componente suelo en un radio de 0,5 m entorno al punto, según la cobertura vegetal presente, ajustándose mejor el índice NDVI para el análisis, así mismo se observa valores de índices bajos donde la vegetación es escasa y aumentando los valores cuando hay mayor cobertura vegetal principalmente en zonas de bofedales (Figura 7.76).

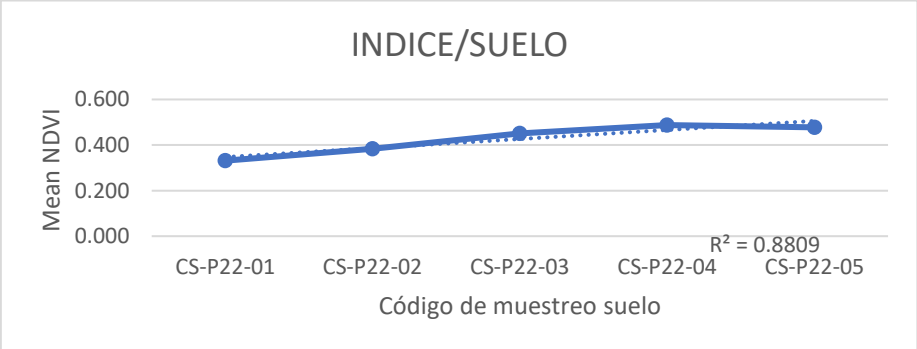


Figura 7.76. Distribución de los puntos de muestreo de suelo en una formación vegetal bofedal con parches de césped con respecto a los valores del índice de vegetación NDVI

El estudio de los índices de vegetación nos permite determinar el estado de la vegetación, la cual puede estar siendo afectado a consecuencia de diferentes factores que influye en la radiancia detectada por el sensor emitida por la planta a través de la clorofila (Gunamani *et al*.,1991); estos índices nos sirven como indicador para poder explicar como viene siendo afectado la vegetación por factores externos en relación al componente suelo

Composición florística y tejido vegetal

Según García y Dorronsoro (2005) una de las vías comunes de los metales incorporados al suelo puede ser, la absorción de estos por las plantas y así, incorporarse a las cadenas tróficas. En el API PAM 22, la vegetación muestra componentes principalmente de bofedal y césped de puna con dominancia de *Plantago tubulosa*, *Festuca rigescens* y *Calamagrostis vicunarum*, aunque también existen áreas sin vegetación. Entre las especies observadas se seleccionó a las especies *Plantago tubulosa* y *Festuca rigescens* para el estudio de tejido vegetal.

La especie *Plantago tubulosa*, es una especie herbácea que forma almohadillados planos, propios de los bofedales del Perú. Es considerada como una planta poco palatable (Flores, 2001 y Castillo, 2019). Sin embargo, cumple un rol ecológico importante en la formación de bofedales. La especie *Festuca rigescens*, es una gramínea amacollada de tamaño variable, considerada como una especie poco deseable en su estado maduro (Maldonado, 2010), sin embargo, los brotes son consumidos por ganado ovino y alpacas (Minagri, 2013), asimismo el estudio realizado por Macuri (2017) concluye que es una especie deseable para vicuñas, por lo cual es importante conocer el contenido de metales que contiene.

Los resultados obtenidos en las muestras de tejido vegetal de *P. tubulosa* en esta API, muestran concentraciones de metales ligeramente diferentes entre la raíz y la parte aérea, con concentraciones poco más elevadas en la raíz (Figura 7.77). Sin embargo, no observa una clara diferencia entre las muestras colectadas en el API y el punto control en la mayoría de los metales analizados. Aunque en la mayoría de los casos los valores más bajos como en arsénico, mercurio, plomo, plata y selenio son ligeramente menores en el punto control.

Por otro lado, los resultados obtenidos en las muestras de tejido vegetal de *Festuca rigescens* en esta API, muestran valores de concentración diferentes entre la raíz y la parte aérea, con concentraciones más elevadas en la raíz (Figura 7.78). Sin embargo, no observa una clara diferencia entre las muestras colectadas en el API y el punto control en la mayoría de los metales analizados, en comparación a las muestras obtenidas en el API DR y API PAM 50 (Figura 7.94 y Figura 7.115). Aunque en la mayoría de los casos los valores más bajos como en arsénico, mercurio y plomo, son ligeramente menores en el punto control, tanto en la raíz como en la parte aérea.

Las concentraciones obtenidas en las muestras de la parte aérea de *Plantago tubulosa*, colectadas en el API superan, de manera referencial, el contenido máximo de los metales de arsénico, mercurio y plomo, en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal), de la norma española; asimismo, se registró que esos metales también superaron los valores referenciales de la norma española, en las muestras tomadas en el área seleccionada como punto control (Figura 7.77). Las concentraciones obtenidas en las muestras de la parte aérea de *Festuca rigescens*, colectadas en el API superaron, de manera referencial, el contenido máximo de los metales de arsénico y mercurio en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal), de la norma española; tambien se registró que ambos metales superaron los valores, referenciales, de la norma española en las muestras tomadas en el área seleccionada como punto control (Figura 7.78).

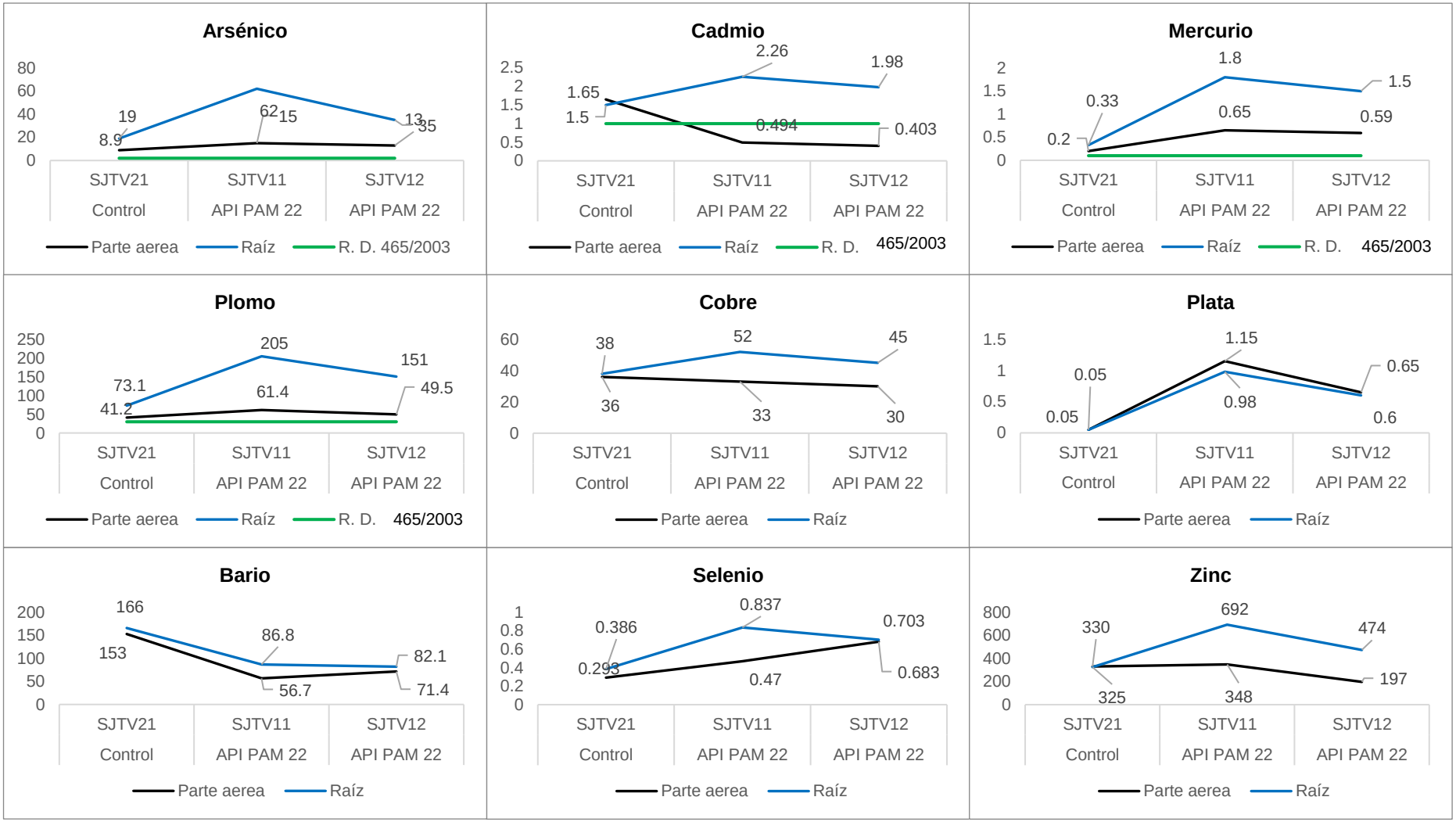


Figura 7.77. Concentración de metales obtenidos en *Plantago tubulosa*

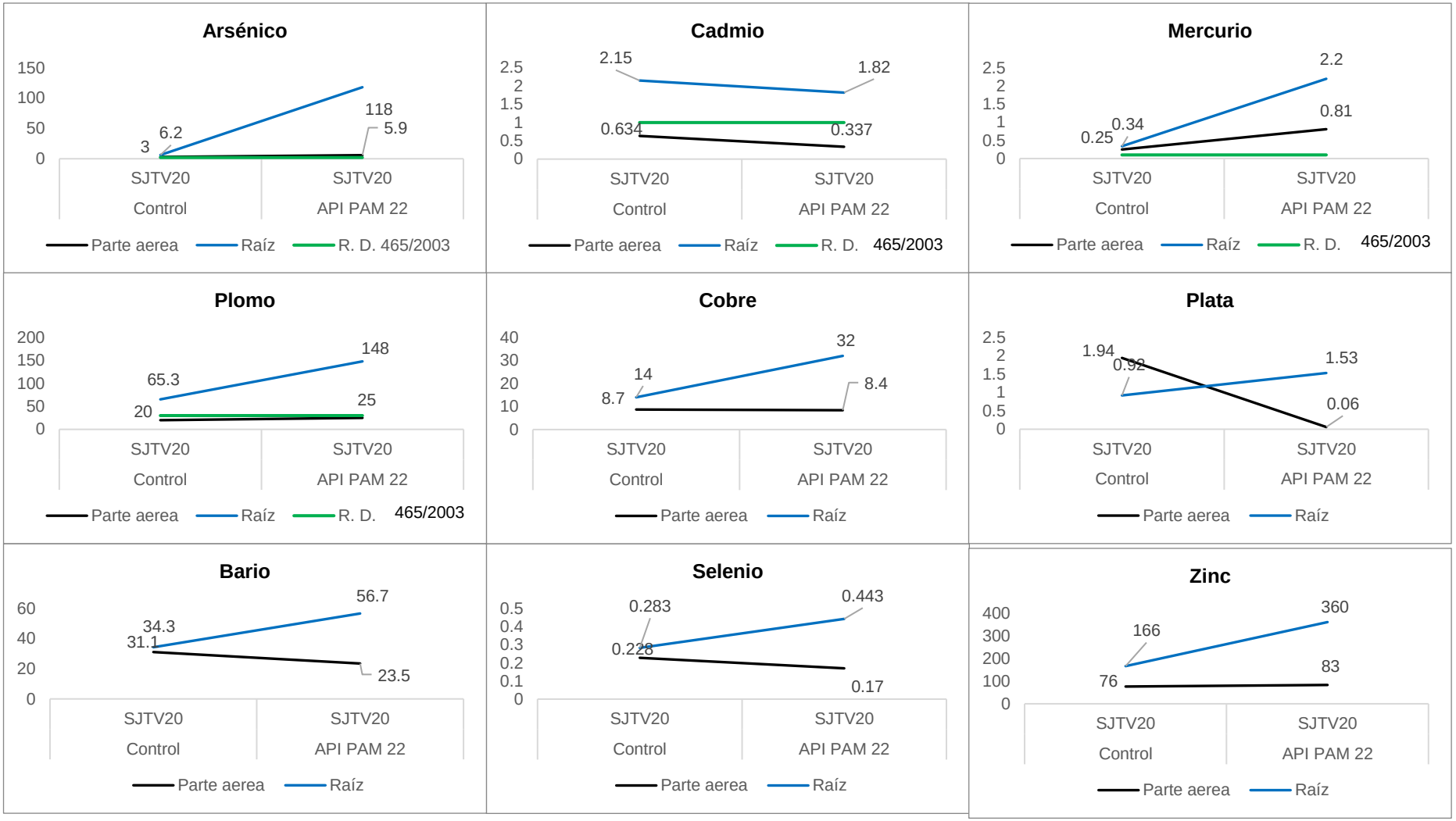


Figura 7.78. Concentración de metales obtenidos en *Festuca rigescens*

d. API PRS

El API PRS, fisiográficamente, forma parte de una terraza inundable con pendiente corta aproximadamente menor a 1 %, con cobertura vegetal en forma rala conformada predominantemente por *Dactylis glomerata* que sirve de alimento para el ganado de los pobladores de la comunidad campesina Yurajhuanca. Este API se dividió en 2 sectores, el primer sector conformado por 19 puntos, se ubicó en el excauce del río Ragra y su desembocadura al río San Juan; el segundo sector conformado por 6 puntos muestreados a 2 niveles (superficial 0 cm a 0,15 cm y profundidad 15 cm a 30 cm), este sector corresponde al área donde se ubicaron los pasivos ambientales mineros (PAM CM Aurífera Aurex S.A. y PAM residuos coloniales) ambos inventariados por el Minem[70].

Sector 1: En el Plan de cierre integral de pasivos de origen minero río San Juan y delta Upamayo, se indica: «*En el río San Juan, adyacente a la desembocadura de ex Ragra, se han depositado una cantidad de sedimentos con altas concentraciones de metales. Estos depósitos, que presentan valores altos de As, Cu, Hg, Pb y Zn, se ubican en el cauce del río y son una fuente de contaminación permanente de las aguas que fluyen hacia el Lago Chinchaycocha. A pesar que volumétricamente no son grandes depósitos, sus altas concentraciones generan un importante efecto en las concentraciones químicas de las aguas y de una gran cantidad de sólidos en suspensión. El plan de cierre propuesto considera la remoción mecánica de estos sedimentos y el monitoreo posterior de las condiciones en el Río San Juan*»[*sic*][71].

En la Figura 7.79A se observa el excauce del río Ragra de coloración marrón, que difiere de la coloración verdosa del río San Juan, la imagen corresponde al 2013; en la Figura 7.79B se observa el cauce actual del río Ragra, el río San Juan cambia de color verde a marrón luego de la desembocadura, la imagen corresponde al 2020.

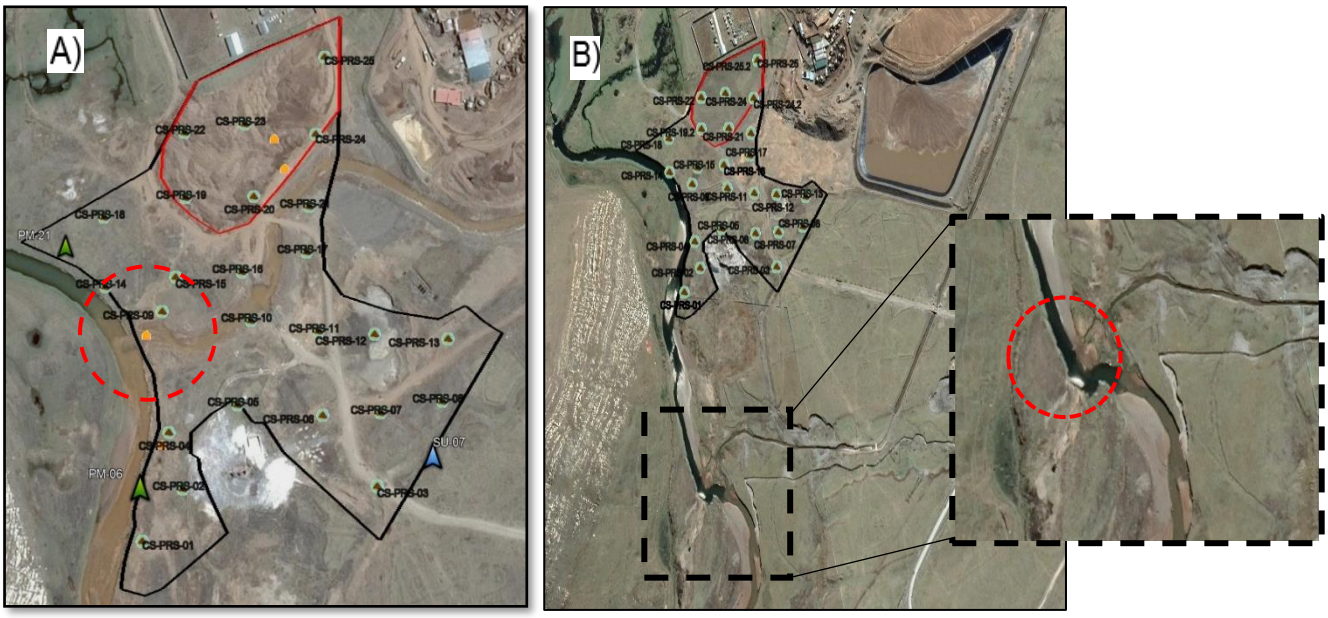


Figura 7.79. Área de potencial interés PRS, A) imagen del 2013 y, B) imagen del 2020
Nota: Sector 1, limitado por el polígono de color negro, y sector 2, limitado por el polígono de color rojo

70 Aprobado mediante Resolución Directoral N.° 238-2020-MEM/DM, fue publicada el 24 de agosto de 2020 «Actualización del Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros»

71 Extraído del Tomo 1 del Plan de cierre integral de pasivos de origen minero río San Juan y delta Upamayo

Considerando que, si los valores detectados en el suelo superaron los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola o los valores de nivel de fondo, se determinan que el suelo está contaminado y se procede a la fase de caracterización, según Minam (2014). El parámetro arsénico, mercurio y plomo serán comparados con los valores de nivel de fondo y los parámetros cadmio y bario serán comparados los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola.

Los puntos que presentaron las mayores concentraciones de metales en el API PRS fueron los puntos ubicados en el excauce del río Ragra y su desembocadura al río San Juan, y los puntos adyacentes a los depósitos de sedimentos del río San Juan; donde tanto los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola como los valores de nivel de fondo fueron superados ampliamente por las mayores concentraciones en los parámetros de arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo que superaron los valores de la norma en mención en 2126 %, 77,3 %, 1515,9 %, 2597 % y 29991,4 % respectivamente, y los valores de nivel de fondo en 609,4 %, 926,2 %, 1621,7 %, 823,7 % y 4043,2 % respectivamente (Figura 7.80).

Además, se realizó la comparación, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola; donde las concentraciones de cobre, plata, selenio y zinc superaron los valores de la guía en mención en 4606,3 %, 1126,5 %, 473,5 % y 1896,2 % respectivamente, y los valores de nivel de fondo en 1836,6 %, 1349,8 %, 479,9 % y 2202,8 % respectivamente (Figura 7.81)

Cabe mencionar que, el OEFA realizó la «Evaluación ambiental de la cuenca San Juan en el 2015», donde se realizó 3 puntos de muestreo de identificación próximos a los sedimentos del río San Juan en el actual API PRS, de esta evaluación ambiental se reportó que las concentraciones de metales superaron los valores de los ECA para suelo 2013, uso agrícola en todos los puntos muestreados para los parámetros de mercurio y plomo; mientras que, arsénico y cadmio superaron los valores de esa misma norma en 2 puntos muestreados (Figura 7.80), estos resultados se usaron como información histórica para la presente evaluación, además los parámetros de interés como el cobre, plata y zinc superaron los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola en al menos 2 puntos muestreados, selenio reportó resultados por debajo del límite de detección.

Las concentraciones de metales registradas en el API PRS presentaron similares valores a los reportados por el OEFA en el 2015 (Figura 7.80), lo que indica que las concentraciones de estos se están acumulando en el suelo y están alterando la calidad del mismo.

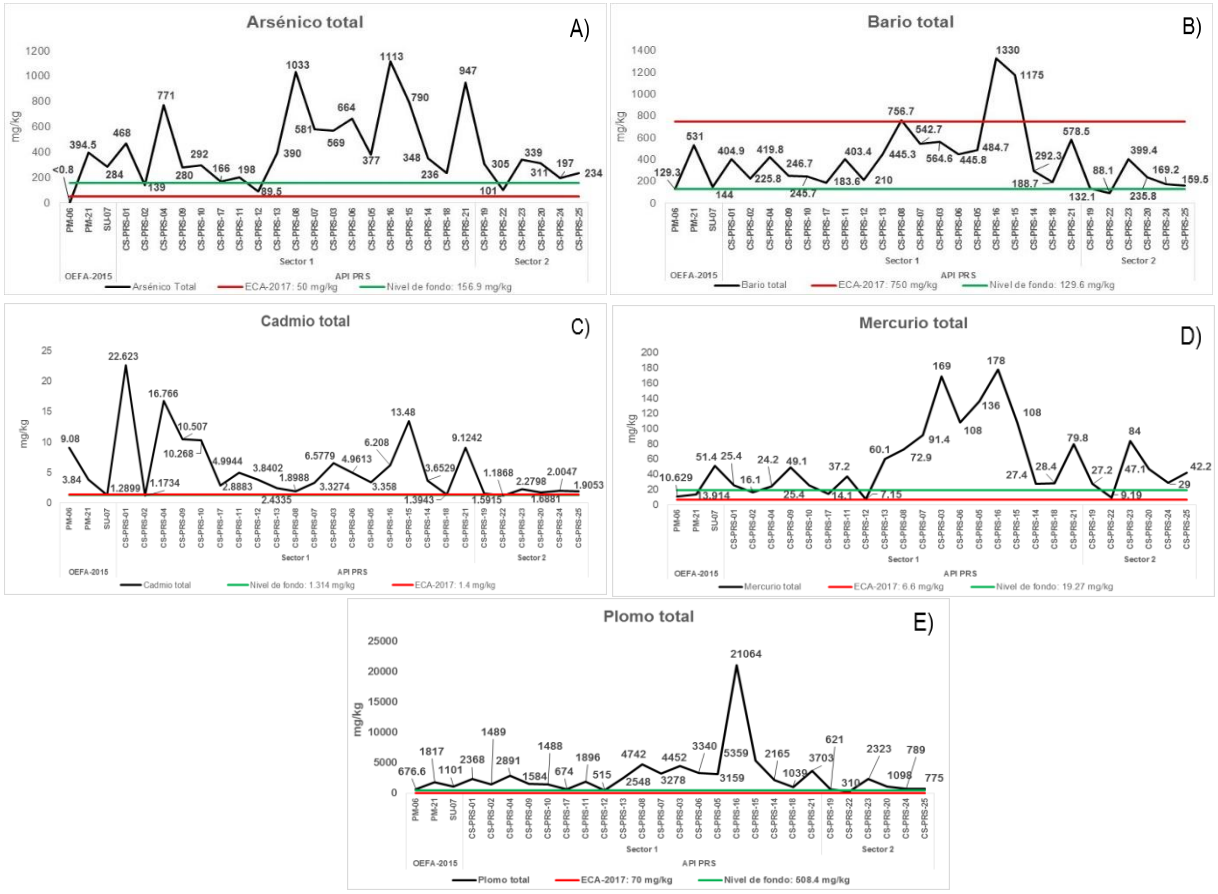


Figura 7.80. Concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio, y E) plomo en el API PRS y de los puntos evaluados por el OEFA en el 2015, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y los valores de nivel de fondo

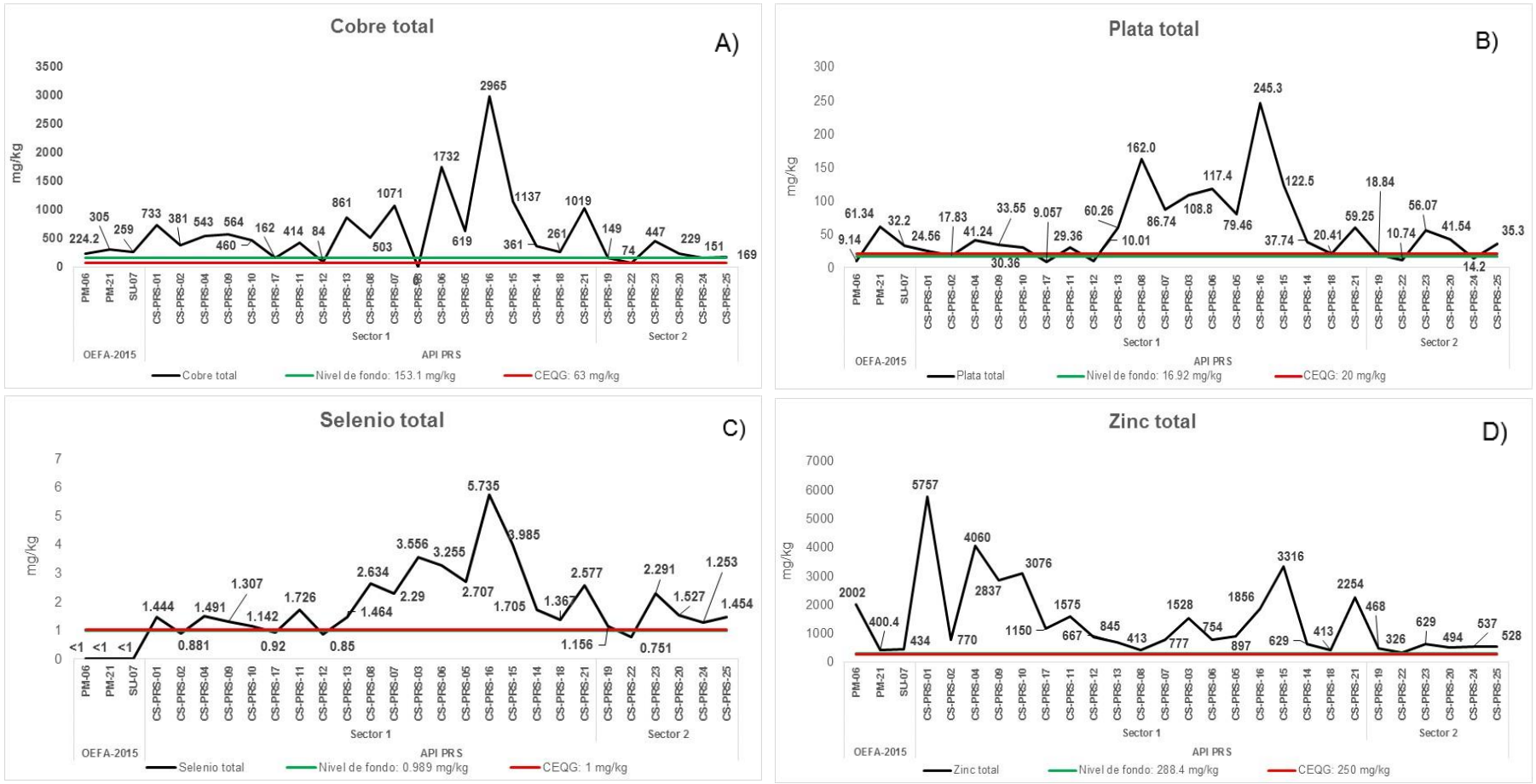


Figura 7.81. Concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc en el API PRS y de los puntos evaluados por el OEFA en el 2015, comparadas con los valores de la guía canadiensie de suelo, uso agrícola y los valores de nivel de fondo

Se realizó el muestreo de suelos a profundidad en calicatas (en API y nivel de fondo), donde existe una clara diferencia entre los horizontes de ambas calicatas, la calicata del API PRS se realizó en el punto de muestreo superficial CS-PRS-04, el primer horizonte Cg1 es un suelo formado por arrastre de material minero con características de óxido reducción y textura media, el segundo horizonte Cg2 presenta las mismas características que el horizonte que lo antecede pero con drenaje pobre, el horizonte Cg3 es un horizonte de color negro de textura fina y gruesa en donde se presentó procesos de descomposición de materia orgánica.

La peligrosidad (movilidad y disponibilidad) de un contaminante se determina por distintos procedimientos químicos y mineralógicos (Galán *et al*., 2008), a través de los resultados de los análisis de microscopia electrónica de barrido se determinó «presencia» de minerales aportantes de hierro en el horizonte Cgr como la pirita, goethita y Ilmenita. Caso distinto sucede en la calicata del nivel de fondo donde se aprecia un primer horizonte A de textura media de color marrón claro, un horizonte de transición AC con textura media y gruesa con mayor presencia de cantos rodados, y el tercer horizonte C con textura gruesa, abundante presencia de cantos y casi impenetrable, todos los horizontes de formación natural (Figura 7.82).

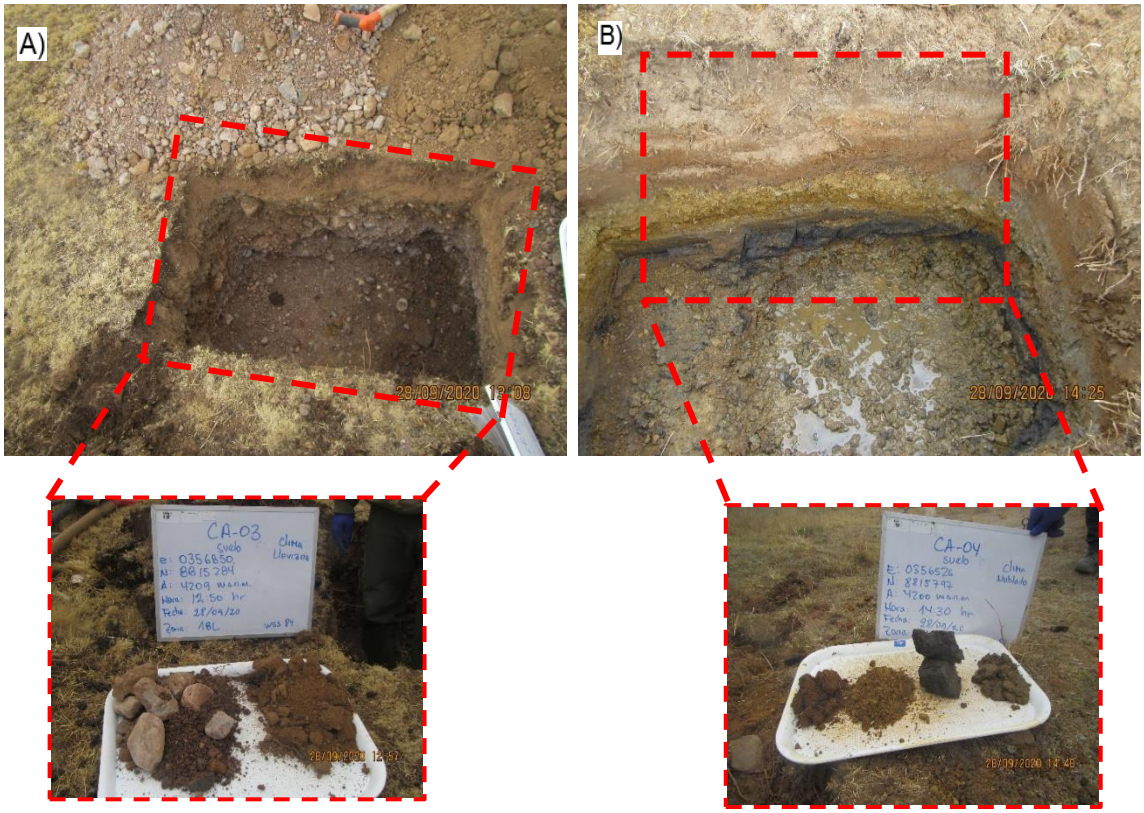


Figura 7.82. Diferencia de horizontes de las calicatas de A) nivel de fondo y B) API PR

La calicata del API PRS, el horizonte Cg1 presentó las mayores concentraciones de metales, que superaron los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola; el arsénico superó en 2754 % el valor de la norma en mención y el valor del nivel de fondo en 809,5 %, cadmio superó en 104,5 % el valor de esa norma y el valor del nivel de fondo en 117,8 %, mercurio superó en 469,7 % el valor de dicha norma y el valor del nivel de fondo en 95,1 %, plomo superó en 6088,6 % el valor de la norma establecida y el valor del nivel de fondo en 752,1 %; y el horizonte AC de la calicata del nivel de fondo presentó concentraciones de

metales que superaron los valores de la norma antes mencionada en los parámetros de arsénico, mercurio y plomo, pero no superaron los valores de nivel de fondo; además, cadmio y bario no superaron los valores de la norma establecida ni los de nivel de fondo (Figura 7.83).

En la calicata del API PRS, el horizonte Cr presentó la tendencia de elevar sus concentraciones de metales al contacto con el agua, puesto que la napa freática se encuentra a 90 cm de profundidad, caso contrario del horizonte C del nivel de fondo que presentó su menor valor de concentración a mayor profundad.

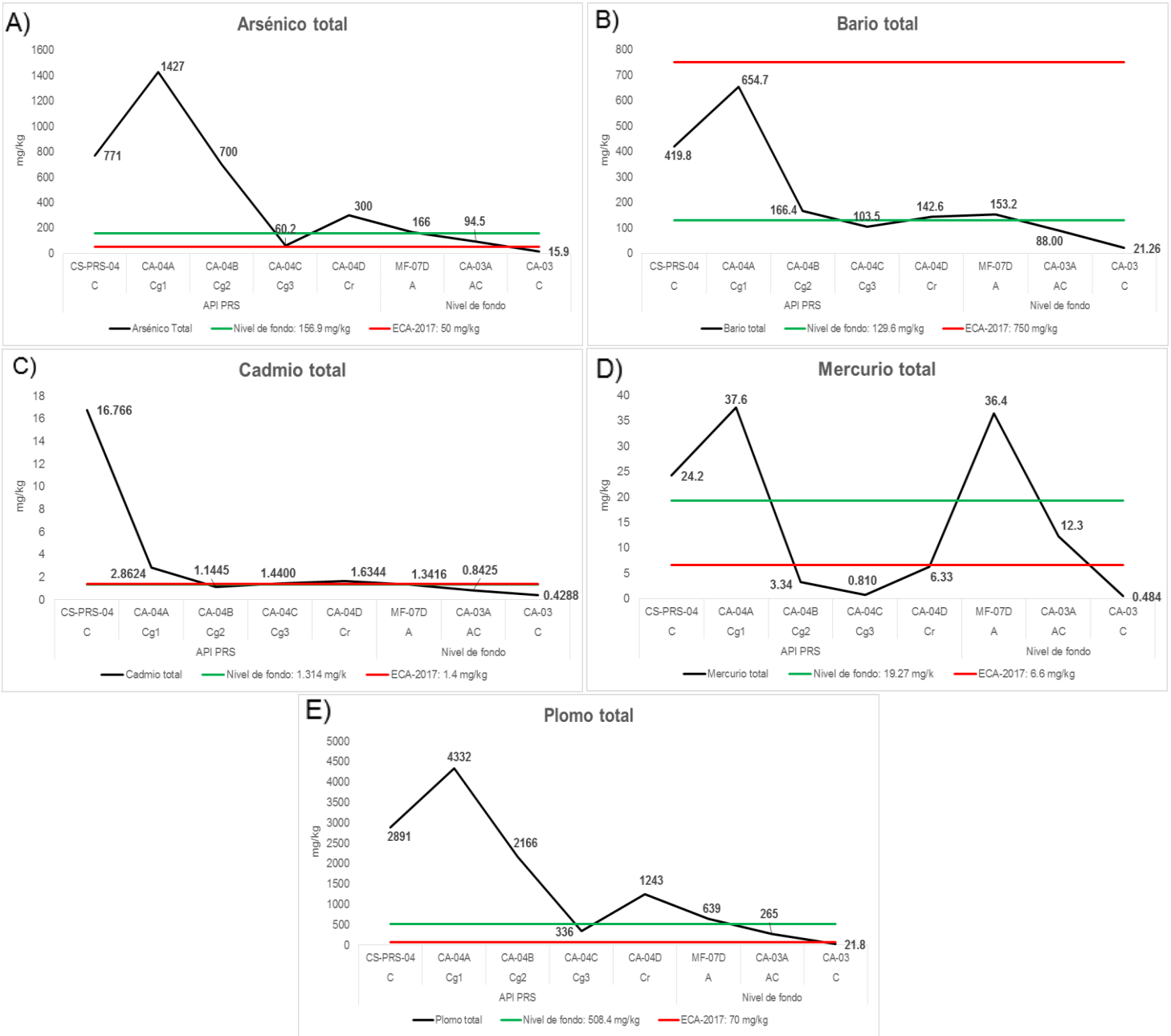
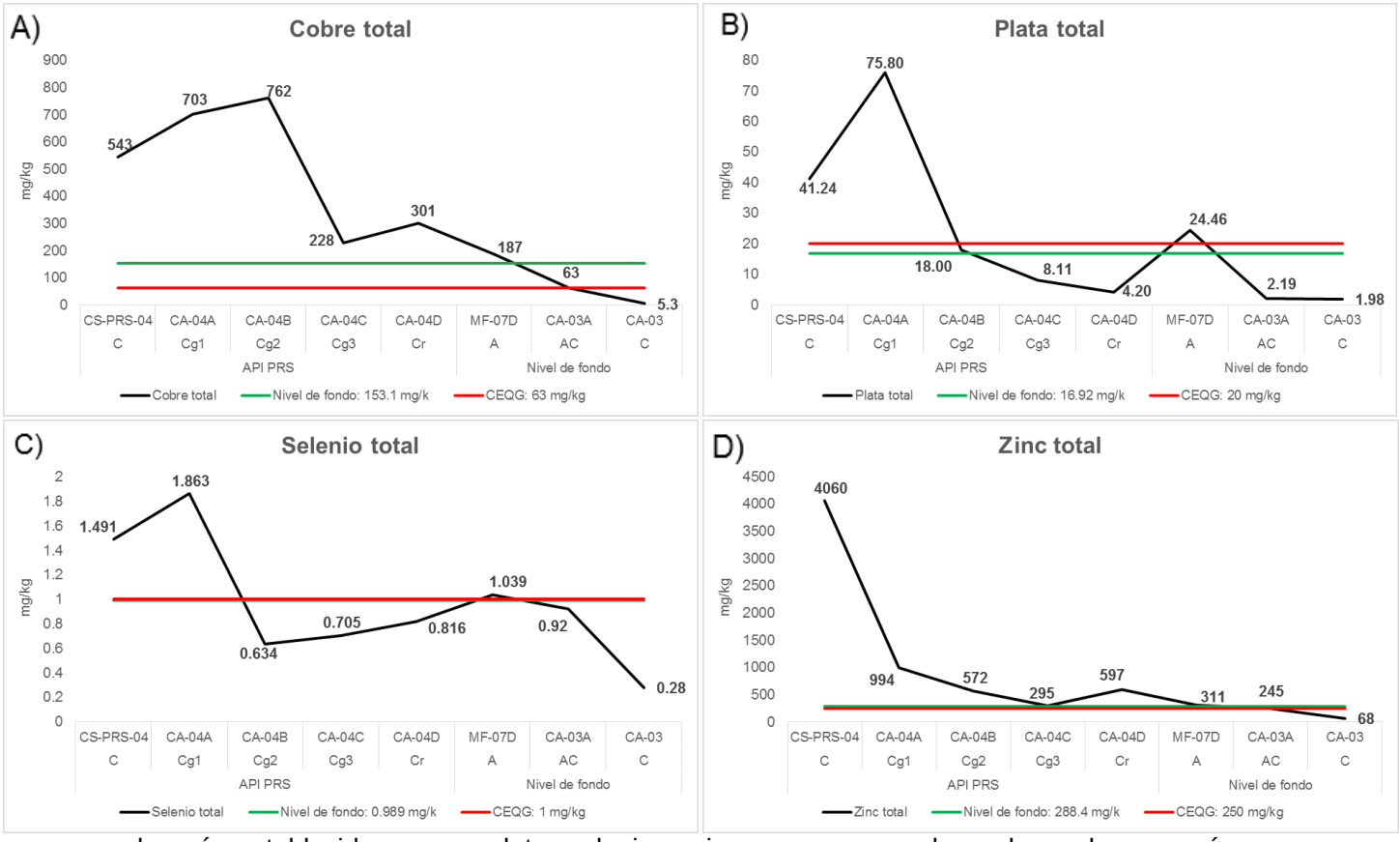


Figura 7.83. Concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo en calicatas del API PRS y del nivel de fondo D, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y los valores de nivel de fondo

Se comparó, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola donde las concentaciones de cobre, plata y selenio superaron los valores de esa guía en 1109,5 %, 279 % y 86,3 % respectivamente y en 359,2 %, 348 % y 88,4 % los valores de nivel de fondo respectivamente para 3 parámetros ubicados en el horizonte Cg2; asimismo, las concentraciones de zinc superaron en 297,6 % el valor de la guía señalada y el valor de nivel de fondo en 244,7 % en el horizonte Cg1. Mientras que, las concentraciones de las muestras de la calicata del nivel de fondo solo para el cobre coinciden con el valor de



la guía establecida, y para plata, selenio y zinc no superaron los valores de esa guía (Figura 7.84).

Figura 7.84. Concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc en calicatas del API PRS y del nidel de fondo D, comparadas con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y los valores de nivel de fondo

Durante la ejecución de la presente evaluación ambiental de causalidad se realizó colecta de sedimento aguas arriba (punto RSjua-07) y aguas abajo (SJ-12) del API PRS, en ambos puntos las concentraciones de metales como arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo y zinc superaron los valores, referenciales, de la guía canadiense de sedimento (Tabla 7.7); el punto SJ-12 presentó incremento de concentraciones de metales (arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo, plata y zinc) a comparación del punto RSjua-07 que se ubica aguas arriba del API PRS (Figura 7.85).

Tabla 7.7. Concentraciones de metales en muestras de los puntos de sedimento sobre el río San Juan

C)

Parámetro	Unidad	SJ-12	RSjua-07	Guía canadiense de sedimento
				Valor PEL
Arsénico Total	mg/kg	274	205	5.9

Parámetro	Unidad	SJ-12	RSjua-07	Guía canadiense de sedimento
				Valor PEL
Bario Total	mg/kg	59,86	72,21	-
Cadmio Total	mg/kg	75,28	44,59	0.6
Cobre Total	mg/kg	886	486	35.7
Hierro Total	mg/kg	56 753	36 180	-
Mercurio Total	mg/kg	9.05	5.01	0.17
Molibdeno Total	mg/kg	0,716	0,408	-
Plata Total	mg/kg	16,33	6,805	-
Plomo Total	mg/kg	799	870	35
Selenio Total	mg/kg	0,899	0,859	-
Zinc Total	mg/kg	3 423	1816	123

(-): No aplica

: Supera el valor PEL de la guía canadiense de sedimento

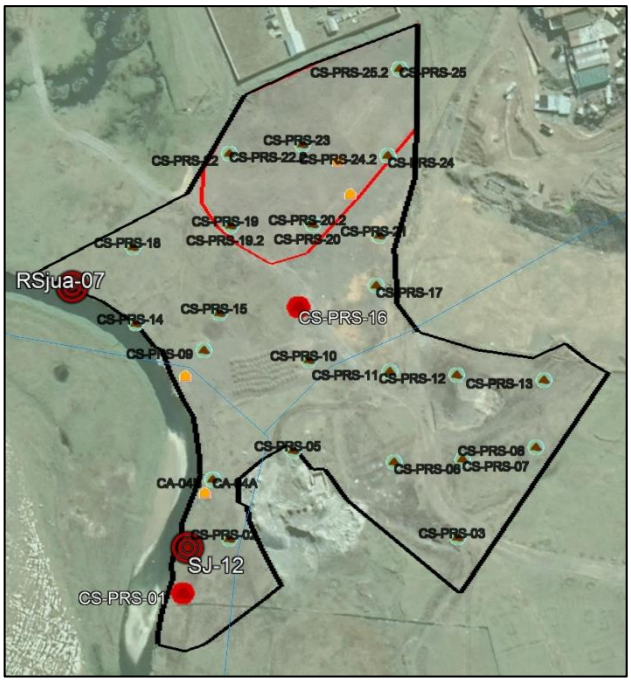


Figura 7.85. Ubicación de los puntos de sedimento, aguas arriba y abajo del API PRS

Asimismo, se empleó el método de análisis geoestadístico para evaluar la distribución espacial e identificar la fuente de los metales en el API PRS mediante métodos de interpolación espacial. Para la presente evaluación se empleó el método ordinario de kriging (OK), debido a que dicho método se emplea comúnmente para la investigación de suelos y en el mapeo de su contaminación (Xie *et al*., 2011), y se usó el software libre QGIS, para mapear la distribución espacial de los metales pesados en la API.

La distribución espacial muestra las concentraciones más elevadas (color intenso) de metales como el arsénico, plomo, bario, mercurio, cobre plata y selenio en el excauce del río Ragra hasta su exdesembocadura al río San Juan; otra área que muestra elevadas concentraciones de metales como el cadmio y zinc, es la colindante al río San Juan, donde esta propuesto la remoción de los sedimentos del río San Juan (Figuras 7.86 y 7.87).

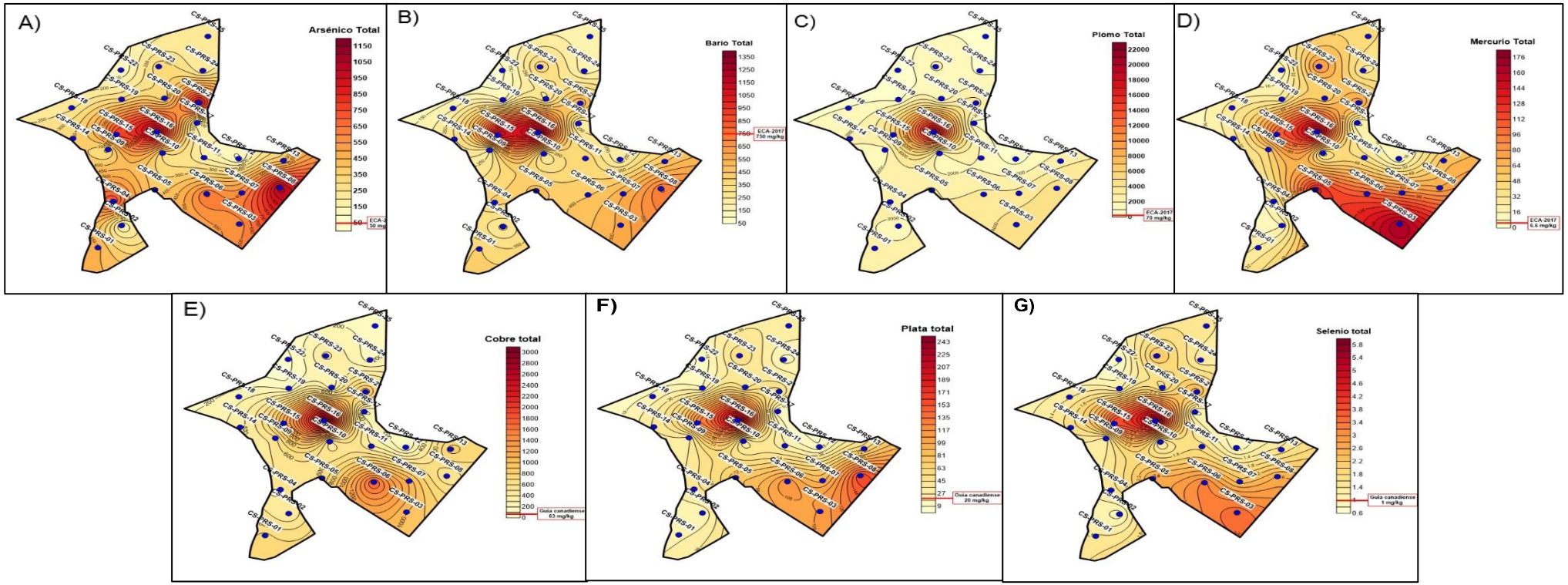


Figura 7.86. Distribución espacial de las concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) plomo, D) mercurio comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola, y las de E) cobre, F) plata y G) selenio comparadas con los valores de la guía canadiense, uso agrícola; registradas en el API PRS

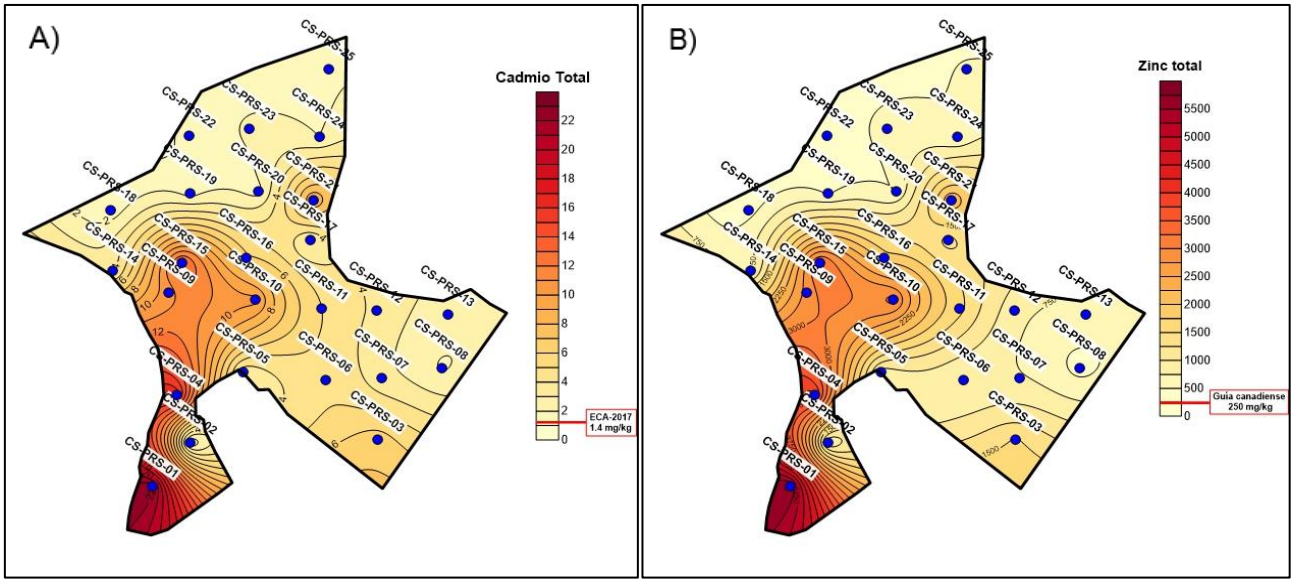


Figura 7.87. Distribución espacial de la concentración de A) cadmio comparada con su valor de los ECA para suelo 2017, uso agrícola, y la de B) zinc comparada con su valor de la guía canadiense, uso agrícola; registradas en el API PRS

El Plan de cierre integral de pasivos de origen minero río San Juan y delta Upamayo indica: «*Los sedimentos serán retirados y transportados en un camión cisterna para su disposición final en la cancha de relaves Ocroyoc*»[*sic*], está actividad se debió desarrollar en este sector, tal como se observa en la Figura 10, hasta el momento dicha actividad no se realizó, lo que sigue ocasionando un riesgo para el agua y suelo aledaños de estos sedimentos, ya que con el aumento del caudal producirá desbordes.

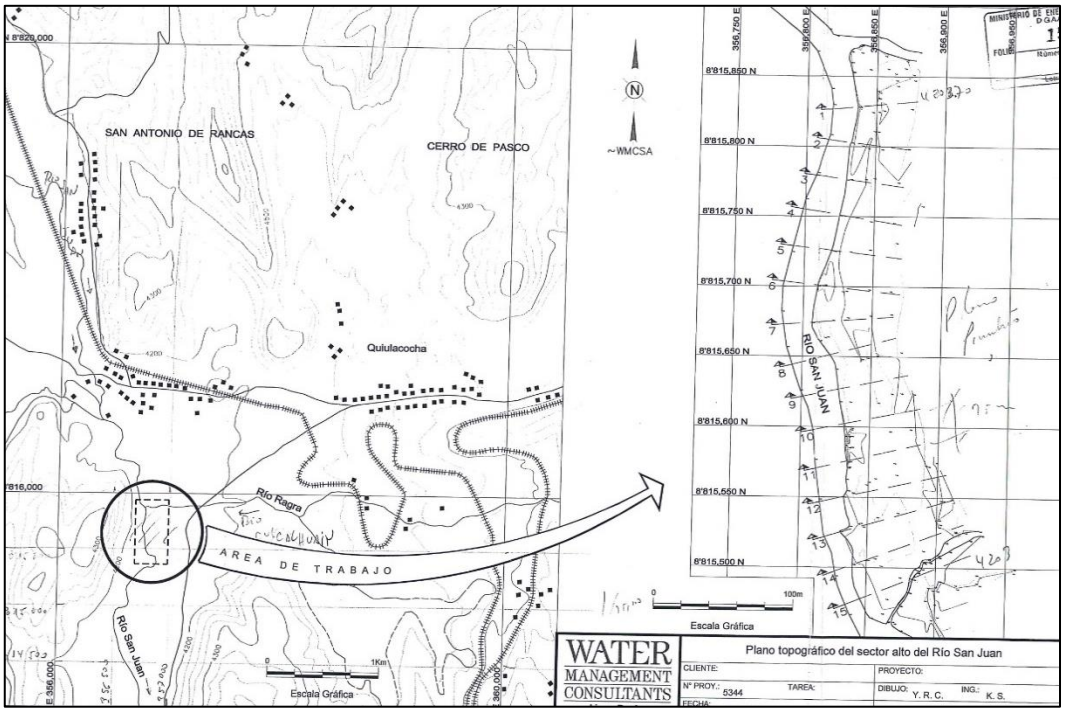


Figura 7.88. Plano topográfico del sector alto del río San Juan, presentado en el plan de cierre integral de pasivos de origen minero río San Juan y delta Upamayo (2014)

Sector 2: En este sector se realizaba el almacenamiento temporal de los relaves coloniales para el posterior proceso de reaprovechamiento por parte de la Compañía Minera Aurífera Aurex S.A., el área aproximada de este sector es de 1,20 ha, este lugar se encuentra cercado y sirve como estancia para pastoreo de los animales pertenecientes a los pobladores de la comunidad de campesina de Yurajhuanca.

En la Figura 7.89, se puede visualizar que el sector evaluado presentó cambios en la morfología y topografía a través del tiempo, donde en la Figura 7.89A), que es una imagen del 2013, se aprecia acumulación de material y movimiento de tierras, y en la Figura 7.89B), que es una imagen del 2020, se aprecia que está cubierto parcialmente por vegetación en recuperación. Mientras que, en la Figura 7.90 se muestra fotografías del sector evaluado, donde se aprecia que el terreno fue removido y está cercado.

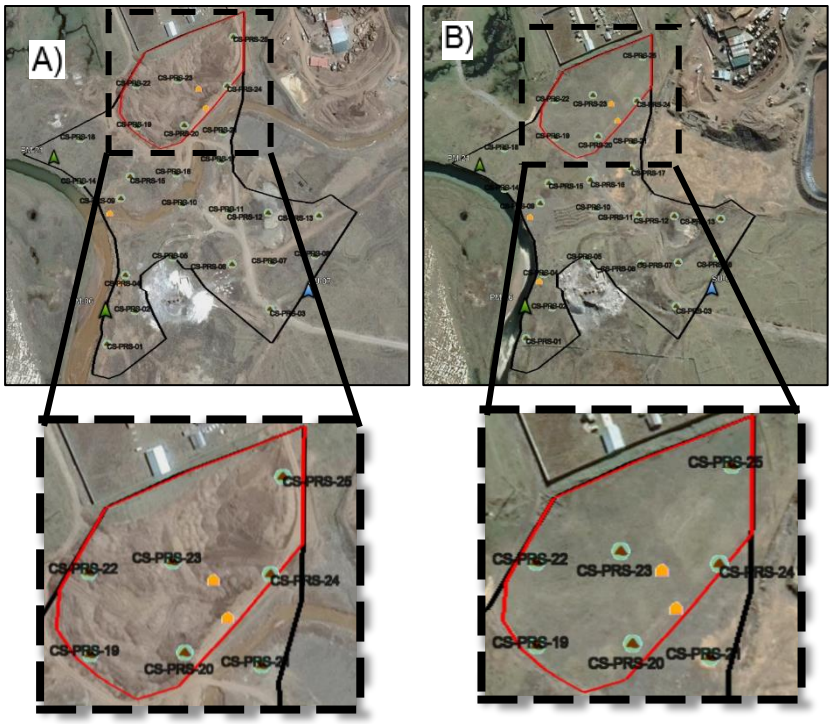


Figura 7.89. Cambio en la topografía del sector 2 del API PRS, donde las imágenes corresponden al A) 2013 y B) 2020
Nota: Sector 2, limitado por el polígono de color rojo
Fuente: Google Earth



Figura 7.90. Sector 2 del API PRS, área con suelo removido y lugar de pastoreo de animales de los pobladores de la comunidad campesina de Yurajhuanca

En el muestreo superficial, las concentraciones de arsénico, mercurio y plomo superaron los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola en todos los puntos; mientras que las de cadmio superaron la mencionada norma en 5 de 6 puntos; en comparación con los valores de nivel de fondo las de arsénico, cadmio, mercurio y plomo superaron en 5 de 6 puntos. Del mismo modo, en el muestreo a profundidad, las concentraciones de arsénico, cadmio, mercurio y plomo superaron los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola en todos los puntos, mientras que las de bario superaron en 2 de 6 puntos la norma en mención; además las de arsénico y plomo superaron los valores del nivel de fondo en todos los puntos y las de mercurio superaron en 5 de 6 los mencionados valores (Figura 7.91).

Las concentraciones de los metales reportados a nivel de profundad (15 cm a 30 cm) superaron en arsénico (96,8 %), en bario (134,4 %), en cadmio (96,7 %), en mercurio (41,7 %) y en plomo (131,5 %) a las concentraciones del nivel superficial (0 cm a 15 cm) respectivamente, considerando el mayor valor de cada parámetro.

Se admite que el suelo se encuentra contaminado a niveles peligrosos y es procedimiento urgente su regeneración, de cuerdo a Galán *et al*. (2008); la contaminación por la concentración de metales es directamente proporcional con la profundidad de suelo, debido a que a mayor profundidad la concentración de metales es mayor, esto se evidenció en todos los puntos muestreados (6 de 6 puntos).

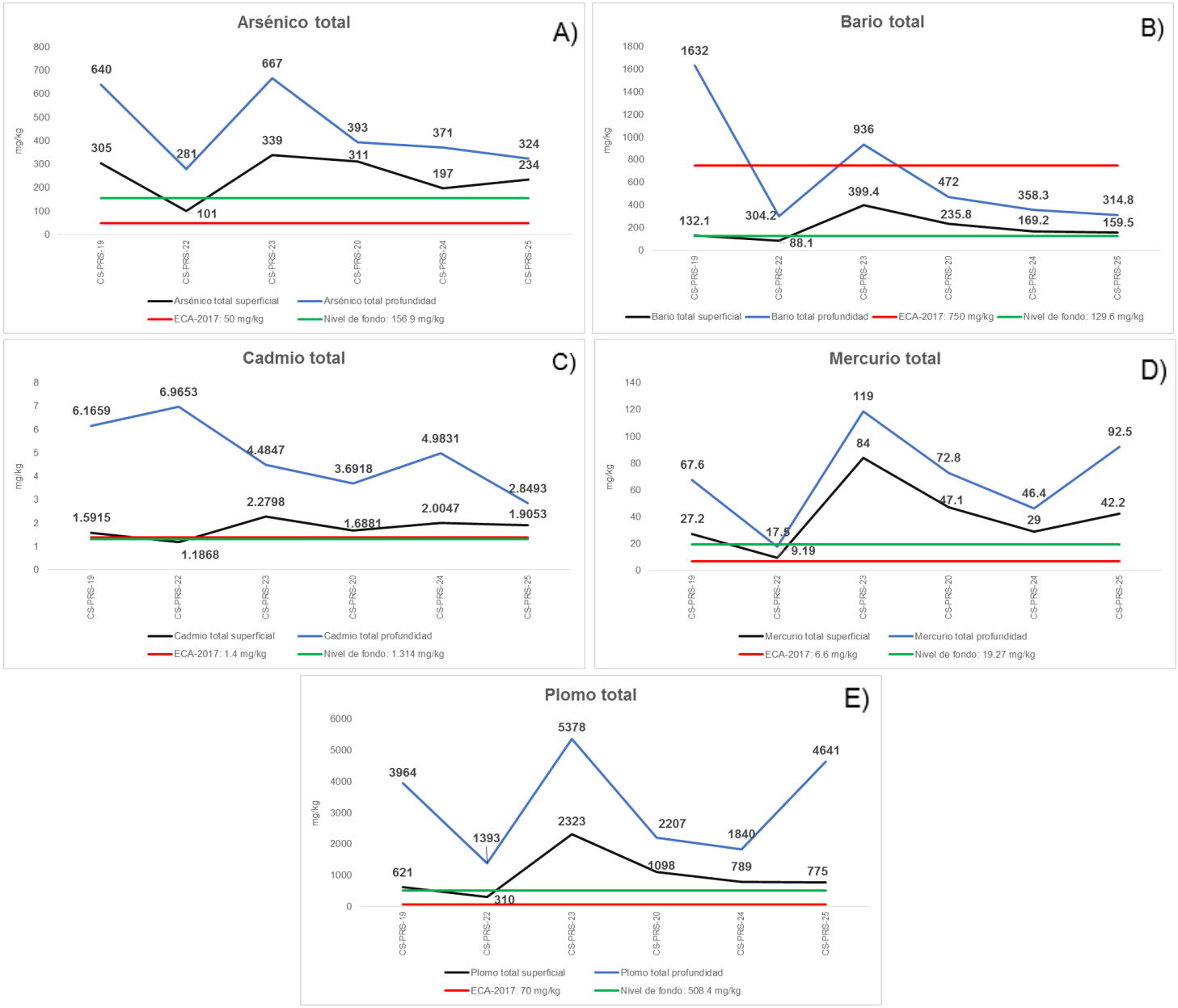


Figura 7.91. Concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) mercurio, y D) plomo a niveles superficial y de profundidad en el sector 2 del API PRS; comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y los valores de nivel de fondo

Así mismo se realizó la comparación, de manera referencial, con la guía canadiense de suelo, uso agrícola para algunos metales de interés como el cobre, plata, selenio y zinc; donde sus concentraciones presentan el mismo comportamiento. Esto es, que los valores más profundos presentan las mayores concentraciones de metales a comparación de las concentraciones superficiales (Figura 14).

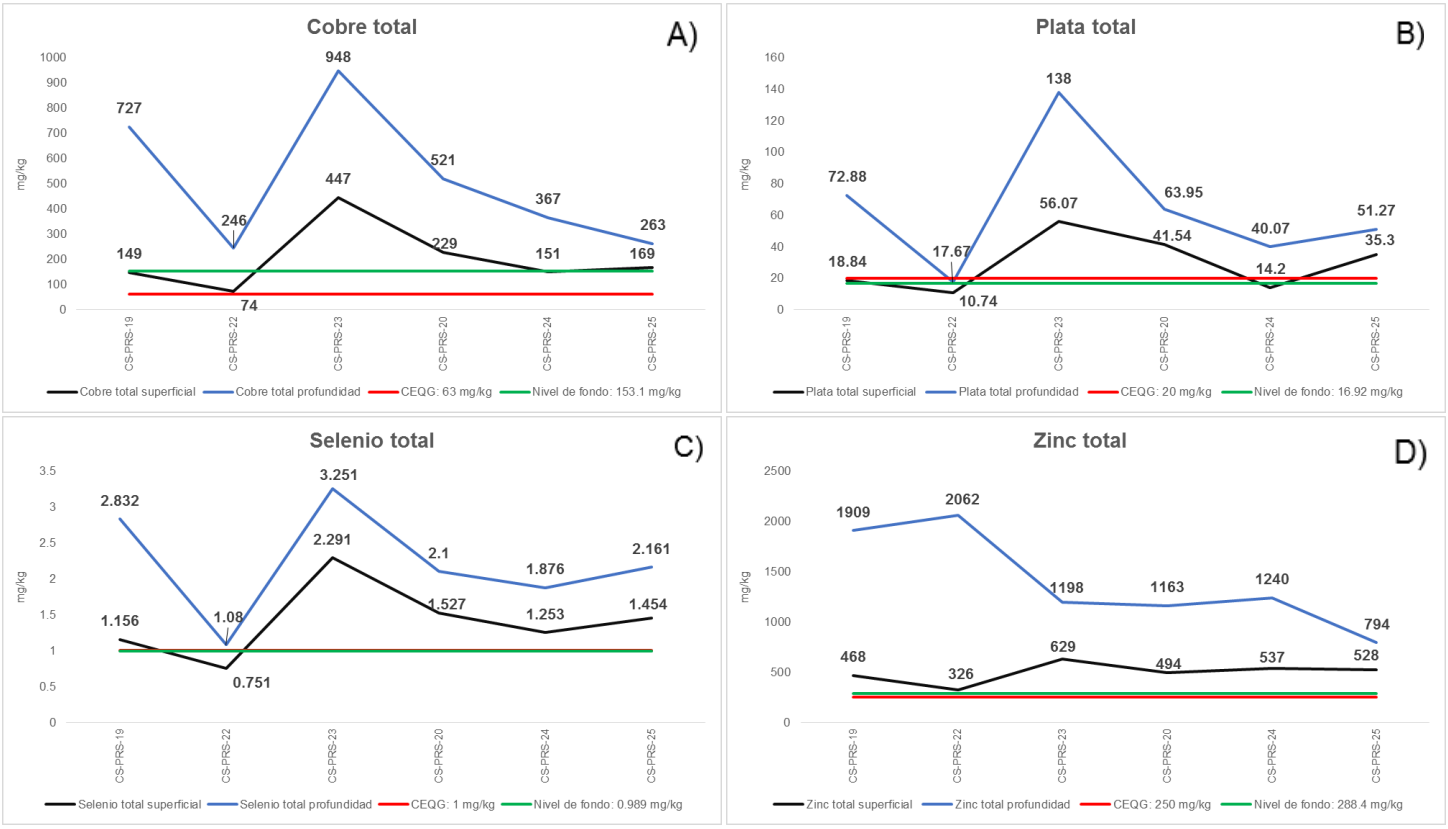


Figura 7.92. Concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc a niveles superficial y de profundidad en el sector del API PRS; comparadas con los valores de la guía canadiense, uso agrícola y los valores de nivel de fondo

Tejido vegetal

Según García y Dorronsoro (2005) una de las vías comunes de los metales incorporados al suelo puede ser, la absorción de estos por las plantas y así, incorporarse a las cadenas tróficas. El sector 2 del API PRS presenta áreas revegetadas con la *especie Dactylis glomerata*, la cual es utilizada para la alimentación de ganado vacuno, por ello, en esta API se analizó el tejido vegetal de esta especie. *D. glomerata*, es una gramínea amacollada nativa de Europa, considerada como forrajera por su rápido crecimiento, aunque su digestibilidad disminuye en el periodo de floración. Además, estudios como el de López (2019) en el que evaluó el comportamiento agronómico y la composición nutricional de diez variedades de pastos mejorados, demuestran que *Dactylis glomerata* presenta el mayor porcentaje de fibra cruda y el mejor porcentaje de materia seca.

Las muestras fueron colectadas en 3 sectores diferentes, los puntos TV-01 y TV0-2, corresponden a un área cercada junto al API, utilizada para el pastoreo del ganado vacuno; los puntos TV-03 y TV-04, corresponden al API PRS propiamente dicho, y los puntos TV-05C y TV-06C, corresponden al sitio control. Los resultados obtenidos en las muestras de tejido vegetal en el sector 2 de dicho API, muestran valores de concentración de metales similares entre la raíz y la parte aérea (Figura 7.93); presentando los valores más altos en el punto TV–03 para cadmio, mercurio, cobre, selenio y zinc, y el punto TV-04 para arsénico, plomo, plata y bario. Las concentraciones en la parte aérea de esta especie para los puntos del API PRS (TV-03 y TV0-4) superaron en promedio para arsénico en un 693 % a las concentraciones registradas en las muestras obtenidas en el sitio control, 748 % en bario, 387 % en cadmio, 1 500 % en cobre, 2247 % en mercurio, 795 % en plata, 1654 % en plomo, 457 % en selenio y 458 % en zinc. Siendo mercurio, plomo y cobre los que presentan mayor

diferencia con respecto a los valores en el punto control. Los valores obtenidos los puntos TV-01 y TV0-2, muestran mayor diferencia con respecto al punto control solo en arsénico.

Las concentraciones obtenidas en la parte aérea de todas las muestras colectadas en *Dactylis glomerata* superaron, de manera referencial, el contenido máximo de los metales de arsénico, cadmio, mercurio y plomo establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal), de la norma española; sin embargo, los valores son mucho menores en el punto control con respecto a los del API PRS; además, plomo y mercurio fueron los más resaltantes por su concentración, siendo para plomo de 2482mg/kg (valor promedio hallado entre los 2 puntos evaluados) versus 30 mg/kg (valor en el Real Decreto 465/2003); y para mercurio de 82 mg/kg versus 0,1 mg/kg.

A nivel mundial existen registros de muchos animales muertos producto de un envenenamiento con Pb, ya sea por la inhalación del polvo tóxico en la hierba o bien por el consumo de plantas con un alto contenido de metales pesados (Williamson *et al*., 1982); además, otros metales como Hg, Cd, As y Se, también son muy dañinos para la salud humana y para la mayoría de los microorganismos vivos (Llugany *et al*., 2007). Por lo cual, esta especie en el sector 2 del API PRS sería un potencial peligro, si es consumida por la fauna local.

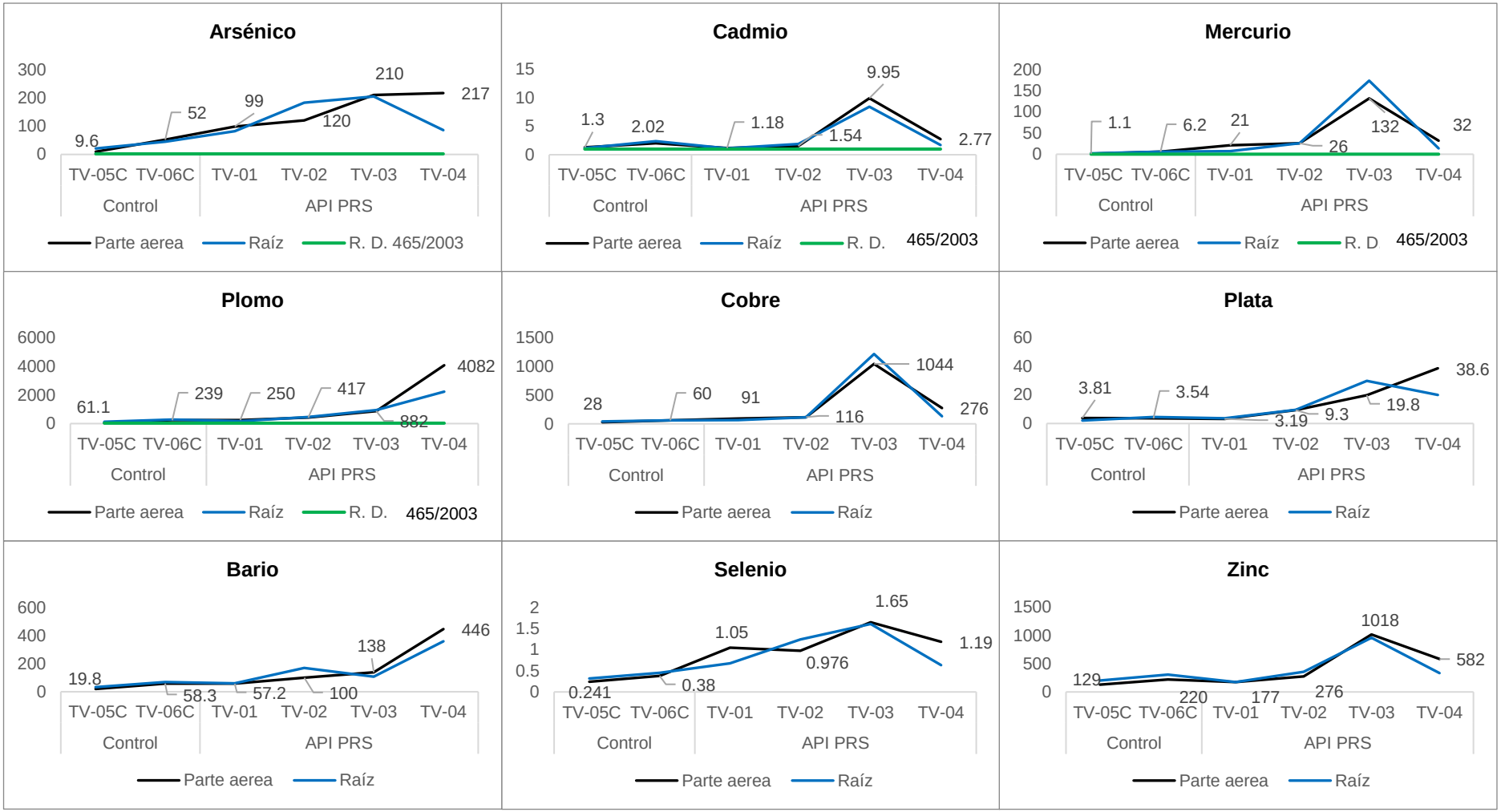


Figura 7.93. Concentración de metales obtenidos en *Dactylis glomerata*

Nota: Los valores de las etiquetas de datos en la presente gráfica muestran los valores solo de la parte aérea.

e. API DR

El API DR pertenece a una terraza inundable de pendiente corta aproximadamente menor a 1 %, adyacente al río San Juan, este API es una zona con presencia de rastros de material fino con características similares al sedimento fluvioaluvial mezclado con residuos mineros encontrados en las orillas del río Ragra, y así mismo como los suelos del Upamayo C reportados en el «Estudio de ingeniería de detalle para ejecutar las obras de plan de cierre integral de los pasivos-Depósitos de sedimentos en el río San Juan y delta Upamayo, Pasco»[72]. En la Figura 7.94 se muestra la ubicación del API DR en referencia al nivel de fondo C.

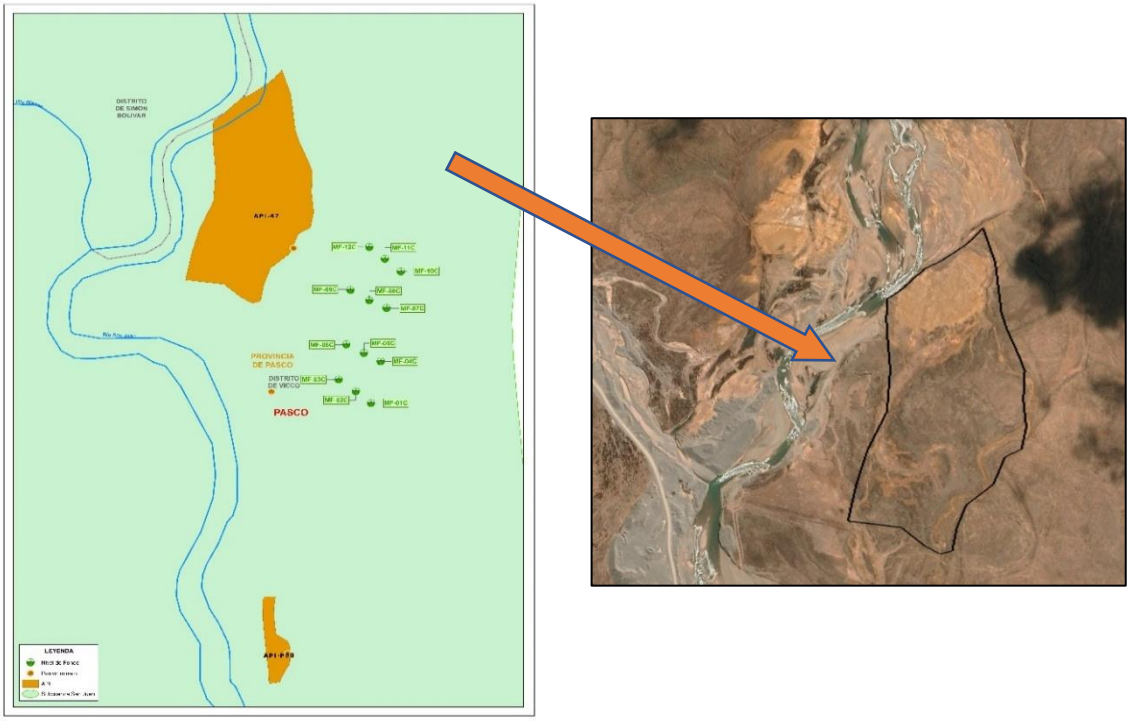


Figura 7.94. Ubicación del API DR tanto en referencia al nivel de fondo C como con respecto al río San Juan

Los sedimentos con altas cargas de metales fueron arrastrados por el río San Juan y depositados en el API DR en eventos extraordinarios del desborde del cauce de dicho. Los puntos de muestreo del API DR presentan características diferentes de acuerdo a la ubicación de estos; los puntos colindantes al río San Juan no presentan cobertura vegetal y tampoco rastros orgánicos con abundante sedimento fluvioaluvial; los puntos muestreados en los canales que formaron los desbordes extraordinarios del río San Juan presentan suelos de color amarillento-anaranjado, sin presencia de cobertura vegetal, y los puntos muestreados en la parte central del API son suelos con cobertura vegetal principalmente de especies como *Festuca rigecens* y *Calamagrostis vicunarum*.

En cuanto a la degradación de los suelos, Jiménez *et al*. (2017) supone una destrucción de las condiciones ambientales originales, dando paso a la degradación del suelo, esta degradación se hace evidente debido a la perdida de materia orgánica (degradación

[72] Información extraída del plano N.° CSL-137800-1-TO-03, que corresponde al del «Estudio de ingeniería de detalle para ejecutar las obras de plan de cierre integral de los pasivos-Depósitos de sedimentos en el río San Juan y delta Upamayo, Pasco»

biológica), alteración de textura y estructura (degradación física) y finalmente con la acumulación de metales y pérdida de parámetros edáficos (degradación química).

Además de conocer los resultados de cobertura, calculados mediante los índices de vegetación entre cada año, se generó mapas de cambios comparando cada 3 años con el objetivo de conocer los cambios más significativos mediante las tonalidades bien marcadas, como resultado de los cambios generados por algunas actividades externas que se ven reflejados en la cobertura vegetal.

El uso de imágenes satelitales y multitemporales[73] de 1988, 1990, 1994, 1997, 1999, 2005, 2007, 2011, 2013, 2015 y 2019 de los cuales se obtuvieron los índices NDVI y NDRE (Figura 7.95), sirvió para determinar el área de potencial interés. Cabe precisar que, la degradación del suelo se mide a través del cambió de productividad y este se estimada a través de los índices de vegetación normalizada y los índices de borde rojo de diferencia normalizada.

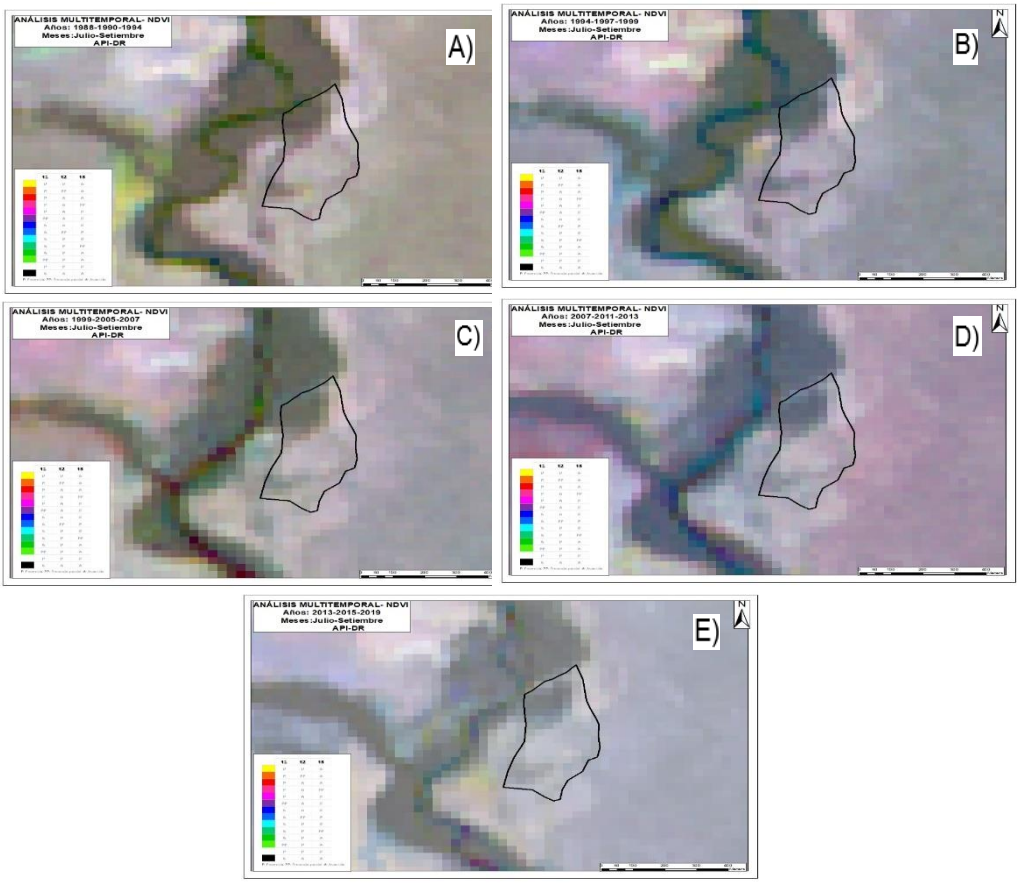


Figura 7.95. Análisis multitemporal de NDVI de la subcuenca San Juan de A) 1988, 1990 y 1994; de B) 1994, 1997 y 1999; de C) 1999, 2005 y 2007; de D) 2007, 2011 y 2013; y de E) 2013, 2015 y 2019

En el informe técnico CSL-137800-0-CT-IT-03 denominado «Estudios de suelo» elaborado por CESEL S.A., empresa encargada para la elaboración del «Estudio de ingeniería de detalle para ejecutar las obras de plan de cierre integral de los pasivos-Depósitos de

73 Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS-Glovis): Landsat Landsat 5 (1988, 1990, 1994, 1997, 1999, 2005, 2007, 2011), Landsat 8 (2013, 2015 y 2019).

sedimentos en el río San Juan y delta Upamayo, Pasco» por encargo de las empresas comprometidas en la remediación [Activos Mineros S.A.C. (antes Centromin Perú S.A.), Sociedad Minera El Brocal S.A.A., Empresa Administradora Cerro S.A.C. (antes Volcan Compañía Minera S.A.A.) y Compañía Minera Aurífera Aurex S.A.]; en la página 15, realiza la descripción de los suelos denominados Upamayo C (Figura 7.96), en donde se menciona: «…*estos suelos se han originado por depósitos fluviales arrastrados por material minero*…». Estos suelos del Upamayo C son visualmente similares a los suelos del DR (suelos colindantes al río y suelos de los canales), además son depósitos aluviales provenientes de las actividades mineras desarrolladas en la parte media y alta de la subcuenca del río San Juan.

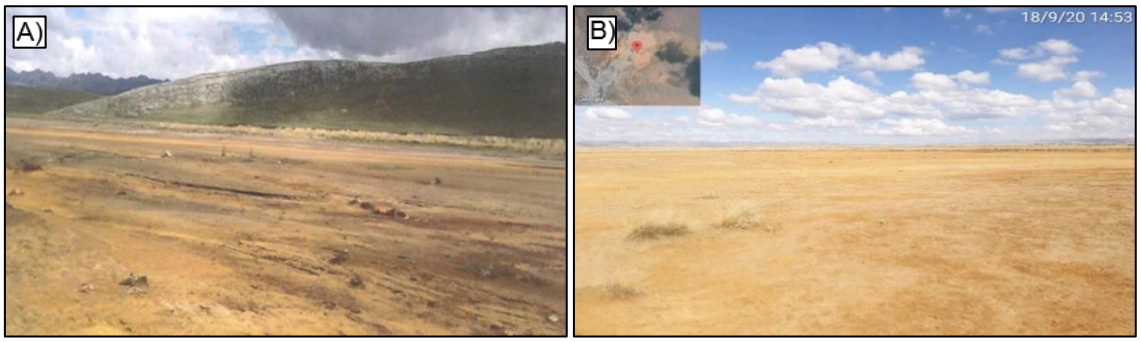


Figura 7.96. A) Suelos Upamayo C, y B) API DR, con similitudes visuales

Gran parte de los suelos que se localizan en la subcuenca del río San Juan se hallan aparentemente cubiertos por el material sedimentable del río, debido a los desbordes que sufre este en época de avenida (SRK, 2000 citado en WMC, 2014).

Los ECA para suelo 2017, uso agrícola fueron superados ampliamente por las mayores concentraciones de metales de interés; donde el arsénico, cadmio, mercurio superaron en 3752 %, 2590,3 % y 4263,5 % los valores de la norma en mención respectivamente, y en 2520,1 %, 3400,4 % y 65354,6 % los valores del nivel de fondo en el punto CS-DR-08; el bario superó en 370 % al valor de la norma señalada y en 2290,2 % al valor del nivel de fondo en el punto CS-DR-24; el plomo superó en 16564,3 % al valor de la norma establecida y en 9483,7 % al valor de nivel de fondo en el punto CS-DR17 (Figura 7.97).

De la misma forma se comparó, de manera referencial, con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola donde las concentraciones de metales de interés como el cobre, plata, selenio y zinc; donde las de cobre superaron en 6941,3 % su valor de la guía en mención y en 6889,1 % al valor del nivel de fondo en el punto CS-DR-30; las de plata y selenio superaron en 1285 % y 355 % los valores de la guía señalada, y en 58836,2 % y 369,6 % a los valores del nivel de fondo en el punto CS-DR-08 respectivamente; las concentraciones de zinc superaron en 4796 % el valor de la guía establecida y en 686 % al valor del nivel de fondo en el punto CS-DR-28 (Figura 7.98).

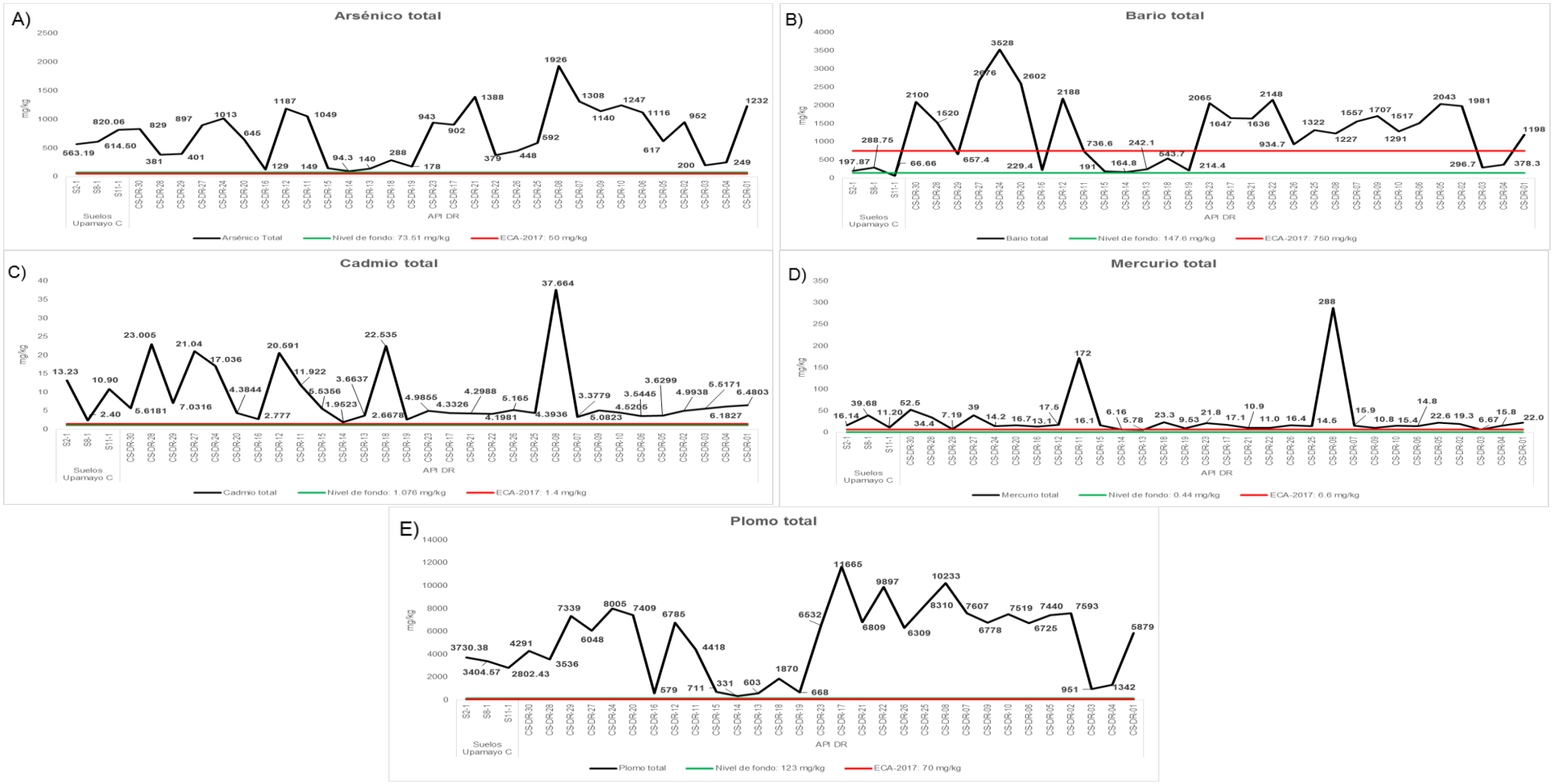
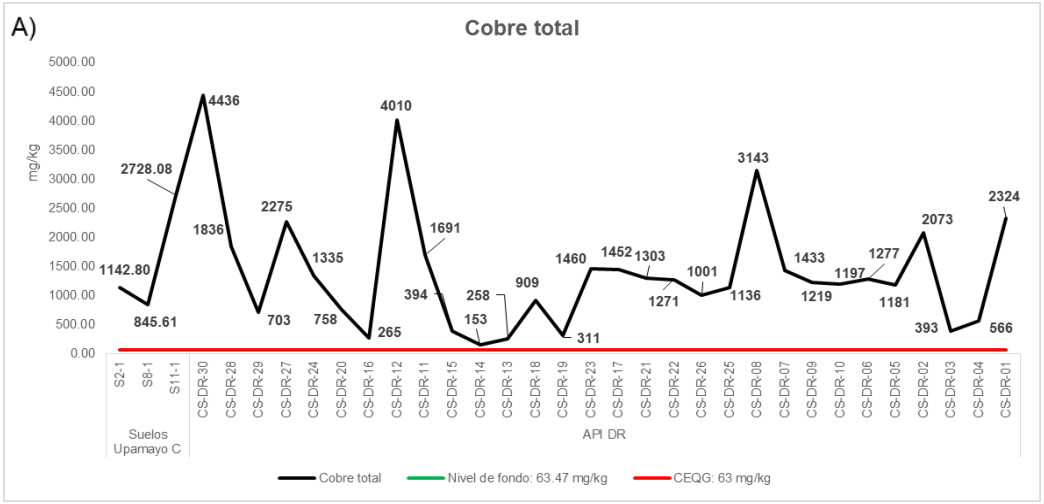
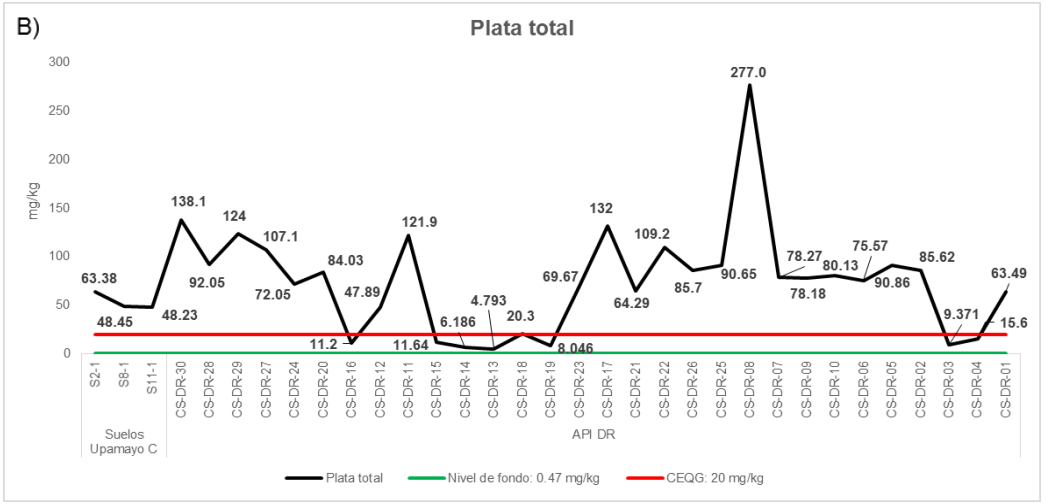
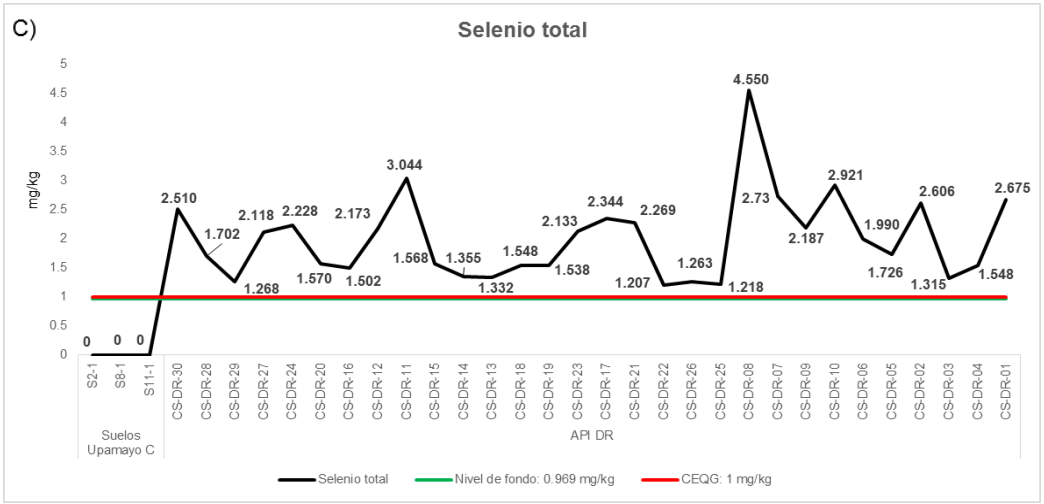


Figura 7.97. Concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo en los suelos del Upamayo C y el API DR, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y los valores de nivel de fondo







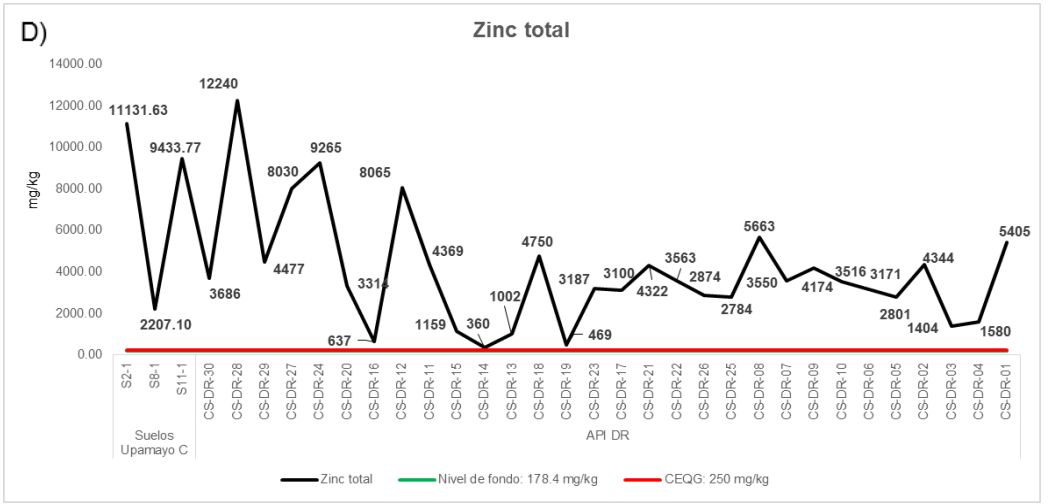


Figura 7.98. Concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio, y D) zinc en los suelos del Upamayo C y el API DR comparadas con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y los valores de nivel de fondo

Las mayores concentraciones de metales de interés se ubicaron en los puntos donde se formaron los canales en los eventos extraordinarios de desborde del cauce del río San Juan, donde superaron ampliamente los ECA para suelo 2017, uso agrícola, siendo uno de esos puntos, CS-DR-08 donde arsénico, cadmio, mercurio, plata y selenio presentaron su máximo valor en el API; de igual manera, el punto CS-DR-17 presentó la más alta concentración de plomo y el punto CS-DR-24 presentó la mayor concentración de bario. Los puntos colindantes al río San Juan presentaron concentraciones elevadas en cobre y zinc, donde el primero presentó la mayor concentración en el punto CS-DR-30 y el segundo presentó su mayor concentración en el punto CS-DR-28. Los puntos que se ubicaron en el sector intermedio del API donde se vió afectado con mucha intensidad los sedimentos del río San Juan, presentaron valores que superaron la norma en mención (Figuras 7.99 y 7.100).

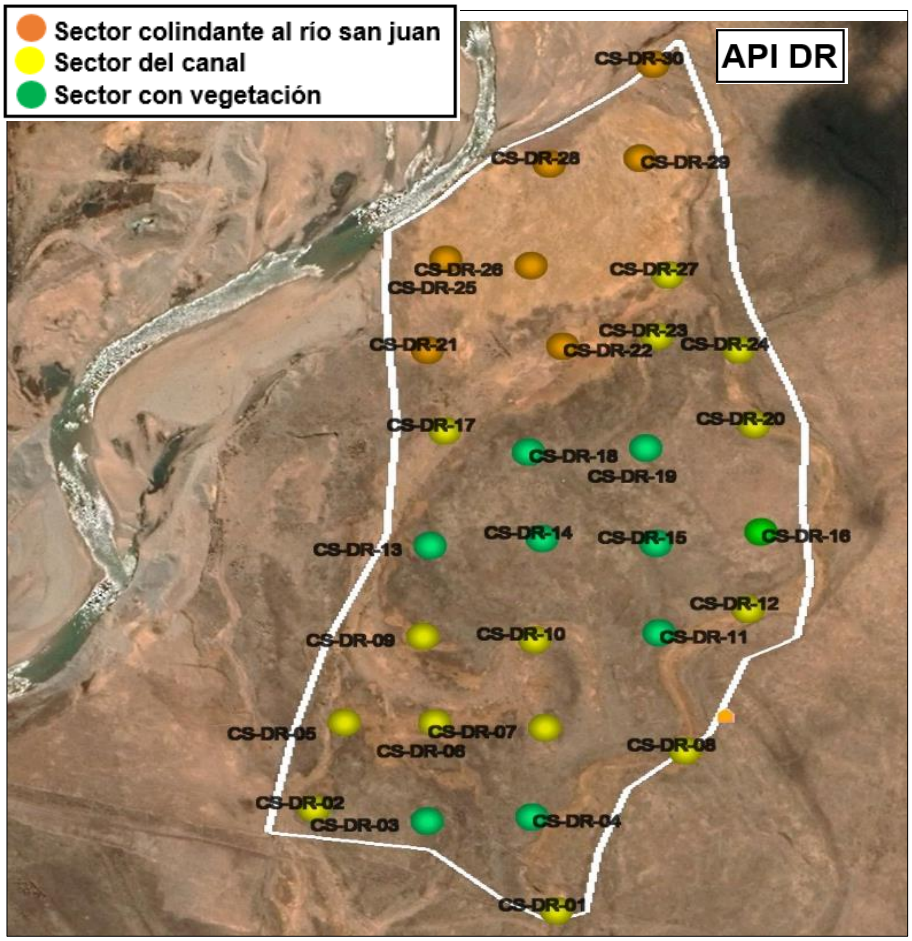


Figura 7.99. Distribución de puntos de muestreo en el API DR

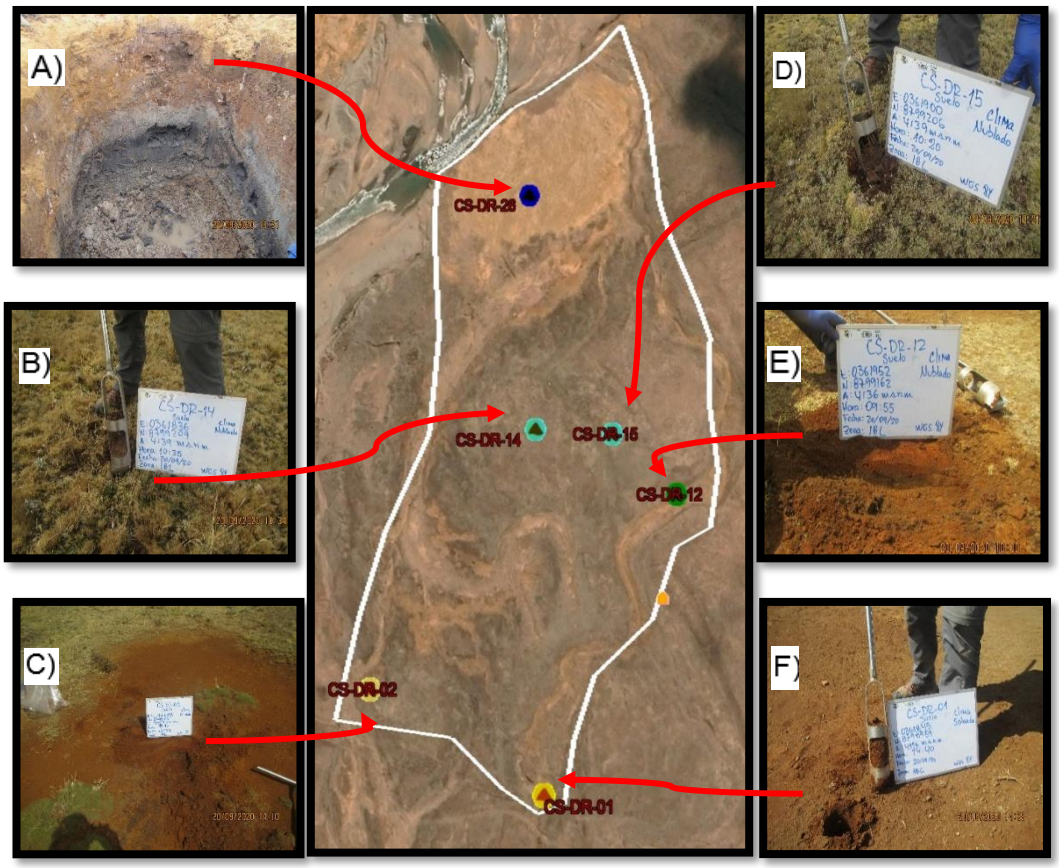


Figura 7.100. Distribución de puntos por sectores: A) próximo al río San Juan donde se realizó la calicata CA-03, B) punto CS-DR-14 con cobertura vegetal donde no se superó el valor del ECA para suelo, uso agrícola para mercurio, C) canal formado por los desbordes del río San Juan, D) zona con cobertura vegetal y suelo de color oscuro, E) suelo formado por canales producto del desborde del río San Juan, y F) punto extremo del API DR

En la Figura 7.101 se muestra la diferencia entre horizontes del suelo a través de la ejecución de calicatas, donde la Figura 7.101A) pertenece al perfil del suelo de la calicata en el API DR en el punto de muestreo de identificación CS-DR-26, y Figura 7.101B) pertenece al perfil del suelo de la calicata en el nivel de fondo en el punto de muestreo MF-07C. En la calicata del API en la capa superficial (horizonte C) de 0,15 cm de profundidad se puede apreciar la presencia de un material de partículas de tamaño medio de color anaranjado, además presenta horizontes Cg1 y Cg2 que indican que el hierro fue reducido y removido durante la formación del suelo o que la saturación con agua estancada lo ha preservado con un estado reducido (Shoeneberger *et al*., 2012), esto es reflejado con la presencia de coloraciones amarillos y con tonalidad rojiza, debido a las inundaciones producidas por el desborde del cauce del río San Juan; a los 90 cm de profundidad se encuentra la napa freática, mientras que en la calicata de nivel de fondo presenta únicamente 2 horizontes, conformado por el horizonte A en la capa superficial y un horizonte C a mayor profundidad. En la capa superficial de la calicata del nivel de fondo está ausente la capa de 15 cm de material fluvio-aluvial.

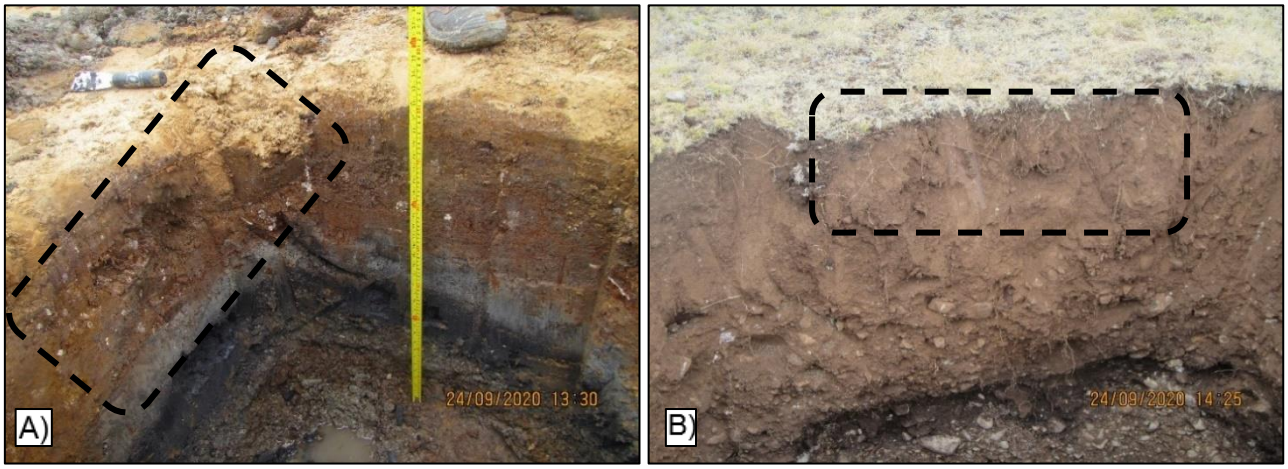


Figura 7.101. Diferencia de horizontes de suelos en: A) calicata API DR con presencia de material de color anaranjado con elevadas concentraciones de metales en referencia a los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola, y B) calicata nivel de fondo sin presencia del material anaranjado y con concentraciones bajas en referencia a los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola

A consecuencia de cambios del entorno físico, los metales lixivian a los horizontes más profundos y así se produce una contaminación a mayor profundad; para el caso de la calicata del API DR en el horizonte Cg1, las concentraciones de arsénico, cadmio, mercurio y plomo superaron ampliamente los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola en 1168 %, 4662,2 %, 1475,8 % y 3861,4 %, y los valores de nivel de fondo en 762,5 %, 4662,2 %, 23536,4 % y 2154,5 % respectivamente. En cuanto la calicata del API DR en el horizonte (Cg2), las concentraciones de metales registradas fueron menores en comparación con las del horizonte Cg1. En caso contrario, en el horizonte C de la calicata del nivel de fondo, las concentraciones de los metales señalados no superaron los valores de la norma establecida, a excepción, las de cadmio que superaron al valor del nivel de fondo en 6,9 % (Figura 7.102).

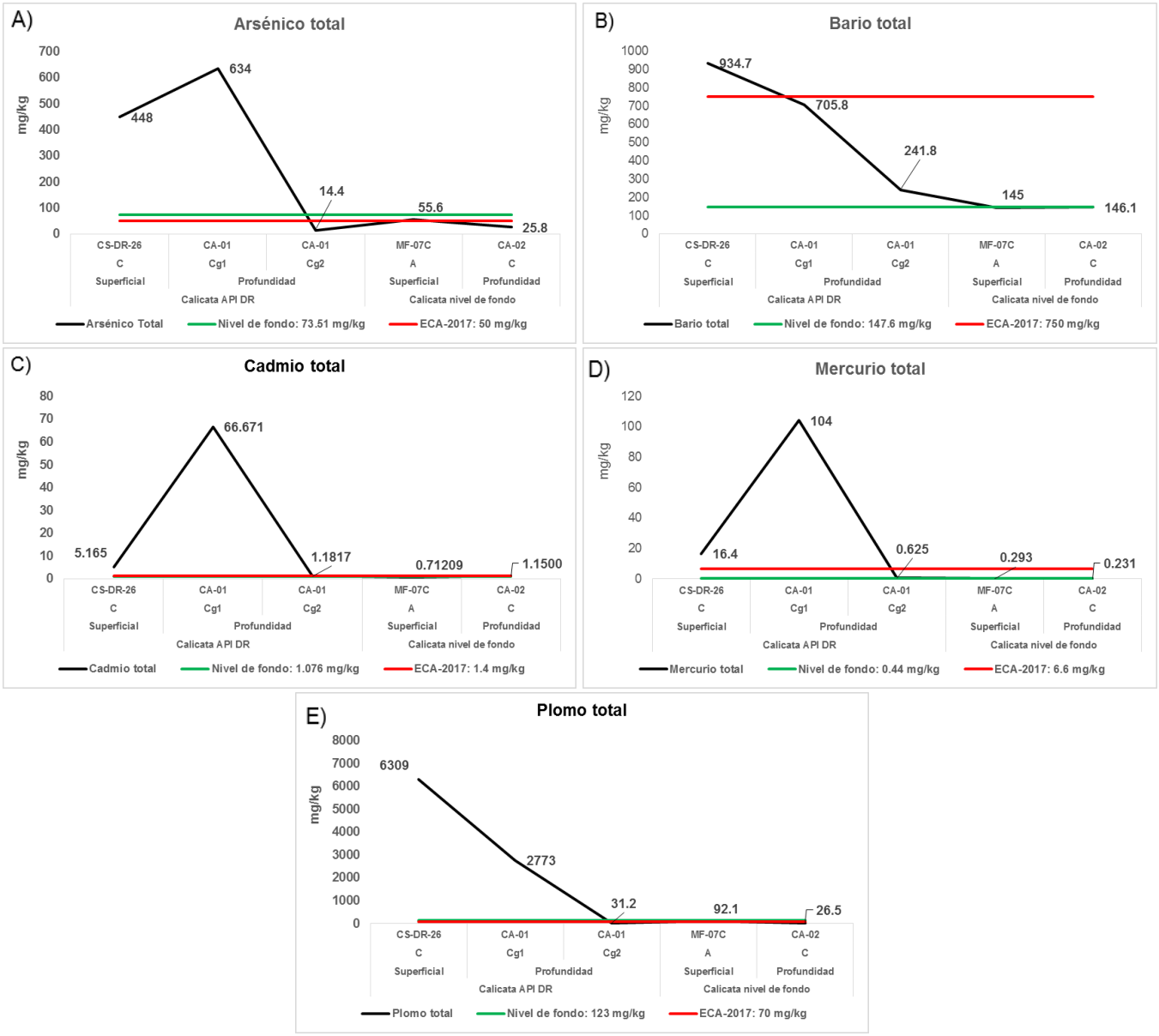


Figura 7.102. Concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo, en calicatas del API DR y del nivel de fondo C, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y los valores de nivel de fondo

Se comparó, de manera referencial, las concentraciones de los elementos de interés como el cobre, plata, selenio y zinc en el horizonte Cg1 del API DR, donde superaron los valores de la guía canadiense en 7 833,3 %, 333 %, 262,8 % y 7068 %, y los valores del nivel de fondo en 7774,5 %, 18323,4 %, 274,4 % y 9944,8 % respectivamente; además en el horizonte Cg2 de la calicata del API, las concentraciones de metales disminuyen a comparación de los 2 primeros horizontes, ya que ninguno de esos superaron los valores de la guía en mención. En caso contario, en el horizonte C de la calicata del nivel de fondo solo las concentraciones de selenio superaron el valor de la guía establecida (Figura 7.103).

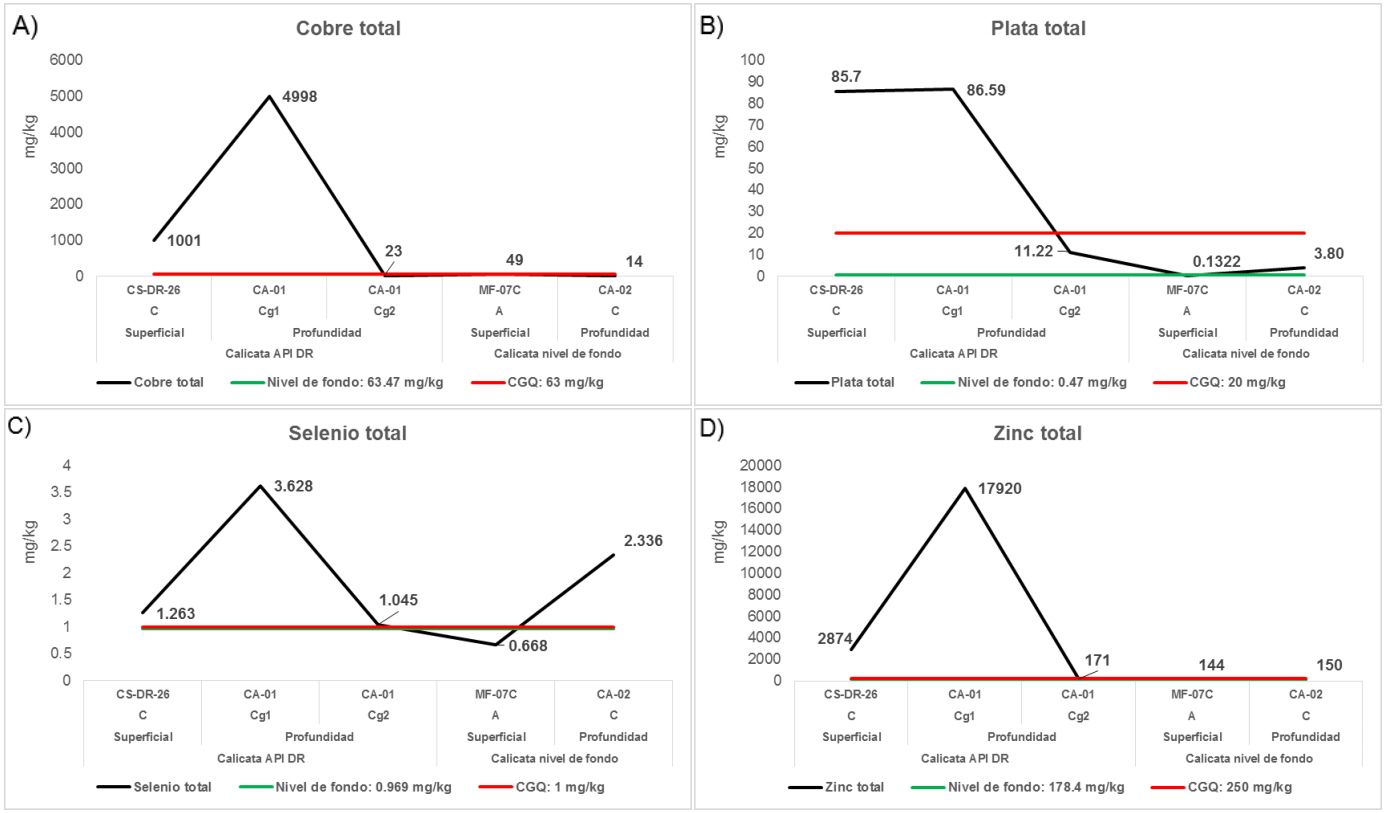


Figura 7.103. Concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y E) zinc en calicatas del API DR y del nivel de fondo C, comparadas con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y los valores de nivel de fondo

Dentro de los estudios realizados para la ejecución de la presente evaluación se colectaron muestras de sedimento, en 2 puntos, a lo largo del río San Juan; el primer punto ubicado aguas arriba en el punto RSjua-13, y segundo punto aguas abajo en el punto RSjua-16 del API DR (Figura 7.104); donde se reportaron concentraciones de metales en los sedimentos que superaron los valores referenciales de la guía canadiense de sedimento (Tabla 1),

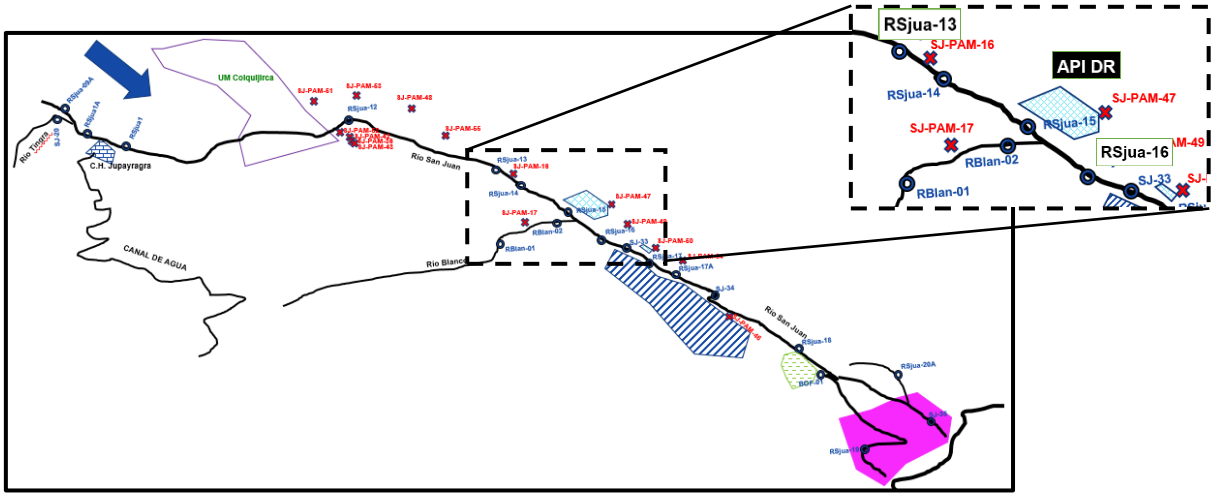


Figura 7.104. Ubicación de los puntos de sedimento colectados aguas arriba y aguas abajo del API DR

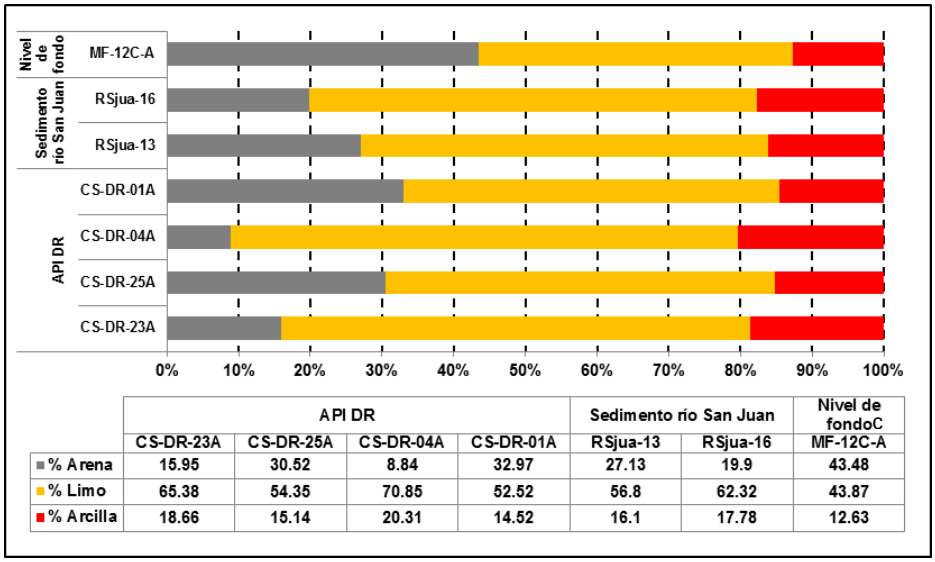
Tabla 7.8. Concentraciones de metales en muestras de los puntos de sedimento sobre el río San Juan

Parámetro	Unidad	Aguas abajo	Aguas arriba	Guía canadiense de sedimento
		RSjua-13	RSjua-16	Valor PEL
Arsénico Total	mg/kg	142	145	5,9
Bario Total	mg/kg	204,2	215,9	-
Cadmio Total	mg/kg	11,637	13,08	0.6
Cobre Total	mg/kg	516	595	35,7
Hierro Total	mg/kg	26 043	28 188	-
Manganeso Total	mg/kg	4 510	7 053	-
Mercurio Total	mg/kg	5.69	5.48	0,17
Molibdeno Total	mg/kg	1,246	1,250	-
Plata Total	mg/kg	3,847	5,061	-
Plomo Total	mg/kg	457	427	35
Selenio Total	mg/kg	1,72	2,01	-
Zinc Total	mg/kg	4 413	5 987	123

(-): No aplica

: Supera el valor PEL de la guía canadiense de sedimento

Las partículas predominantes en el suelo del API DR son de tamaño medio, de acuerdo a su porcentaje de distribución nos indica que pertenece a una textura franco limoso, mientras que la textura del suelo del nivel de fondo es de franco; lo que indica que el API presenta exceso de limo. Las muestras colectadas de sedimentos aguas arriba (RSjua-13) y aguas abajo (RSjua-16) son de textura franco limoso al igual que la textura de suelo del API (Figura 7.105), esto ratifica que el sedimento que arrastró el río San Juan contiene elevadas cargas de metales, y en los eventos extraordinarios durante el desborde del cauce de ese río se depositó los sedimentos en este API lo cual ocasionó el aporte de limo al suelo.



	API DR				Sedimento río San Juan		Nivel de fondoC
	CS-DR-23A	CS-DR-25A	CS-DR-04A	CS-DR-01A	RSjua-13	RSjua-16	MF-12C-A
% Arena	15.95	30.52	8.84	32.97	27.13	19.9	43.48
% Limo	65.38	54.35	70.85	52.52	56.8	62.32	43.87
% Arcilla	18.66	15.14	20.31	14.52	16.1	17.78	12.63

Figura 7.105. Distribución de análisis granulométrico entre el API DR, los sedimentos del río San Juan y el nivel de fondo C

Asimismo, se empleó el método de análisis geoestadístico para evaluar la distribución espacial e identificar la fuente de los metales en el API DR mediante métodos de interpolación espacial. Para la presente evaluación se empleó el método ordinario de kriging

(OK), debido a que dicho método se emplea comúnmente para la investigación de suelos y en el mapeo de su contaminación (Xie *et al*., 2011), y se usó el software libre QGIS, para mapear la distribución espacial de los metales pesados en la API.

En la Figura 7.106 se presenta la distribución espacial de las concentraciones de los metales como el arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo reportados en el API DR, donde se evidenció que las máximas concentraciones se ubican en los puntos a lo largo de los canales que el río San Juan generó cuando su cauce desbordó; otra zona donde se evidenció las mayores concentraciones son los puntos próximos al río San Juan. En ambos sectores se observa coloraciones más intensas, y por último, se presenta las menores concentraciones ubicadas en la parte media y en el extremo sur del API, donde las concentraciones disminuyen.

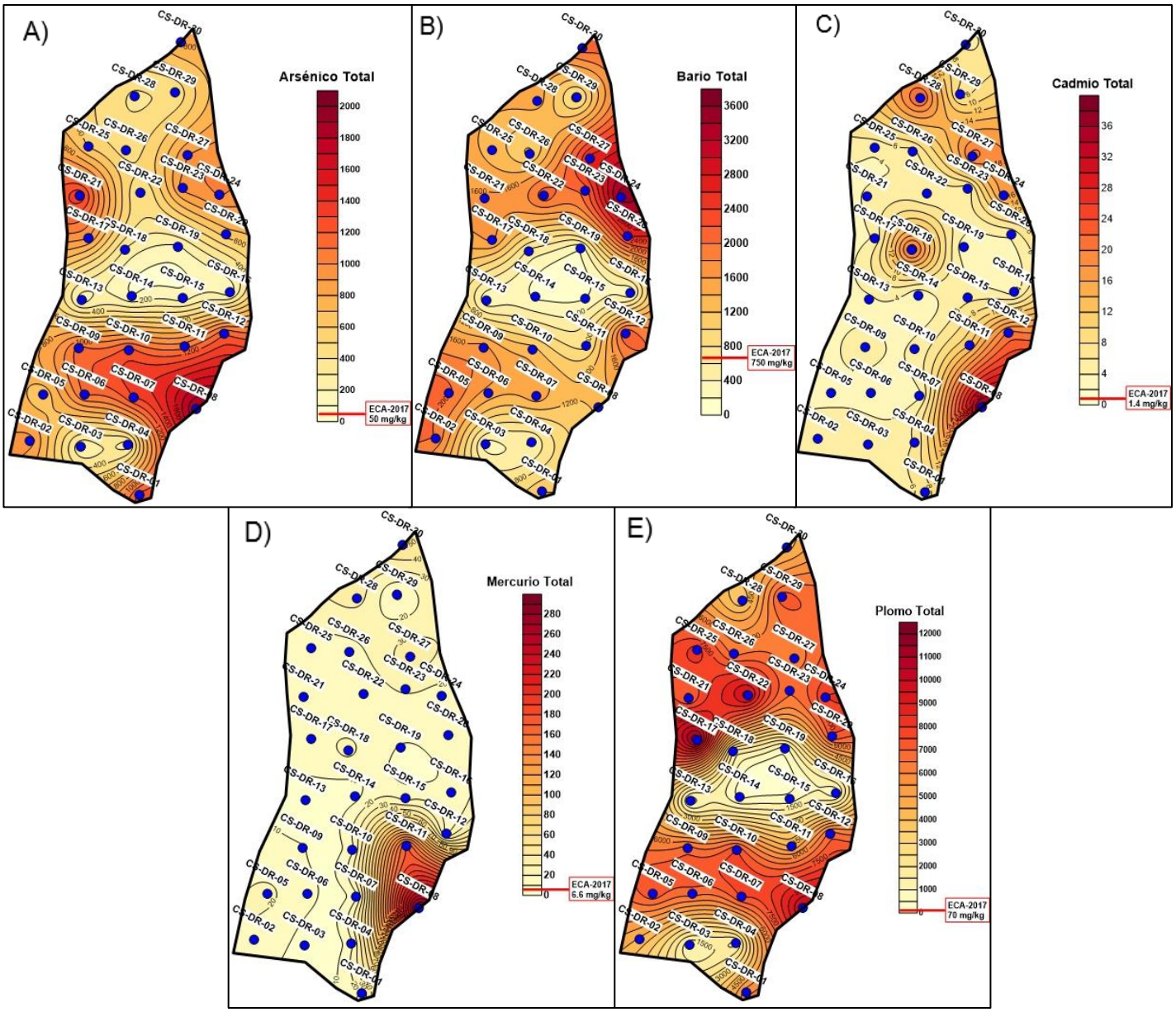


Figura 7.106. Distribución espacial de las concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo registradas en el API DR, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola

Respecto a la distribución espacial de las concentraciones de los metales como el cobre, plata, selenio y zinc reportados en el API DR, se evidenció que las máximas concentraciones de estos metales se ubican en los puntos a lo largo de los canales que el río San Juan generó al momento del desborde del cauce; otra zona donde se evidenció las mayores concentraciones son los puntos próximos al río San Juan. En ambos sectores se observa coloraciones más intensas, y por último se visualiza las menores concentraciones que se ubican en la parte media y en el extremo sur del API, donde la coloración disminuye de intensidad (Figura 7.107).

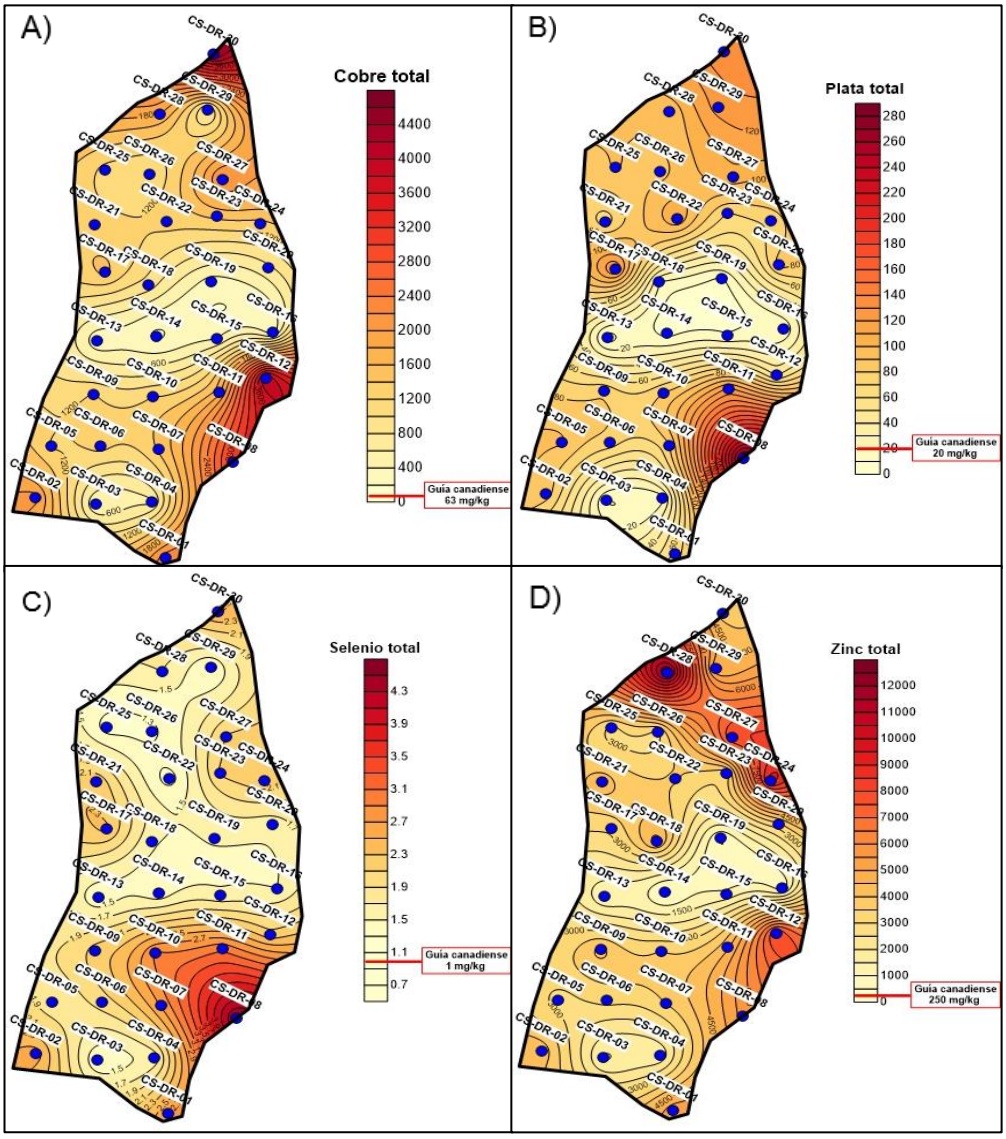


Figura 7.107. Distribución espacial de las concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc registradas en el API DR, comparadas con los valores de la guía canadiense, uso agrícola

La degradación del suelo se mide a través del «cambio en la productividad del suelo» utilizando, como *proxy*, la productividad primaria neta (PNP) que se estima a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) detectado de forma remota (Dent *et al.*, 2015).

Para poder determinar las variaciones en la cobertura vegetal por actividades externas e identificar el área de potencia interés por acumulación de metales pesados provenientes de pasivos mineros se realizó el análisis multitemporal con imágenes satelitales[74] en las áreas de potencial interés API APM 50 de 1989, 1991, 1994, 1997, 2000, 2005, 2008, 2011 y 2013, en donde se empleó el índice NDVI (Figuras 7.108 y 7.109).

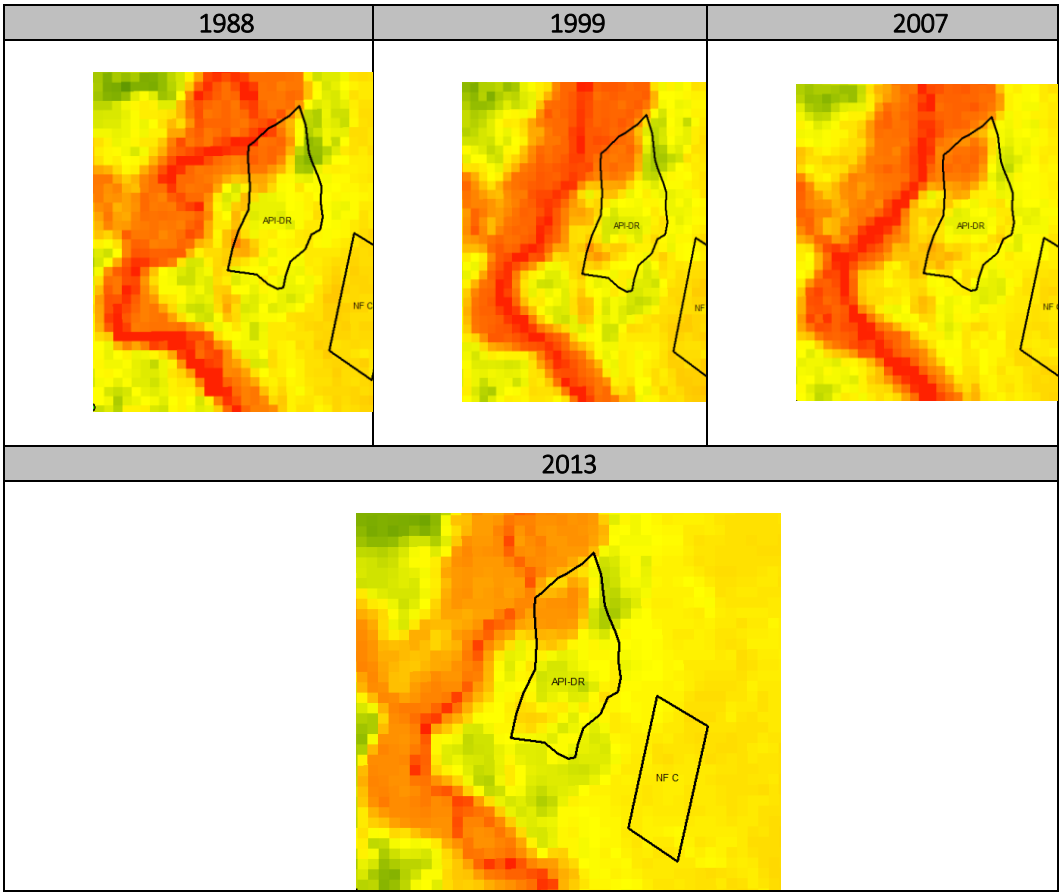


Figura 7.108. Imágenes satelitales Landsat de índice de vegetación NDVI desde julio hasta setiembre para 1988, 1999, 2007 y 2015

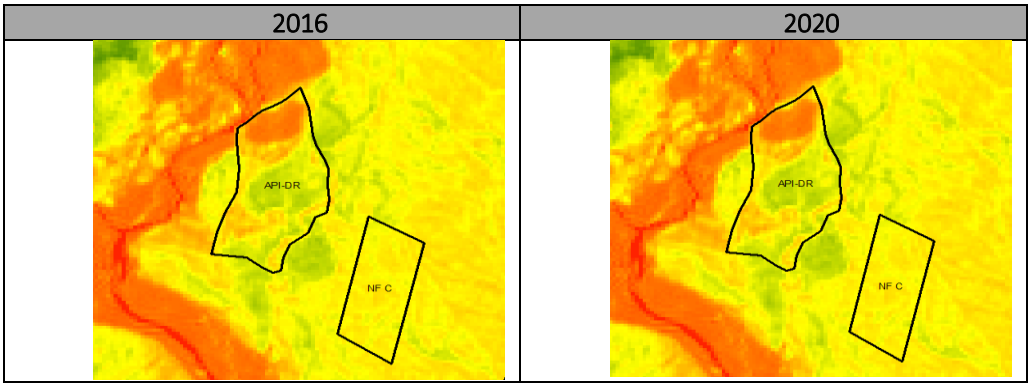


Figura 7.109. NDVI de las imágenes satelitales Sentinel 2A de abril para 2016 y de junio para 2020

74 Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS-Glovis): Landsat 5 (2005, 2007, 2008, 2010), Landsat 8 (2014, 2017).

En esta API se hizo un sobrevuelo de un área de 10,77 ha que conforma la formación de cobertura vegetal mixta o alterada en la que se realizó el análisis de los índices de vegetación de NDVI y NDRE. Obteniéndose una media de 0,228 de NDVI y 0,095 de NDRE (Tabla 7.9 y Figura 7.110).

Tabla 7.9. Información estadística de los índices de vegetación NDVI y NDRE

Estadísticos	NDVI	NDRE
Count	12088492	12089444
Sum	2753022,68	1146483,575
Mean	0,228	0,095
Stdev	0,080	0,037
Min	-0,370	-0,179
Max	0,733	0,477

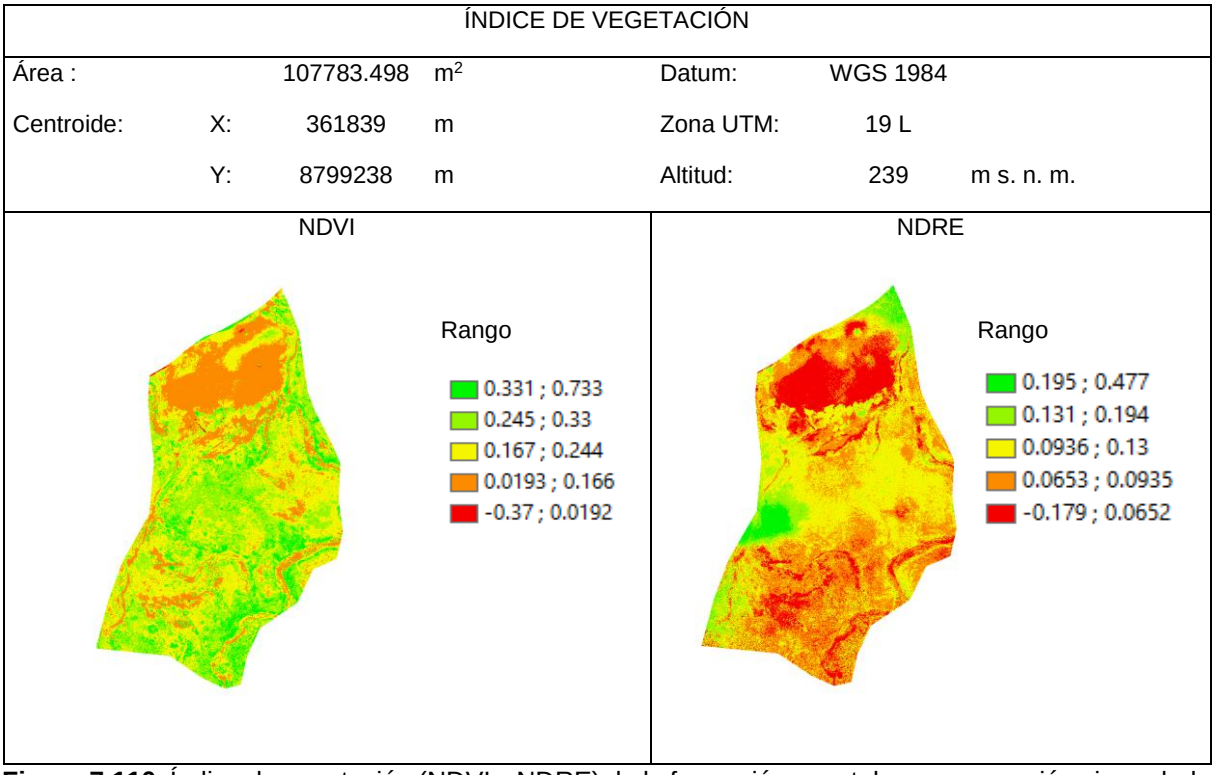


Figura 7.110. Índice de vegetación (NDVI y NDRE) de la formación vegetal en recuperación circundado ‘por césped de puna correspondiente al API DR

Análisis de datos

Se determinó la relación con cada índice de vegetación (NDVI y NDRE) en respuesta a cada punto de muestreo del componente suelo en un radio de 0,5 m entorno al punto, según la cobertura vegetal presente, ajustándose mejor el índice NDVI para el análisis, así mismo se observa valores de índices bajos donde la vegetación es escasa o nula y aumentando los valores cuando hay mayor cobertura vegetal y se puede observar también valores bajos de coeficiente estadístico considerando un análisis en conjunto debido a encontrarse en una cobertura vegetal en recuperación (Figura 7.111).

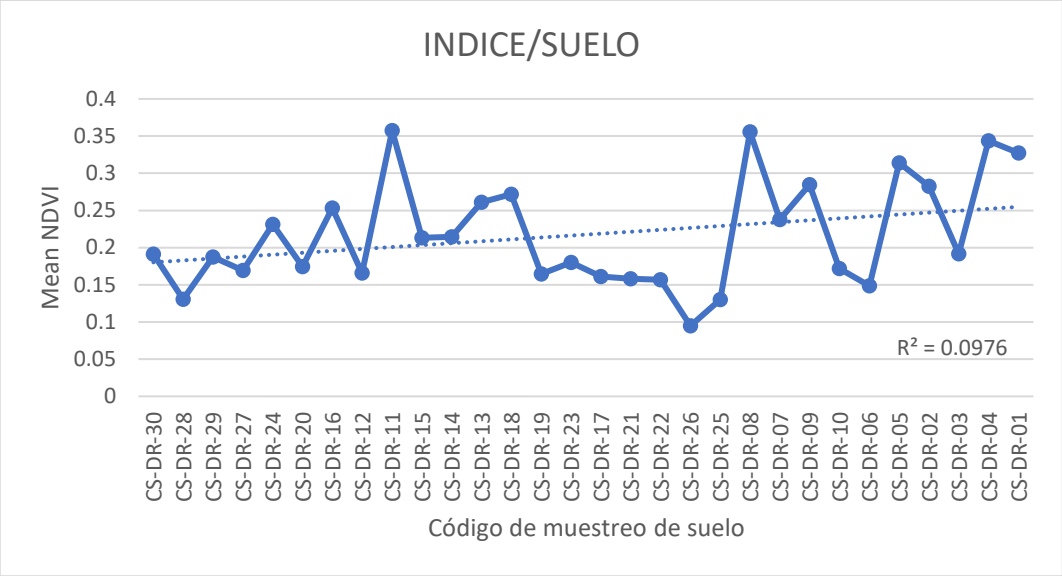


Figura 7.111. Distribución de los puntos de muestreo de suelo en una formación vegetal mixta que se encuentra en recuperación con respecto a los valores del índice de vegetación NDVI

El estudio de los índices de vegetación nos permite determinar el estado de la vegetación, la cual puede estar siendo afectado a consecuencia de diferentes factores que influye en la radiancia detectada por el sensor emitida por la planta a través de la clorofila (Gunamani *et al*., 1991); estos índices nos sirven como indicador para poder explicar como viene siendo afectado la vegetación por factores externos en relación al componente suelo.

Tejido vegetal

Según García y Dorronsoro (2005) una de las vías comunes de los metales incorporados al suelo puede ser, la absorción de estos por las plantas y así, incorporarse a las cadenas tróficas. Por ello en esta API se analizaron las especies *Festuca rigescens* y *Azorella diapensioides*, esta última restringida a los canales formados por el desplazamiento de agua (Figura 20).

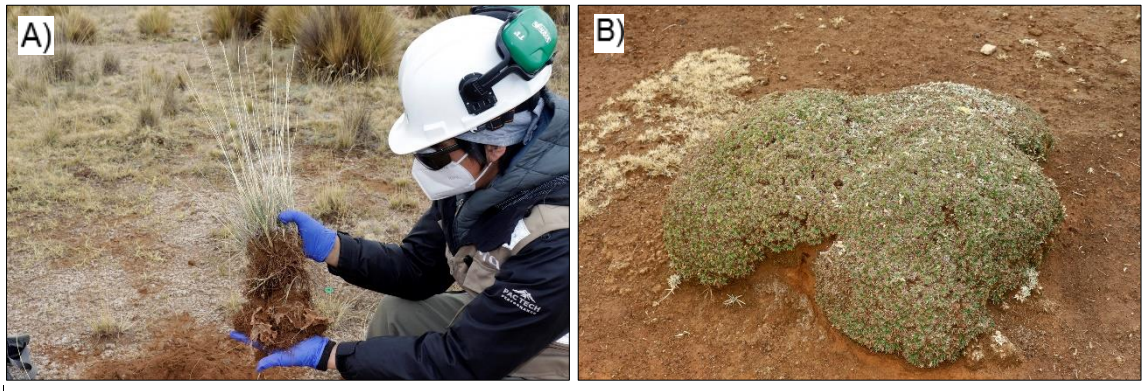


Figura 7.112. Especies colectadas para muestras de tejido vegetal: A) *Festuca rigescens* y B) *Azorella diapensioides*, en el API DR

La especie *Festuca rigescens*, es una gramínea amacollada de tamaño variable, considerada como una especie poco deseable en su estado maduro (Maldonado, 2010), sin embargo, los brotes son consumidos por ganado ovino y alpacas (Minagri, 2013); además

el estudio realizado por Macuri (2017) concluye que es una especie deseable para vicuñas, por lo cual es importante conocer el contenido de metales que contiene. Por otro lado, *Azorella diapensiodes*, es una especie pulvinada, con almohadillados densos entre planos a convexos, considerada como una planta poco deseable para el ganado (Maldonado, 2010); sin embargo, es una especie considerada como Vulnerable (VU) según la legislación nacional (Decreto Supremo N.° 043-2006-AG), además de ser una especie que suele ser encontrada con mayor frecuencia en zonas aledañas a los bofedales.

Los resultados obtenidos en las muestras de tejido vegetal en el API, muestran un número elevado en la concentración de metales principalmente en *Azorella diapensioides*, con una mayor concentración en principales metales en el punto SJTV14 (Figura 7.113). Las concentraciones en esta especie superaron en promedio para arsénico en un 2289 % a las concentraciones registradas en la muestra obtenida en el sitio control, 1248 % en bario, 426 % en cadmio, 2005 % en cobre, 5510 % en mercurio, 14554 % en plata, 3325 % en plomo, 1087 % en selenio y 1220 % en zinc.

Además, las concentraciones obtenidas en todas muestras colectadas de *Azorella diapensioides* superan, de manera referencial, el contenido máximo de los metales de arsénico, cadmio, mercurio y plomo establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal), de la norma española; sin embargo, los valores en el punto control son mucho menores. A nivel mundial existen registros de muchos animales muertos producto de un envenenamiento con Pb, ya sea por la inhalación del polvo tóxico en la hierba o bien por el consumo de plantas con un alto contenido de metales pesados (Williamson *et al*., 1982); además, otros metales como Hg, Cd, As y Se, también son muy dañinos para la salud humana y para la mayoría de los microorganismos vivos, (Llugany *et al* 2007). Por lo cual, esta especie en el API DR sería un potencial peligro, si es consumida por la fauna local.

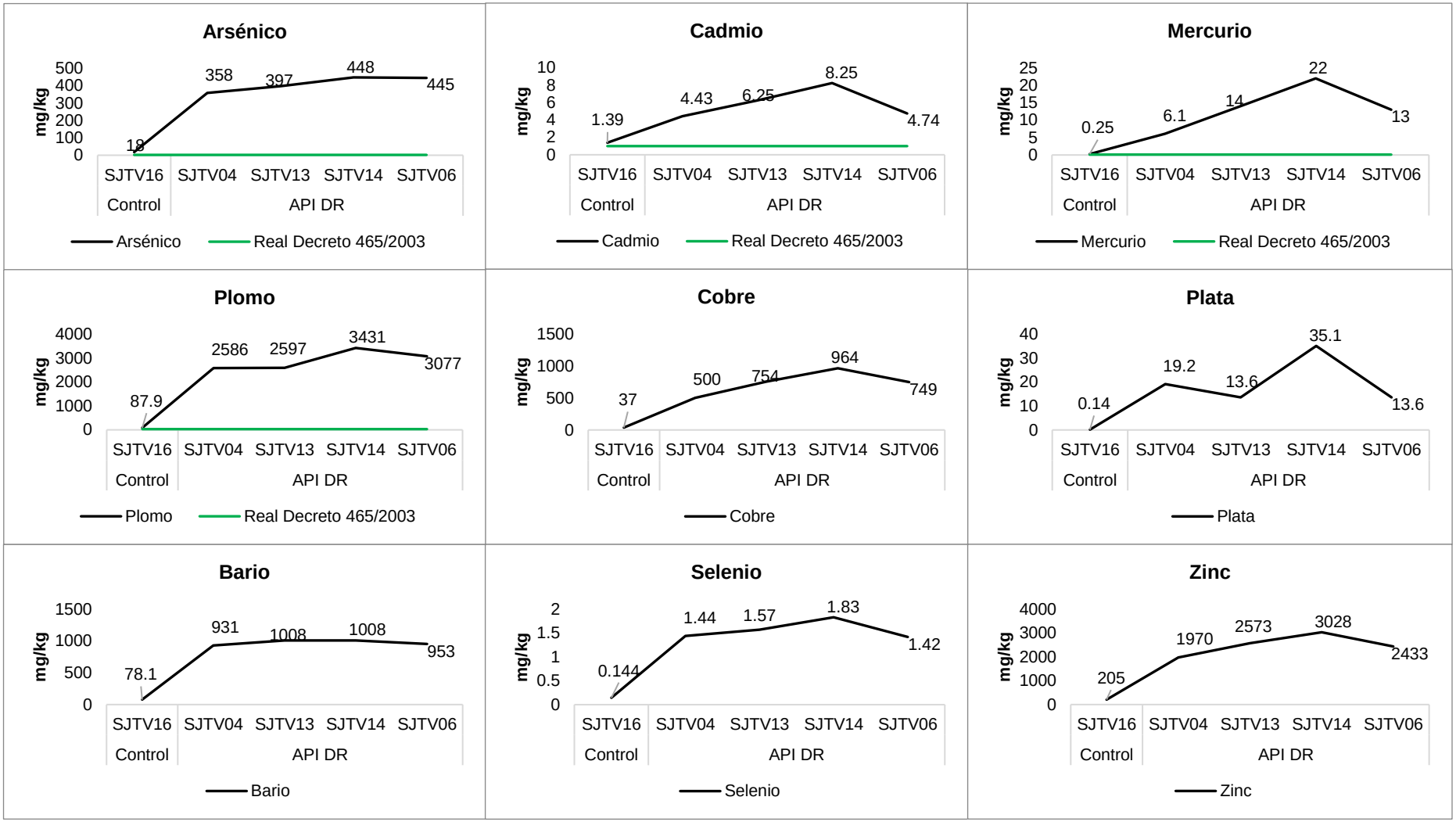


Figura 7.113. Concentración de metales obtenidos en *Azorella diapensioides*

Las concentraciones obtenidas en las muestras de *Festuca rigescens*, muestran los valores más elevados en el punto SJTV05 a excepción de cadmio, donde en dicho presentó la mayor concentración (Figura 7.114). Estas concentraciones superaron por muchoo a los registrados en la muestra colectada en el sitio control, tanto en la parte aérea como en la raíz, donde se obtuvo para arsénico 1767 % más a lo registrado en la parte aérea de la muestra control y 3766 % más para la raíz, para bario los porcentajes son 806 % para la parte aérea y 1819 % para la raiz, cadmio (239 % y 399 %), cobre (902 % y 2864 %), mercurio (520 % y 1941 %), plata (338 % y 1663 %), plomo (2030 % y 2030 %), selenio (115 % y 346 %) y zinc (514 % y 986 %). Resaltar que, las diferencias entre las muestras colectadas en el API y el sitio control, son mucho mayores en la raíz.

Además, las concentraciones obtenidas en la pare aérea (no se consideró para esta comparación a los valores obtenidos en la raíz de la muestra, debido a que no son consumidos) de las muestras colectadas de *Festuca rigescens* en el API superaron, de manera referencial, por mucho al contenido máximo de los metales de arsénico, cadmio, mercurio y plomo establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal), de la norma española; siendo mercurio y plomo los más resaltantes por su concentración. Sin embargo, estos valores solo fueron superados en arsénico y mercurio en la muestra del sitio control, pero por un porcentaje pequeño. Por lo cual, esta especie en el API DR también sería un potencial peligro, si es consumida por la fauna local, más aún si esta especie puede ser consumida por la fauna doméstica (ganado) o fauna silvestre como la vicuña, entre otros.

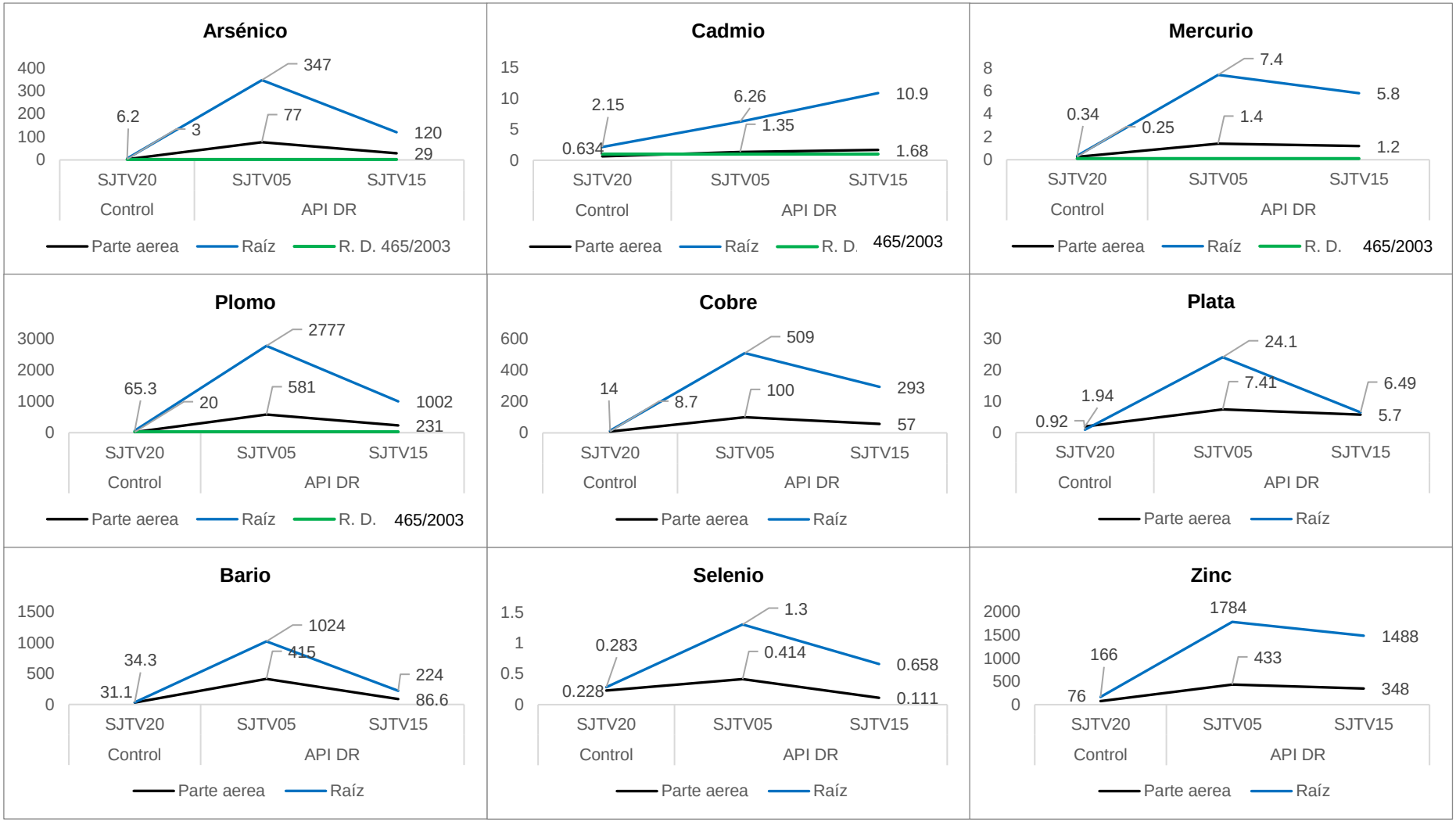


Figura 7.114. Concentración de metales obtenidos en *Festuca rigescens*

f. API PAM 50

EL área de potencial interés PAM 50 está ubicado en el distrito Vicco, próximo al área donde se ubicó el relave colonial Chaquiniyo, según el inventario de pasivos ambientales mineros[75]; el API pertenece a una llanura inundable con pendiente corta aproximadamente menor a 1 %, la cobertura vegetal presente en esta es una vegetación en recuperación; con cobertura vegetal de pastos altoandinos conformados principalmente por la especie *Festuca rigescens* y *Aciachne acicularis*, entre otras propias de la zona.

Este pasivo en la actualidad no existe, debido a que fue retirado para su reaprovechamiento; en el área donde se instaló el API se evidenció que fue alterada (remoción y retiro de suelo) (Figura 7.115).

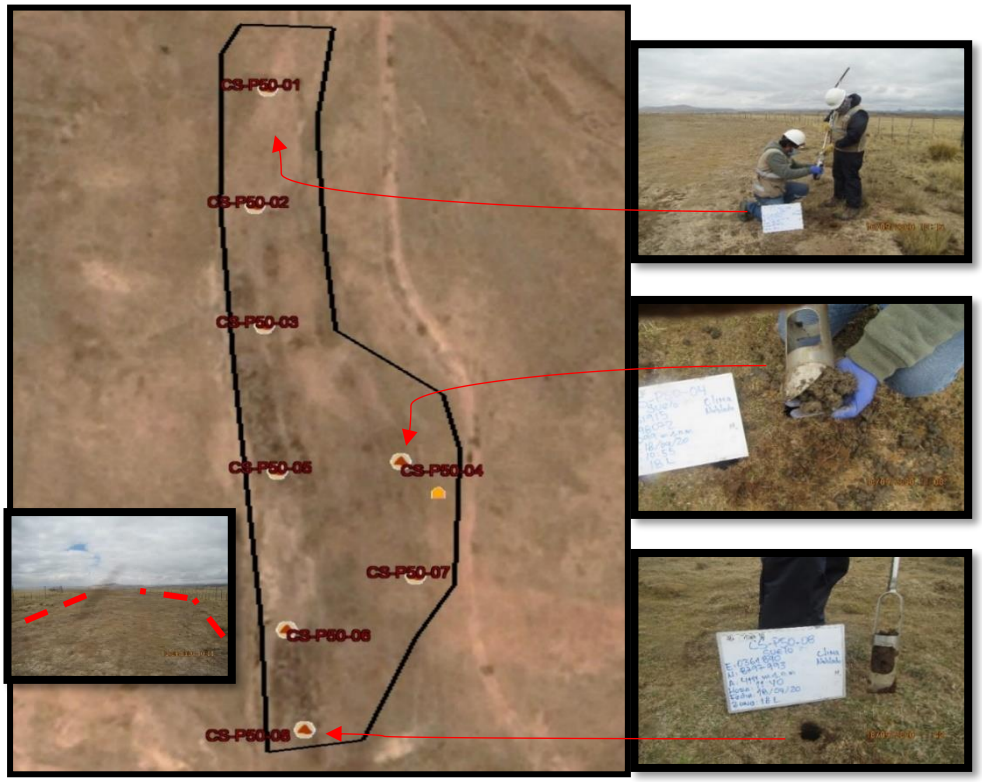


Figura 7.115. Vista panorámica del API PAM 50, donde se aprecia sus puntos de muestreo

En cuanto a la degradación de los suelos, Jiménez *et al*. (2017) supone una destrucción de las condiciones ambientales originales, dando paso a la degradación del suelo, esta degradación se hace evidente debido a la perdida de materia orgánica (degradación biológica), alteración de textura y estructura (degradación física) y finalmente con la acumulación de metales y pérdida de parámetros edáficos (degradación química).

Además de conocer los resultados de cobertura, calculados mediante los índices de vegetación entre cada año, se generó mapas de cambios comparando cada 3 años con el objetivo de conocer los cambios más significativos mediante las tonalidades bien marcadas,

[75] Aprobado mediante Resolución Directoral N.° 238-2020-MEM/DM, fue publicada el 24 de agosto de 2020 «Actualización del Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros»

como resultado de los cambios generados por algunas actividades externas que se ven reflejados en la cobertura vegetal.

El uso de imágenes satelitales y multitemporales[76] de 1988, 1990, 1994, 1997, 1999, 2005, 2007, 2011, 2013, 2015 y 2019 de los cuales se obtuvieron los índices NDVI y NDRE (Figura 7.116), sirvió para determinar el área de potencial interés. Cabe precisar que la degradación del suelo se mide a través del cambió de productividad y este se estimada a través de los índices de vegetación normalizada y los índices de borde rojo de diferencia normalizada

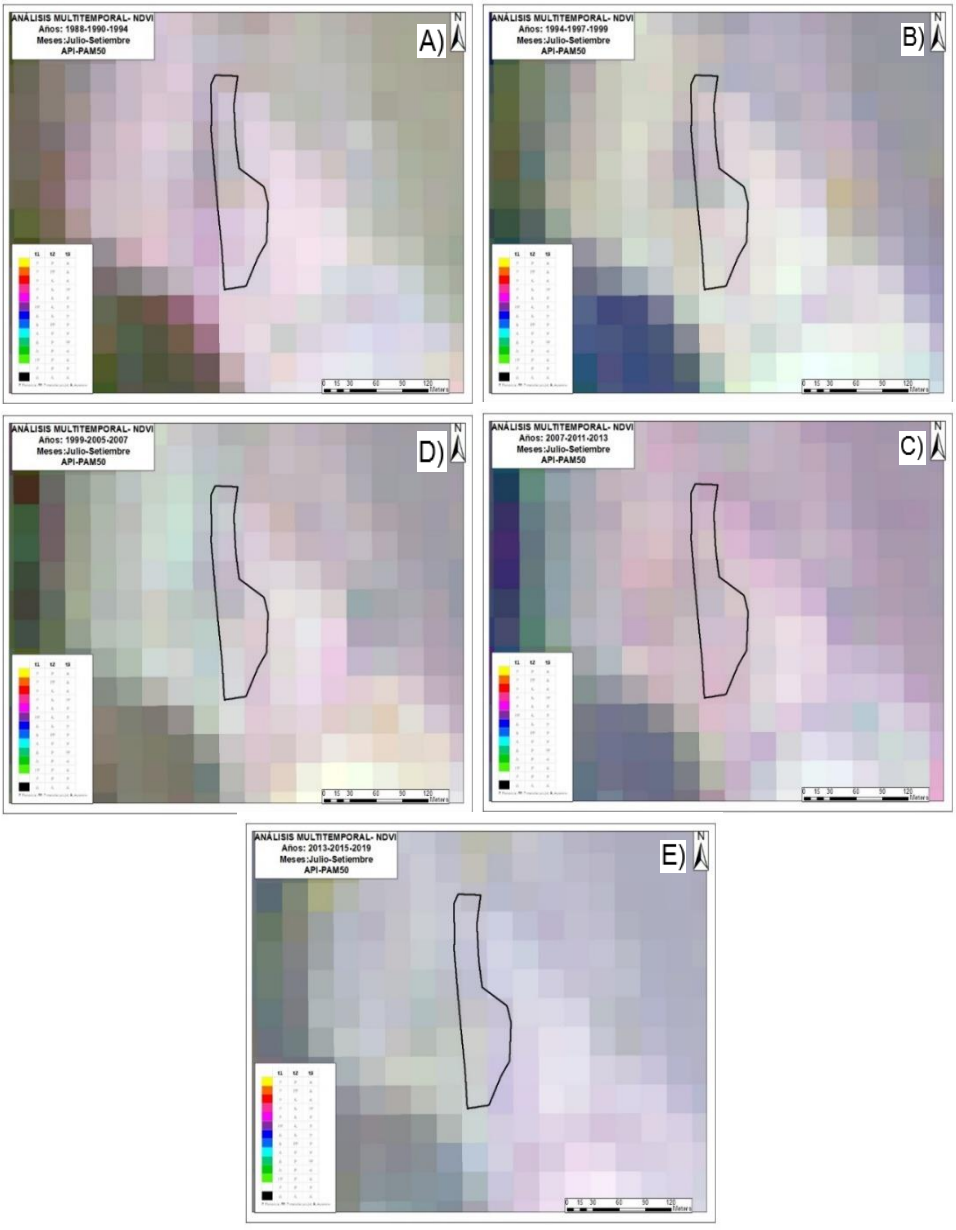


Figura 7.116. Análisis multitemporal de NDVI de la subcuenca San Juan de A) 1988, 1990 y 1994; de B) 1994, 1997 1999; de C) 1999, 2005 y 2007; D) 2007, 2011 y 2013; y E) 2013, 2015 y 2019

76 Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS-Glovis): Landsat Landsat 5 (1988, 1990, 1994, 1997, 1999, 2005, 2007, 2011), Landsat 8 (2013, 2015 y 2019).

En la Figura 7.117 se observa que los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y los valores del nivel de fondo fueron superados por las concentraciones de arsénico y plomo en todas las puntos muestreados (8 muestras); cabe precisar que la mayor concentración de arsénico se registró en el punto CS-P50-03 y superaron en 1940 % al valor de la norma en mención y en 1287,6 % al valor de nivel de fondo, y plomo presentó concentraciones que superaron la norma señalada en 1287,1 % y en 7120,3 % al valor de nivel de fondo; en el punto CS-P50-05, con respecto a las concentraciones de bario, cadmio y mercurio superaron la norma indicada en 7 de 8 puntos; donde la mayor concentración de estos elementos se registraron en los puntos CS-P50-08, CS-P50-05 y CS-P50-04 respectivamente, el bario superó en 125,3 % al valor de la norma establecida y en 1045 % al valor de nivel de fondo, cadmio superó el valor de la norma mencionada en 3017,5 % y en 3024,2 % el valor de nivel de fondo, de la misma manera mercurio superó en 3339,4 % al valor de la norma estipulada y en 51490,9 % al valor de nivel de fondo.

Se compararon, de manera referencial, las concentraciones de los elementos de interés como el cobre, selenio, zinc y plata con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola, donde la mayor concentración de cobre se registró en el punto CS-P50-08 y superó en 3268,3 % al valor de la guía en mención y en 3243,3 % al valor de nivel de fondo, selenio superó en 210,8 % el valor de la guía establecida y en 220,7 % al valor de nivel de fondo en el punto CS-P50-04, zinc superó en 9668,8 % el valor de la guía señalada y en 13589,5 % al valor de nivel de fondo en el punto CS-P50-05; plata superó en 563 % el valor de dicha guía y en 28112,8 % al valor de nivel de fondo en el punto CS-P50-06 (Figura 7.118).

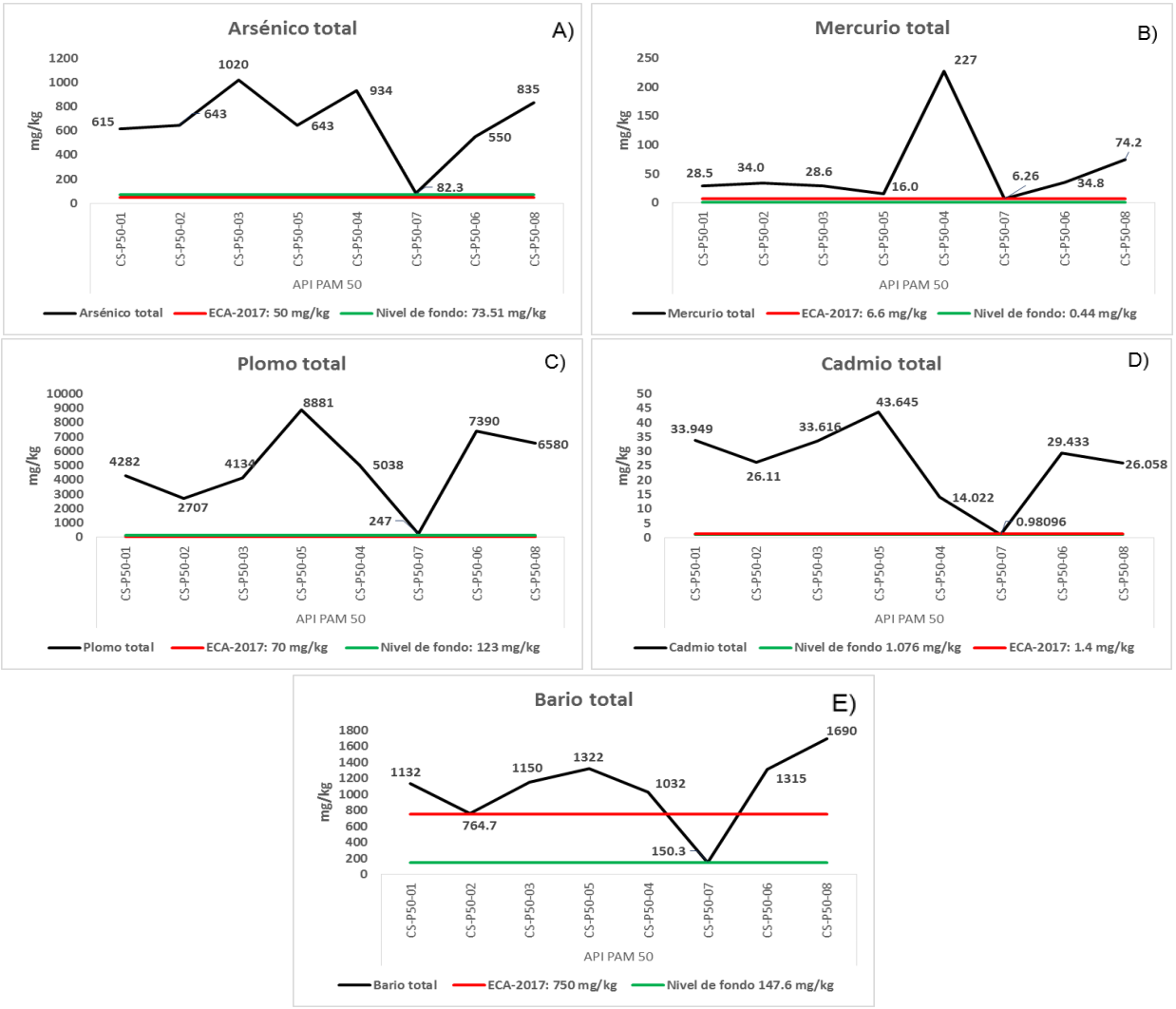


Figura 7.117. Concentraciones de A) arsénico, B) mercurio, C) plomo, D) cadmio y E) bario en el API PAM 50, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola y valores de nivel de fondo

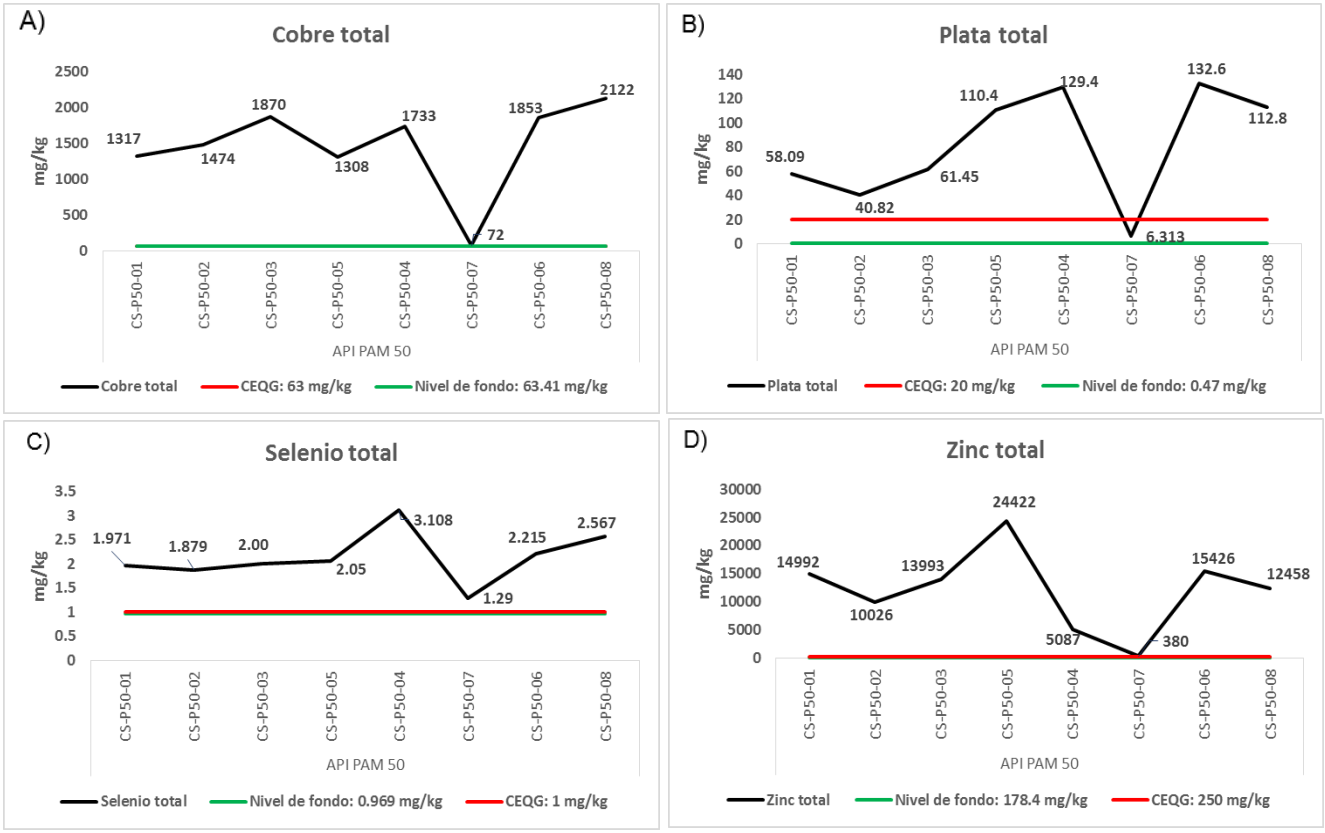


Figura 7.118. Concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc en el API PAM 50, comparadas con los valores de la guía canadiense de suelo, uso agrícola y los valores del nivel de fondo

Asimismo, se empleó el método de análisis geoestadístico para evaluar la distribución espacial e identificar la fuente de los metales pesados en el API PAM 22 mediante métodos de interpolación espacial. Para la presente evaluación se empleó el método ordinario de kriging (OK), debido a que dicho método se emplea comúnmente para la investigación de suelos y en el mapeo de su contaminación (Xie *et al*., 2011), y se usó el software libre QGIS, para mapear la distribución espacial de los metales en las API. En la Figura 7.119, se observa que las concentraciones más elevadas de arsénico y plomo en el API (coloración más intensa), se registraron en el área donde se ubicó el PAM relave colonial Chaquiniyo.

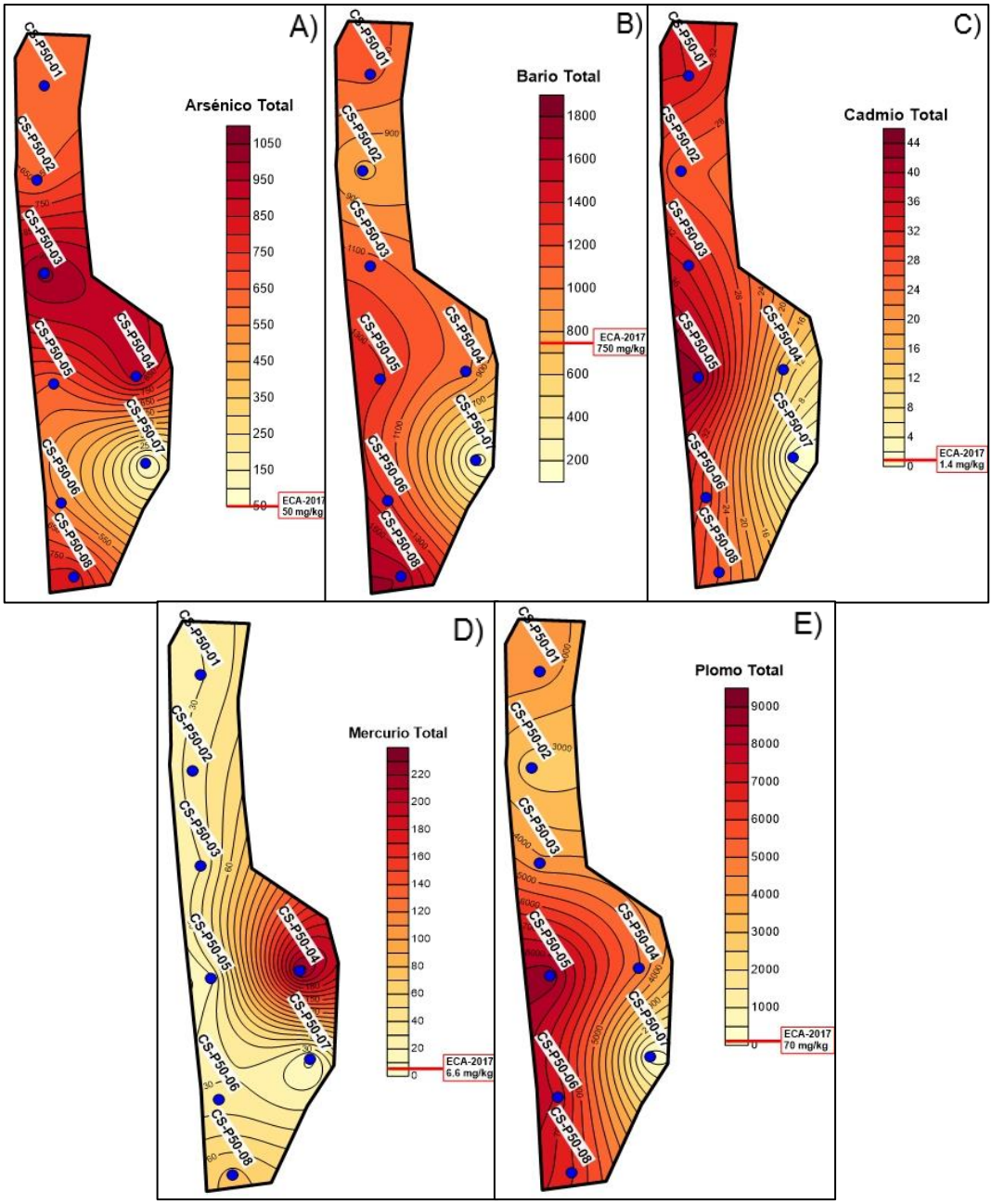


Figura 7.119. Distribución espacial de concentraciones de A) arsénico, B) bario, C) cadmio, D) mercurio y E) plomo registradas en el API PAM 50, comparadas con los valores de los ECA para suelo 2017, uso agrícola

Del mismo modo se empleó el método de análisis geoestadístico para evaluar la distribución espacial e identificar la fuente de los metales en el API PAM 50 mediante métodos de interpolación espacial, en la Figura 7.120 se presenta la distribución espacial para metales como el cobre, selenio, zinc y plata.

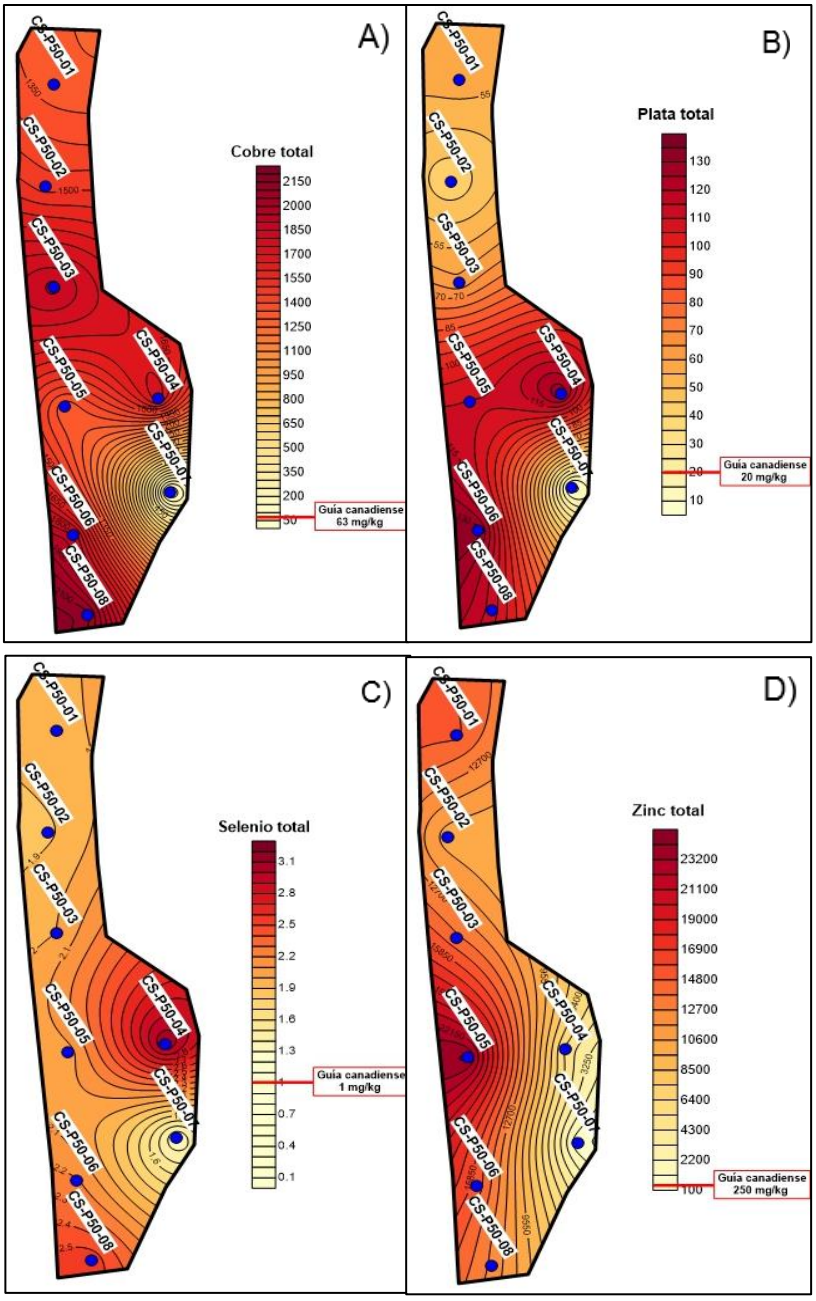


Figura 7.120. Distribución espacial de las concentraciones de A) cobre, B) plata, C) selenio y D) zinc registradas en el API PAM 50, comparadas con los valores de la guía canadiense, uso agrícola

La degradación del suelo se mide a través del «cambio en la productividad del suelo» utilizando, como *proxy*, la productividad primaria neta (PNP) que se estima a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) detectado de forma remota (Dent *et al.*, 2015).

La pérdida de materia orgánica y la acumulación de metales pesados en el área de potencial interés, respecto a la acumulación de metales pesados en el nivel de fondo, ha ocurrido debido a la acumulación proveniente de los pasivos ambientales de origen minero específicamente del relave colonial Chaquiniyo y esta acumulación generó aporte al suelo al sufrir cambios temporales por clima y uso actual de suelos, además no presenta influencia de los sedimentos del río San Juan, debido a que el desborde del río San Juan no llegó a depositar sedimentos en esta API; los cuales fueron corroborados con el análisis multitemporal con imágenes satelitales[77] en el API APM 50 de 1988, 1990, 1994, 1997, 1999, 2005, 2007, 2011, 2013, 2015 y 2019, en donde se empleó el índice NDVI (Figuras 7.121 y 7.122).

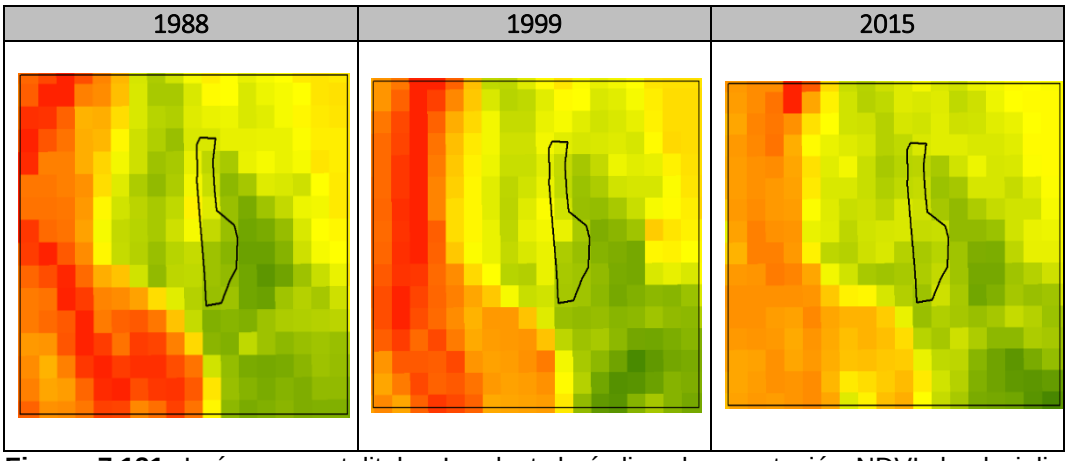


Figura 7.121. Imágenes satelitales Landsat de índice de vegetación NDVI desde julio hasta setiembre para 1988, 1999 y 2015

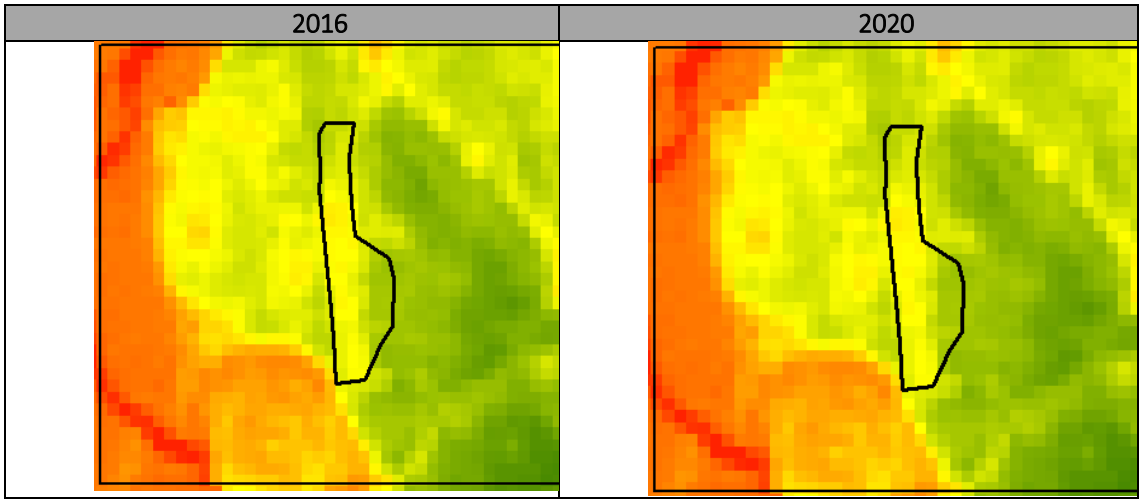


Figura 7.122. NDVI de las imágenes satelitales Sentinel 2A de abril para 2016 y de junio para 2020

En esta API se hizo un sobrevuelo de un área de 0,835 ha, que conforma la formación de cobertura vegetal mixta o alterada en la que se realizó el análisis de los índices de vegetación de NDVI y NDRE. Obteniéndose una media de 0,229 de NDVI y 0,090 de NDRE (Tabla 7.10 y Figura 7.123).

77 Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS-Glovis): Landsat 5 (1988, 1990, 1994, 1997, 1999, 2005, 2007, 2011), Landsat 8 (2013, 2015 y 2019).

Tabla 7.10. Información estadística de los índices de vegetación NDVI y NDRE

Estadísticos	NDVI	NDRE
Count	835152	835152
Sum	191449.636	83063.215
Mean	0.229	0.099
Stdev	0.077	0.019
Min	0.007	-0.119
Max	0.743	0.283

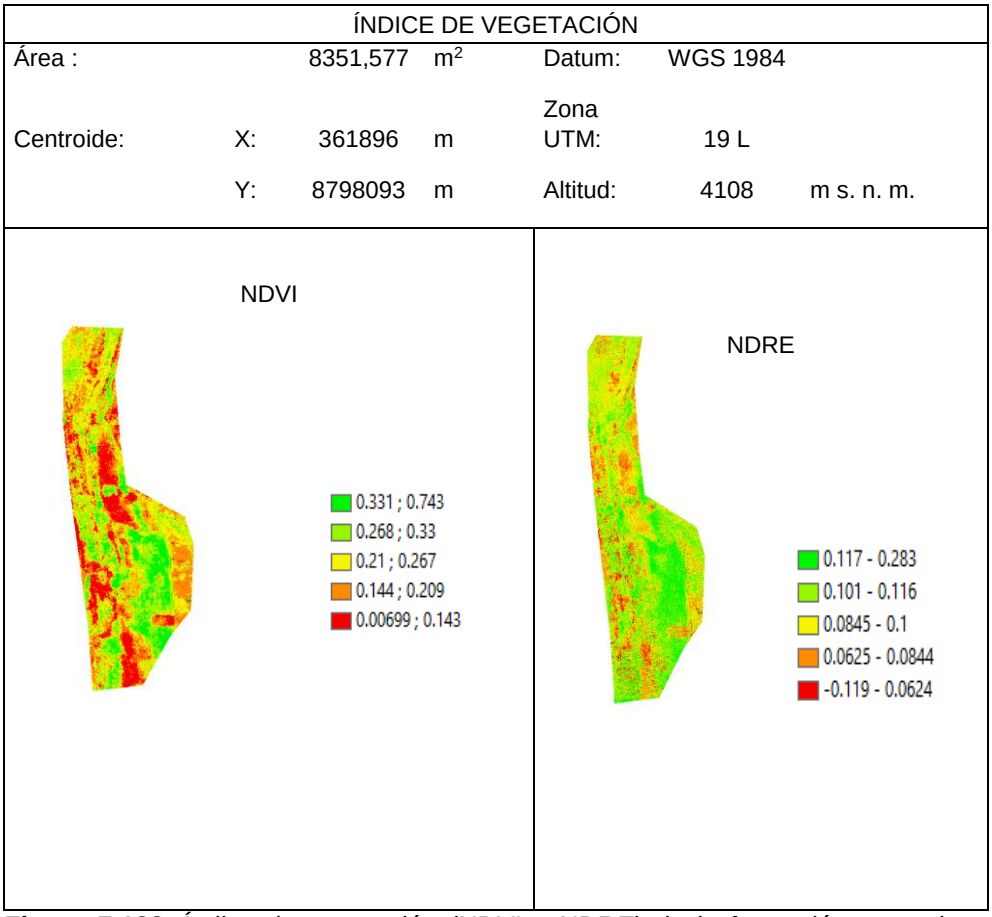


Figura 7.123. Índice de vegetación (NDVI y NDRE) de la formación vegetal en recuperación circundado por césped de puna correspondiente al API PAM 50

Análisis de datos

Se determinó la relación con cada índice de vegetación (NDVI y NDRE) en respuesta a cada punto de muestreo del componente suelo en un radio de 0,5 m entorno al punto, según la cobertura vegetal presente, ajustándose mejor el índice NDVI para el análisis, así mismo se observa valores de índices bajos donde la vegetación es escasa o nula y aumentando los valores cuando hay mayor cobertura vegetal principalmente en zonas de bofedales, además se puede observar también valores bajos de coeficiente estadístico considerando un análisis en conjunto debido a encontrarse en una cobertura vegetal en recuperación (Figura 7.124).

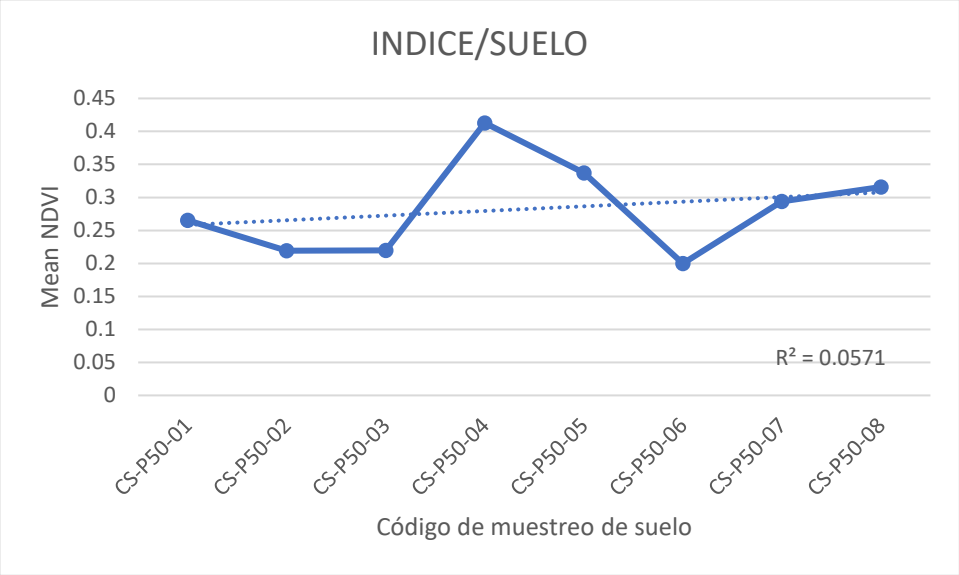


Figura 7.124. Distribución de los puntos de muestreo de suelo en una formación vegetal mixta que se encuentra en recuperación con respecto a los valores del índice de vegetación NDVI

El estudio de los índices de vegetación nos permite determinar el estado de la vegetación, la cual puede estar siendo afectado a consecuencia de diferentes factores que influye en la radiancia detectada por el sensor emitida por la planta a través de la clorofila (Gunamani *et al*., 1991); estos índices nos sirven como indicador para poder explicar como viene siendo afectado la vegetación por factores externos en relación al componente suelo.

Composición florística y tejido vegetal

Según García y Dorronsoro (2005) una de las vías comunes de los metales incorporados al suelo puede ser, la absorción de estos por las plantas y así, incorporarse a las cadenas tróficas. En el API PAM 50, la vegetación no muestra una formación vegetal definida, y por la composición de especies encontrada, se deduce que se trata de una vegetación en recuperación, con componentes florísticos dispersos. Entre las especies observadas se seleccionó a la especie *Festuca rigescens* para el estudio de tejido vegetal.

La especie *Festuca rigescens*, es una gramínea amacollada de tamaño variable, considerada como una especie poco deseable en su estado maduro (Maldonado, 2010), sin embargo, los brotes son consumido por ganado ovino y alpacas (Minagri, 2013); asimismo el estudio realizado por Macuri (2017) concluye que es una especie deseable para vicuñas, por lo cual es importante conocer el contenido de metales que contiene.

Los resultados obtenidos en las muestras de tejido vegetal en el API PAM 50, muestran concentraciones de metales diferentes entre la raíz y la parte aérea, con concentraciones mucho más elevadas en la raíz (Figura 7.125). Presentando los valores más altos para la raíz en la mayoría de los metales en el punto SJTV01, y para la parte aérea en el punto SJTV02, además se puede observar que existe una mayor retención de metales en la raíz en el punto SJTV01. Las concentraciones en la parte aérea de esta especie para los puntos evaluados en el API representan en promedio para arsénico un 221 % a las concentraciones registradas en la muestra obtenida en el sitio control, 214 % en bario, 256 % en cadmio, 352 % en cobre, 1900 % en mercurio, 5590 % en plata, 473 % en plomo, 300 % en selenio y 588

% en zinc. Para la raíz se observa un comportamiento similar en donde las concentraciones encontradas en el API representan en promedio para arsénico un 148 % a las concentraciones registradas en la muestra obtenida en el sitio control, 239 % en bario, 434 % en cadmio, 582 % en cobre, 1716 % en mercurio, 1910 % en plata, 407 % en plomo, 190 % en selenio y 588 % en zinc. Para ambos casos, mercurio y plata son los que mayor diferencia presentaron con respecto a los valores encontrados en el punto control, los cuales también están mencionados como los metales con concentraciones más elevadas en suelos.

Las concentraciones obtenidas en las 2 muestras de la parte aérea de *Festuca rigescens*, colectadas en el API superan, de manera referencial, el contenido máximo de los metales de arsénico, cadmio, mercurio y plomo establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal), de la norma española; sin embargo, los valores encontrados en el API no superaron en cadmio, y los valores de arsénico, cadmio y mercurio fueron superados en poco a diferencia de los encontrados en el API. Los metales que superaron en mayor proporción a los mencionados en la norma son arsénico y plomo; siendo las concentraciones para arsénico 53 mg/kg (valor promedio hallado entre los 2 puntos evaluados) versus 2 mg/kg (valor en el Real Decreto 465/2003); y para plomo 406 mg/kg versus 30 mg/kg.

A nivel mundial existen registros de muchos animales muertos producto de un envenenamiento con Pb ya sea por la inhalación del polvo tóxico en la hierba o bien por el consumo de plantas con un alto contenido de metales pesados (Williamson *et al*., 1982); además, otros metales como Hg, Cd, As y Se, también son muy dañinos para la salud humana y para la mayoría de los microorganismos vivos, (Llugany *et al*., 2007). Por lo cual, esta especie en el API PAM 50 sería un potencial peligro, si es consumida por la fauna local.

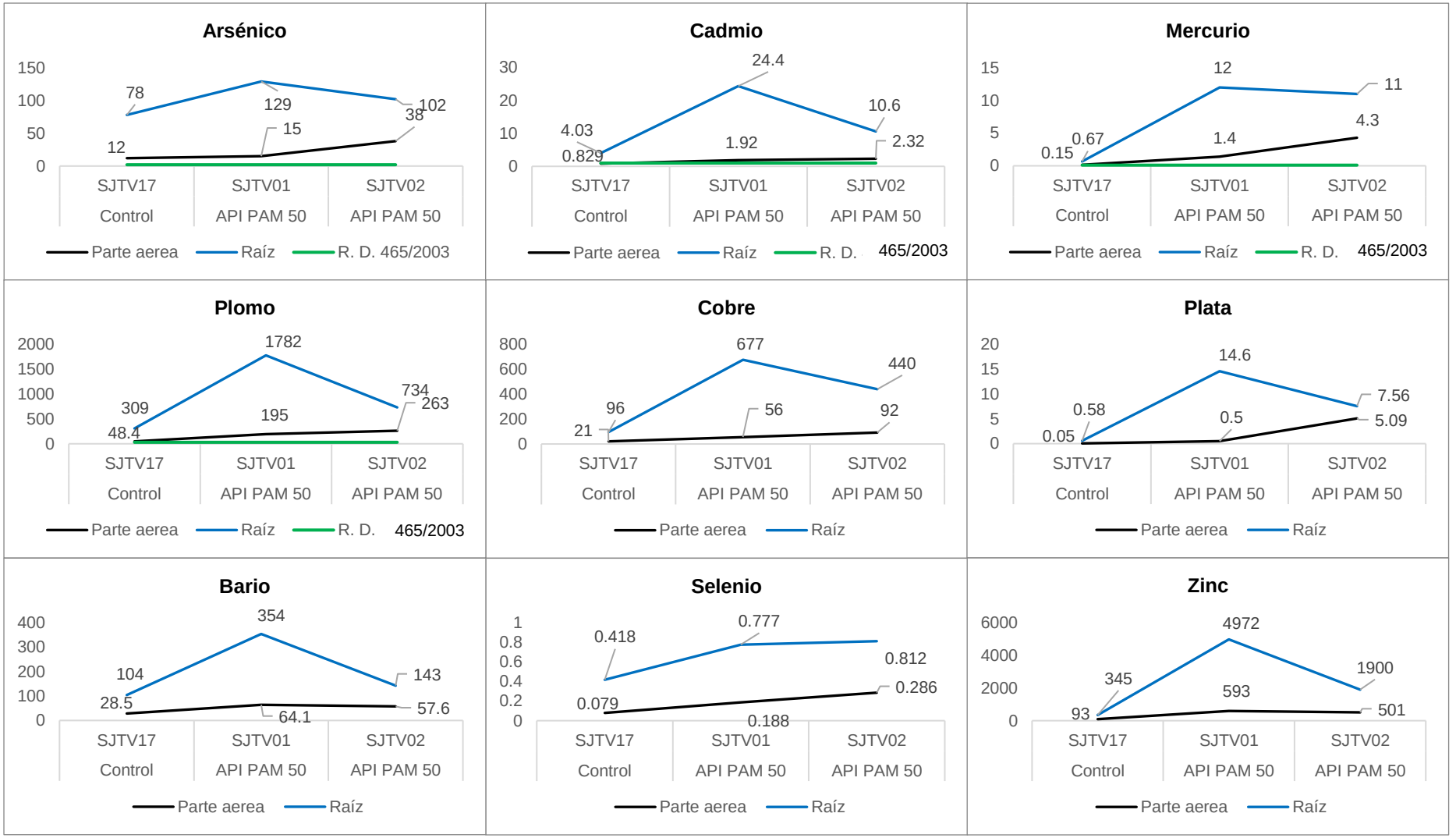


Figura 7.125. Concentración de metales obtenidos en *Festuca rigescens*

Riqueza y diversidad de anfibios

En el río San Juan y sus tributarios se registraron 2 especies de anfibios *Pleurodema marmoratum* y *Rhinella spinulosa* (Figura 7.126). La riqueza y diversidad hallada fue baja. No se lograron registrar 3 especies de anfibios, *Gastrotheca peruana* (Familia Hmemiphractidae), *Telmatobius macrostomus* y *Telmatobius brachydactylus* (ambas Familia Telmatobiidae), que se distribuyen en la sierra central del Perú y fueron registradas durante evaluaciones herpetológicas realizadas en localidades cercanas al área de estudio (Castillo Roque, 2017; Loza Del Carpio, 2017; Sinsch, 1986, 1988, 1990; Sinsch y Lehr, 2010; Watson *et al*., 2017).

El esfuerzo de muestreo fue óptimo, se evaluaron 30 transectos distribuidos en gran parte del recorrido del río San Juan, alcanzando una cobertura de muestreo del 100 %. La baja diversidad y abundancia de anfibios puede responder a la temporada de evaluación, así como a la perturbación y degradación de los hábitats evaluados o el estado de conservación de las especies. Las evaluaciones se realizaron en temporada seca (agosto y octubre 2020), cuando la detectabilidad de anfibios disminuye, debido a que las especies que habitan en la puna se refugian en madrigueras para evitar la desecación y estrés calórico (Pearson y Bradford, 1976). La abundancia de anfibios es mayor durante la temporada de lluvias entre diciembre y marzo, cuando emergen y aprovechan los cuerpos de agua para su reproducción (Sinsch, 1986). Siendo recomendable realizar evaluaciones en las 2 temporadas, como se indica en la guía de Inventario de la Fauna Silvestre del Minam (2015).

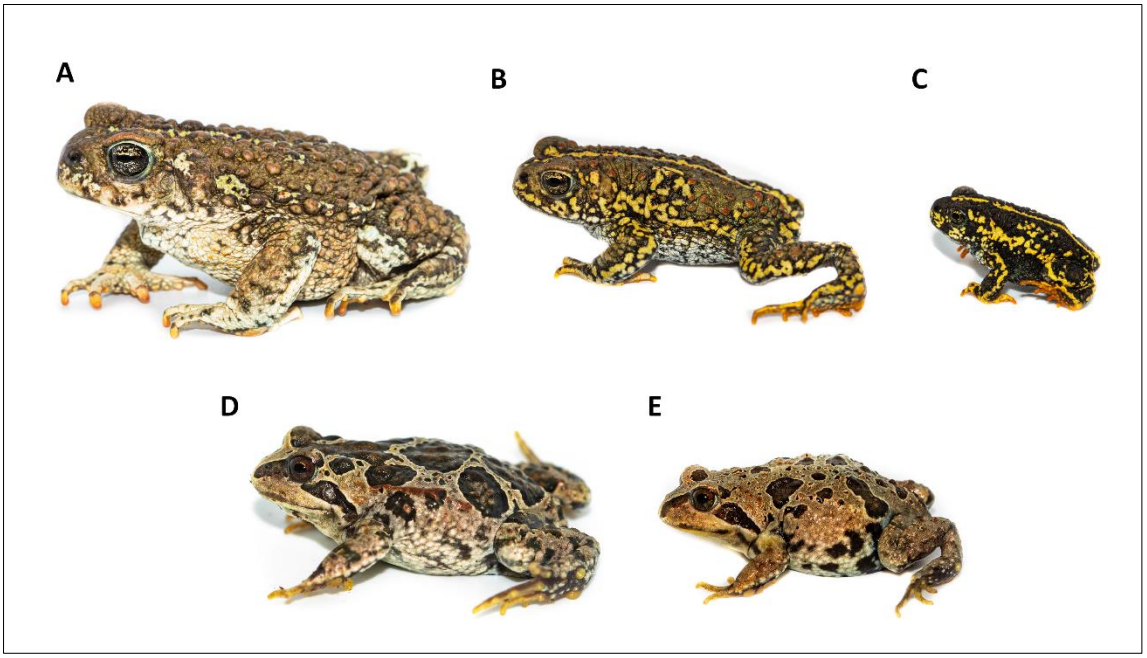


Figura 7.126. Especies de anfibios registrados en el río San Juan y la quebrada sin nombre Qsnom02: *Rhinella spinulosa* A) adulto, B) subadulto y C) juvenil, y *Pleurodema marmoratum* D) y E) adultos, con patrones de coloración distintos

Uno de los principales objetivos de la presente evaluación fue determinar la afectación de las actividades mineras sobre 2 especies acuáticas y semiacuáticas, las ranas *Telmatobius macrostomus* «Rana gigante de Junín» y *Telmatobius brachydactylus* «Wancha de Junín» que habitan en riachuelos y lagunas de la región comprendida entre Junín, Cerro de Pasco y el valle superior del río Mantaro (IUCN, 2020); sin embargo, durante esta evaluación no se halló ninguna. Estas especies tienen una reproducción continua a lo largo del año (Sinsch, 1986), por lo que la temporada de muestreo no parece ser una respuesta a su ausencia

durante esta evaluación. Por el contrario, podría responder a su estado actual de amenaza, ambas están categorizadas como especies En Peligro (EN) por la IUCN (2020) y por el Decreto Supremo N.° 004-2014-MINAGRI, debido a que en los últimos años la extensión de su distribución se ha reducido, han sido registradas en solo 2 o 5 localidades cercanas a la laguna Chinchaycocha en el departamento de Junín (Castillo, 2017; Loza Del Carpio, 2017; Watson *et a*l., 2017). La disminución de estas especies, al igual que otras especies de *Telmabius*, es producida la contaminación y degradación de sus hábitats, efectos del cambio climático, enfermedades infecciosas (quitridiomicosis y ranavirus), extracción de individuos como recurso alimenticio, así como la introducción de la trucha, que es una especie voraz (Angulo, 2008, UICN 2020).

En el departamento de Pasco, se tienen registros de la presencia de *Telmatobius macrostomus* en las lagunas, Huaroncocha, Alcacocha y Punrum, en esta última se reportaron hasta 54 individuos (Sinsch, 1995); sin embargo, en visitas posteriores no se halló ningun individuo (Arias, 2003); mas al sur, en el ámbito del delta Upamayo se lograron capturar 10 individuos adultos en época seca durante el 2008, cuyos tejidos fueron analizados para la detección de metales (Castillo, 2008). En la evaluacion realizada por OEFA, no se registró ningun individuo, pero se han identificado al menos 3 localidades en la cuenca del río San Juan, donde especies de *Telmatobius* han sido avistadas en el ultimo año, que corresponden a los puntos de muestreo ubicados en el río Huarampampa (AM-He-T30), en la desembocadura del río Quicay RQuic-1 (AM-He-T8) y en la laguna Alcacocha LAlca-02 (AM-He-T27). Lo que indica que, a pesar de la dismucion de sus poblaciones, estas ranas aún están presentes en la subcuenca San Juan, al menos en los tributarios que parecen tener una calidad ecológica entre *buena* y *moderada* según el índice de calidad ecológica (Tabla 6.27) y una calidad del agua *excelente* según el índice de calidad de agua ICARSH (Tabla 6.15).

Es recomendable que estas especies sean incluidas en los monitoreos biológicos, no solo por su categoría de amenaza, sino también porque pueden ser afectadas por la contaminación de metales, debido a la permeabilidad de su piel (Watson et al. 2017), como se discute más adelante. Estos monitoreos deben considerar en su implementación metodologías y protocolos enfocados a hábitats acuáticos, debido a que por su coloración críptica y elección de tipo de hábitat puede ser difícil registrarlos mediante búsquedas por encuentros visuales (VES).

Monitoreos ambientales en el delta Upamayo

Los únicos puntos donde se registraron anfibios fueron, la quebrada QSnom-02 (AM-He-T7) y el último tramo del río San Juan; en el punto SJ-33 (AM-He-T18) y los puntos SJ-35 (AM-He-T15) y SJua-20A (AM-He-T16) en el sector del PAM sedimentos delta Upamayo. En este último tramo el río San Juan presenta un cauce amplio con orillas bajas donde se forman cuerpos de agua y ambientes húmedos que parecen favorecer la presencia de los anfibios *Rhinella spinulosa* y *Pleurodema marmoratum*, especies que atraviesan por una fase larvaria acuática y una fase adulta terrestre.

En el ámbito del PAM sedimentos delta Upamayo, se realizó un estudio biológico en el marco del plan de cierre integral de los pasivos en el río San Juan y delta Upamayo[78]; evaluación que tuvo por objetivo «*registrar la flora silvestre, fauna silvestre y recursos hidrobiológicos»*, así como describir su composición y análisis comunitario. Sin embargo, solo estuvo enfocada en el grupo de las aves, principalmente aquellas asociadas a las áreas circunlacustres, registrando un total de 27 especies distribuidas en 11 familias. No se evaluó el grupo de los

[78] Estudio de Ingenieria de Detalle para ejecutar las Obras de Plan de Cierre Integral de los Pasivos “Depositos de Sedimentos en el río San Juan y delta Upamayo” – Pasco. Elaborado por Cesel S.A.

anfibios, por lo que no es posible determinar una afectación solo en base a estos datos. Por ello, en la presente evalución, además de hacer la identificación y caracterización de este grupo, se midió la acumulación de metales en tejido de los anuros registrados respecto a la presencia de los mismos metales en los sedimentos.

Recalcar que, los monitoreos y evaluaciones biológicas se realizan con la finalidad de determinar la eficacia de las medidas de mitigación sobre los posibles impactos producidos por las actividades de operación o en su defecto determinar la eficacia de los procesos de recuperación y restauración de los pasivos ambientales. Por ello, estos estudios deben incluir, además de las aves, otros grupos de fauna, para obtener una caracterización más completa e identificar especies que por sus características biológicas pueden ser afectadas por dichas actividades, constituyendo a la vez indicadores biológicos. Los anfibios constituyen buenos bioindicadores de la contaminación por metales, ya que presentan una piel semipermeable y atraviesan por ciclos de desarrollo en ecosistemas acuáticos y terrestres, siendo componentes importantes de las cadenas alimenticias (Alford y Richards, 1999; Correia *et al*., 2014).

Es recomendable que los monitoreos, contemplen la temporalidad (época seca y lluviosa) y determinen si el esfuerzo de muestreo fue adecuado (Minam, 2015). En el estudio realizado por CESEL S.A. no se cumplen estas recomendaciones, porque se evaluaron 5 estaciones y en cada una se realizó un transecto de 100 m; cuando en la guía se recomienda realizar un esfuerzo de muestreo mayor, mediante la evaluacion de 4 transectos de 1000 m (subdivididos en transectos de 100 m o 250 m) por unidad de vegetación, pudiendo realizar menor número de transecto en zonas pequeñas, para así poder registrar al menos el 50 % de la diversidad que pudiera albergar el área (Minam, 2015). Tampoco se consideró la temporalidad, no se indican las fechas de muestreo, pero se menciona que se realizó una sola entrada donde se registraron especies migratorias como *Anas discors* cuya abundancia podría responder a la estacionalidad y no necesariamente a una afectación debido a la presencia del PAM sedimentos del delta Upamayo.

Afectación de las poblaciones de anfibios por acumulación de metales en sedimento

En esta evaluación se reportaron la concentración y distribución de los metales y metaloides (Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, Pb, Se, Sr, V y Zn) en el tejido de los anfibios *Rhinella spinulosa* y *Pleurodema marmoratum* colectados en el cauce del río San Juan, en el sector PAM delta Upamayo (AM-He-15, AM-He-16A y AM-He-16), un punto ubicado a 4 km al norte de dicho PAM (AM-He-T18) y en uno de sus tributarios, la quebrada sin nombre QSnom-02 (AM-He-T17)[79].

El río San Juan nace en la laguna Alcacocha y en su recorrido recibe las aguas de varios aportantes, en la parte baja y media de la subcuenca se desarrollan las principales actividades económicas de la región; agricultura, ganadería y minera. La contaminación por metales en el medio ambiente se da principalmente debido a actividades antrópicas, aunque también se ha informado que fenómenos naturales como las erupciones volcánicas, el clima y los incendios forestales contribuyen a este tipo de contaminación (He *et al*., 2005; Tchounwou *et al*., 2012); no es el caso del área de estudio. Por el contrario, la contaminación ambiental por metales es bien conocida en áreas mineras y de otras operaciones industriales basadas en metales (Batayneh, 2012; Bradl, 2005). En el área de estudio se determinó la presencia de

[79] Entre paréntesis se indican los códigos de las muestras de tejidos colectados en transectos cercanos a los puntos de muestreo de sedimento.

pasivos ambientales de origen minero y no minero[80]. El río San Juan es uno de los principales aportantes del lago Chinchaycocha y a la vez una de las principales fuentes de contaminación debido al alto aporte de metales que arrastra. Rodbell *et al*. (2014), determinaron que las altas concentraciones de cobre, zinc y plomo registrados en los sedimentos del lago provienen principalmente de las actividades mineras que se desarrollan en la cuenca del río San Juan, porque el flujo promedio de estos metales presenta mayores tasas de entrada en las muestras mas cercanas a la confluencia entre el lago y el río San Juan.

Si bien los metales que naturalmente se encuentran en suelo y agua, son esenciales para el desarrollo de los seres vivos, cuando exceden ciertos rangos pueden ser tóxicos causando serios impactos en la flora y fauna (Singh *et al*., 2011). Los anfibios son particularmente susceptibles a la absorción de contaminantes, incluyendo metales (Hopkins y Rowe, 2010), acumulan dichos elementos directamente de su medio a través de la piel y la superficie oral, e indirectamente a través de la ingesta de alimento contaminado. Las especies analizadas en esta evaluacion, *Pleurodema marmoratum* y *Rhinella spinulosa*, son bifásicas, atraviesan por una fase larvaria acuática y una fase adulta terrestre. Los adultos son activos de noche y durante el día se encuentran ocultos en lugares húmedos al igual que los juveniles (Sinch 1986, 1988), estando en contacto directo con el agua, sedimentos y suelo de los hábitats que ocupan.

En todos los anfibios capturados se detectaron diferentes concentraciones de cada uno de los metales evaluados. Estas concentraciones, fueron similares a las detectadas en anfibios de otros lugares moderadamente contaminados, como en una zona de represamiento (Jofré *et al*., 2012), zonas adyacentes a una mina de oro (Intamat *et al*., 2016) y una zona agrícola (Loumbourdis y Wray, 1998). Pero fueron menores que las concentraciones cuantificadas en anfibios procedentes de lugares con una alta contaminación por metales; en minas de carbón (Snodgrass *et al*., 2003; Zocche *et al*., 2014) y cuerpos de agua contaminados por la extracción del gas y petróleo (Smalling *et al*., 2019).

Las concentraciones de Fe, Zn y Al fueron claramente superiores a las de Mn, Cu, Sr, Pb, Ba, As, Se, Cd, Hg, V, Cr y Ni, en todas las muestras de tejidos de anfibios, siendo el patrón de concentración el siguiente Fe > Zn > Al > Mn > Cu > Sr > Pb > Ba > As > Se > Cd > Hg > V > Cr > Ni > Li. Al determinar la relación de estas concentraciones entre cada una de las muestras, mediante un análisis de componentes principales (APC) se diferenciaron 2 cluster. Uno formado por las muestras registradas en los puntos del PAM sedimentos delta Upamayo (AM-He-T15, AM-He-T16A, AM-He-T16B), que son las que presentaron la mayor concentración de metales; y el segundo grupo conformado por las muestras de la quebrada QSnom-02 (AM-He-T7), y el punto AM-He-T18, ubicado en el río San Juan a 4 km aguas arriba del delta, que en general presentan menos concentraciones para todos los metales.

Enfocándonos solo en el río San Juan se determinó, que la concentración de metales de las muestras que se colectaron en el ámbito del PAM delta Upamayo superaron por mucho a las colectadas 4 km río arriba (SJ-33 / AM-He-T18), con concentraciones que son entre 50 % y 1220 % mayores, para cada uno de los metales. El manganeso, aluminio y arsénico fueron los elementos que mayores diferencias presentaron, con concentraciones 1220 %, 1057,92 % y 966,31 % mayores, respectivamente. Estos porcentajes se incrementaron al comparar las muestras del PAM delta Upamayo con las de la quebrada QSnom-02, cuyos porcentajes diferenciales para todos los elementos, varían entre 96,8 % y 34 544,5 %. Siendo el plomo el que mayores diferencias presentó (34544,5%.), acumulando concentraciones

[80] Informe N.° 013-2012-MEM-DGM/DTM/PAM, referido a la remediación de pasivos ambientales mineros (PAM) del Estudio de Plan de cierre integral de los PAM «depósito de sedimentos en el río San Juan» y «delta Upamayo y parte norte del lago Chinchaycocha», del 20 de enero de 2012.

mínimas en dicha quebrada (0,0423 mg/kg) y alcanzando valores de 5,957 mg/kg y 23,28 mg/kg en el delta Upamayo.

Similar ocurre cuando comparamos la concentración de metales en anfibios del delta obtenidos durante esta evaluacion, cuyos valores son mayores que los obtenidos por Castillo (2008), quien mediante espectrofotometría de absorción atómica y/o visible determinó la concentración de arsénico, cadmio, cobre, hierro, mercurio y plomo en tejidos de *Telmatobius macrostomus* (*Batrachophrynus macrostomus*) colectados en Upamayo, la cuenca principal del lago Chinchaycocha y la laguna Rucuscocha (Tabla 7.11). Al comparar cada uno de los elementos es notorio que el hierro es el que presenta mayor diferencia, con un valor promedio de 296,6 mg/kg es 10 veces mayor que el promedio de los valores hallados en las otras 3 localidades evaluadas por Castillo. El cobre y plomo también presentaron diferencias importantes, particularmente el plomo que casi ni fue detectado en las muestras del 2008. Finalmente, el ársenico y cadmio, presentan bajas concentraciones en las muestras colectadas por OEFA y por Castillo (2008).

Tabla 7.11. Comparación de la concentración de metales registrados en el Delta Upamayo por OEFA (2020) y en localidades del lago Chinchaycocha (Castillo 2008)

Parámetros	OEFA 2020	Castillo 2008		
	Delta Upamayo n = 3	Upamayo n = 3	Chinchaycocha n = 3	Rucuscocha n = 3
As	3,93 ± 1,78	0,01 ± 0,01	0,07 ± 0,12	0,02 ± 0,02
Cd	0,55 ± 0,16	0 ± 0,01	0,01 ± 0,02	0 ± 0
Cu	18,16 ± 11,79	5,48 ± 4,66	4,45 ± 3,69	8,87 ± 9,43
Fe	296,6 ± 86,02	28,16 ± 19,01	21,07 ± 11,14	19,22 ± 13,08
Hg	0,29 ± 0,14	0 ± 0	0,01 ± 0,02	0 ± 0
Pb	14,61 ± 8,66	0,01 ± 0,01	0,02 ± 0,03	0 ± 0

En base a estos resultados se puede inferir que existe una relación entre la acumulación de metales en tejido de anfibios y la concentración de metales en sedimentos; es decir los puntos de elevada concentración de metales en sedimento son también los transectos con elevada la concentración de metales en anfibios. Siendo esta correlación alta y significativa, para el arsénico, bario y plomo ($r = 0,95$, $p \leq 0,05$).

Los resultados de concentración de metales en sedimento muestran un orden relativo de concentración similar al de los anfibios, donde también el hierro, zinc y alumnio son los metales mas abundantes (Fe > Zn > Al > Pb > Mn > Cu > As > Ba > Sr > V > Cd > Cr > Li > Ni > Hg > Se). Y al igual que ocurre con los anfibios, los puntos de muestreo de sedimentos en el río San Juan presentaron mayores valores que los reportados en la quebrada QSnom-02. Es importante destacar que los puntos ubicados en el río San Juan (SJ-35, RSjua-20A, Rsjua-16) superaron los valores referenciales del PEL de la guía canadiense de sedimento (Tabla 6.17), indicando que las concentraciones halladas de arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo y zinc están asociadas a efectos biológicos adversos (MacDonald *et al*., 2000). Lo cual cual también se refleja en el índice de riesgo ecológico potencial, que en los 4 puntos en el río San Juan alcanza valores mayores a 600 indicando que son de «grave» riesgo ecológico potencial (Tabla 6.21).

La zona más afectada debido a la contaminación por metales fue el PAM del delta Upamayo, los anfibios de este sector acumularon una mayor concentración de metales, y lo sedimentos alcanzan un factor de contaminación «severo» y un valor de riesgo ecológico potencial «grave» (PER > 3244,04), particularmente en el punto RSJua-20A (PER_{total} = 5984,42). El

grado de riesgo ecológico potencial de los metales, en estos puntos, fue mayor para el cadmio (PER_{Cd} = 1223,42) y plomo (PER_{Pb} = 899,62).

La toxicidad de metales en anfibios puede producir efectos letales o subletales que incluyen una disminución en la tasa de crecimiento y en la fertilidad, mayor frecuencia de anomalías durante el desarrollo, mayor susceptibilidad a enfermedades, cambios de comportamiento, entre otros (Carvalho et al., 2017; Girotto et al., 2020; Guo et al., 2017; Hopkins & Rowe, 2010; Mardirosian et al., 2017; Ortiz-Ordoñez et al., 2016; Pollo et al., 2016).

Durante la evaluación no se encontraron individuos muertos, ninguna de las concentraciones de metales registradas en agua alcanzó niveles tóxicos para los anfibios; sin embargo, las altas concentraciones de metales en anfibios y en los sedimentos, indican que los anfibios podrían presentar efectos subletales, debido a una exposición crónica. El plomo fue el metal que se encontró en mayor concentración en tejidos (5.957 – 23.28 mg/kg) y sedimentos (1082 - 8441 mg/kg) en el delta Upamayo, respecto a otras localidades del lago Chinchaycocha (Castillo 2008) y otros sectores del río San Juan (Tabla 6.16). El plomo es un metal abundante en la corteza terrestre, sin embargo, en sedimentos se ha determinado que a partir de los 91,3 mg/kg[81] o 220 mg/kg[82] hay un probabilidad del 50% de que se produzcan efectos nocivos sobre la vida silvestre. En anfibios se determinó que el efecto subletal más evidente de sedimentos contaminados con plomo es el desarrollo de malformaciones en el sistema esquelético, que interfieren en la locomoción, disminuyendo la capacidad de alimentación y aumentando las probabilidades de depredación (Sparling et al. 2006). Estos efectos empiezan a ser evidentes a una concentración de 75 mg/kg en sedimentos, en que se observan deformidades en el fémur y dedos; mas aun, a una concentración mayor a 540 mg/kg de plomo se observan anomalías que afectan a todas las partes del sistema esquelético.

A pesar de la alta concentración de metales en las muestras de anfibios del río San Juan, el factor de bioacumulación para cada uno de los elementos evaluados fue bajo en comparación con los valores hallados en la quebrada QSnom-02 (Tabla 6.96). El selenio (0,286 mg/kg) y el estroncio (0,110 mg/kg) presentaron los mayores valores de bioacumulación en anfibios del río San Juan. Por el contrario, en la quebrada QSnom02 el mercurio fue el mental que presentó un valor mucho mayor (23,79 mg/kg) seguido del cobre (1,714 mg/kg). Estas diferencias se dan debido a que la bioacumulación individual de los metales depende del tiempo de exposición, características intrínsecas de los individuos evaluados y más aún de las propiedades y naturaleza química de los contaminantes (Rahman *et al*., 2012). Factores que pueden variar entre los cuerpos de agua como la concentración total, especiación de metales, mineralogía, potencial de hidrógeno, potencial redox, temperatura, entre otros, determinan la biodisponibilidad de los metales, por lo que es importante cubrir diferentes hábitats dentro del ecosistema a evaluar considerando a la vez diferentes especies.

Al igual que los metales, la concentración de cianuro fue mayor en las muestras colectadas en el ámbito del PAM delta Upamayo (8,694 mg CN/kg en promedio), siendo 153,79 % mayor que la concentración de la muestra colectada 4 km aguas arriba del delta (8,694 mg CN/kg) y 331,83 % mayor que la concentración registrada en la quebrada QSnom-02. Aunque en la subcuenca se han registrado algunos puntos de suelo adyacentes al río San Juan con concentraciones mínimas de cianuro libre (OEFA, 2015), es necesario

[81] Canadian Council of Ministers of the Environment (1999) Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Winnipeg
[82] ANZECC and ARMCANZ [Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, Agricultureand Resource Management Council of Australia and New Zealand] (2000) Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality. Volume 1, The guidelines. National water quality management strategy; no.4

aún determinar la fuente de contaminación de cianuro, especialmente en el ámbito del delta Upamayo.

8 CONCLUSIONES

Identificación de fuentes contaminantes

Los residuos mineros en 9 de los 51 PAM, de acuerdo a los ensayos de *shake flask* metales (son capaces de lixiviar Fe, Zn, Cu, Pb, As, Se, Cd y Ag), shake flask aniones (presentan sulfatos como anión dominante) y Dold (liberan S, Fe, Cu, Pb y Zn en las fases más susceptibles, soluble en agua e intercambiable); son fuentes contaminantes al suelo, no descartándose su influencia a los suelos de los sectores o zonas donde se reportan PAM, de acuerdo a la «Actualización de inventario inicial de pasivos ambientales mineros» del Minem. Ya que en esas zonas se encuentran actualmente utilizadas como depósitos de gravas, zona de cultivo de forraje (PAM-16), corral para ganado (PAM-33) o en algunos casos revegetados de manera natural.

Los sedimentos fluvio-aluviales mezclados con residuo minero que se encuentran en ambas márgenes del río Ragra entre el depósito de relaves Quiulacocha y el pie de la presa de releves Ocroyoc (área aproximada de 8800 m^2), son fuentes contaminantes, debido a que los resultados del test de ABA demuestran que son generadores de acidez, en el ensayo de *shake flask* metales lixiviaron Fe, Ca, Mg, Mn, Sr, Zn, Cu, Pb, As, Tl, Sb, Cd, Ag y Hg, en el ensayo de *shake flask* aniones lixiviaron sulfatos como anión dominante y en el ensayo de Dold se reportaron S, Ca, Cu, Fe, Pb y Zn en las fases más susceptibles (soluble en agua e intercambiable).

Río San Juan y tributarios

De acuerdo al contexto geológico, la litología de la subcuenca del río San Juan se encuentra dominada por rocas calcáreas (calizas y areniscas calcáreas) con la ocurrencia domos y rocas intrusivas que condicionan el origen de los yacimientos minerales. Dentro de este contexto, se encontró que son 4 los tributarios, del río San Juan, con aporte de metales sobre el nivel de referencia medio estimado en la evaluación para la subcuenca del río San Juan: el río Ragra, el río Culcalhuain, el río Huaraumpampa, la quebrada sin nombre 12; de los cuales solo la quebrada sin nombre 12 no tiene evidencia de actividad minera (colonial o actual).

El río Ragra el cual es una fuente de contaminación para el río San Juan, viene siendo afectado por las aguas residuales domésticas, sedimentos fluvio-aluviales mezclados con residuo minero dispuestos en ambos márgenes del río Ragra y actividades desarrolladas en la parte alta.

Las aguas del río Ragra, los depósitos de sedimentos en el río San Juan, descarga de aguas residual doméstica e industrial al entrar en contacto con el río San Juan influyen sobre los valores del Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales (ICARHS), disminuyendo su categoría de excelente (SJ-3) a pésima (RSjua-08); asimismo produce los cambios en la facies de bicarbonatada cálcica a sulfatada cálcica-magnésica; asi también el sedimento en el río San Juan, presentó un cambio en el riesgo ecológico potencial (PER) de «grado bajo» en SJ-3 (antes de la ex desembocadura del río Ragra) a «grave» en RSjua-08, evidenciandose una influencia sobre la diversidad y composición del perifiton con la presencia de especies tolerantes a metales y dando una clasificación de «pésima» para la calidad ecologica CERA-S mostrandose en la baja riqueza de especies de macroinvertebrados bentónicos.

Los puntos en el río San Juan, aguas abajo de RSjua-08, presentaron una mejora respecto a las categorías establecidas en el ICARHS de «regular» en los puntos RSjua-08A, SJ-17, RSjua-08C, SJ-18 (excepto en el punto SJ-17, que fue «malo»); sin embargo, cuando se evaluó el sedimento de este tramo, los puntos presentaron un riesgo ecológico potencial de «grave», debido a los aportes de sedimento del río Ragra (SJ-10) y el desplazamiento de los depósitos de sedimentos en el río San Juan (SJ-12) hacia la parte baja de este río, lo que se refleja en la influencia sobre la composición de especies del perifiton que se hace notoria con la prevalencia de la microalga *Stigeoclonium* sp. la que es tolerante a metales en este tramo; del mismo modo se observó una baja riqueza de macroinvertebrados bentónicos y una clasificación de «pésima» para la calidad ecológica CERA-S, a excepción del RSjua-08C y SJ-18 que obtuvieron una clasificación «mala».

El punto SJ-12 tuvo una clasificación de calidad de mala, de acuerdo al ICARHS, por la descarga del agua residual doméstica del centro poblado San Antonio de Rancas, con contenido alto en coliformes termotolerantes (170 000 NMP/ 100mL) el cual incumple los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de plantas de tratamientos de aguas residuales (PTAR) domésticas o municipales (Decreto Supremo N.° 003-2010-MINAM), por la descarga del agua residual industrial (sin procedencia identificada) con concentraciones altas de manganeso (3,2293 mg/L) y cobre (17,07 mg/L), donde este último incumple con lo establecido en los LMP para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero – metalúrgicas (Decreto Supremo N.° 010-2010-MINAM), los cuales produjeron el incremento de esos parámetros, superando los valores de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua 2017, categoría 3 riego de vegetales y bebida de animales en el punto de muestreo SJ-12.

Además, para ese mismo punto, en cuanto a la comunidad del perifiton si bien estuvo relacionada en mayor grado con los valores de arsénico, manganeso, cadmio, cobre y plomo del sedimento, en donde el cálculo de riesgo ecológico potencial fue de «grave», por presentar especies tolerantes a metales; también mostró un número de especies tolerantes a cargas orgánicas elevadas dentro de las *chlorophytas*. Por lo que, se evidenció una influencia a dicha comunidad por los metales presentes en el sedimento de este río.

Los puntos del tramo en el río San Juan, ubicado antes del aporte del río Tinragra (RSjua-09A) hasta el delta Upamayo (SJ-35) presentaron una categoría establecida en el ICARHS de «regular» y un riesgo ecológico potencial, calculado del sedimento, de «grave». El único parámetro (metal) que mantiene concentraciones en el agua superiores al valor establecido en los ECA para agua 2017, categoría 3, es el manganeso el cual proviene, en gran medida, del aporte que el río Ragra introduce al río San Juan. Esto se refleja en una clasificación de la calidad ecológica (CERA-S) entre «mala» y «moderada» (excepto en el RSjua-15, que fue «pésima») y una diversidad y composición de especies del perifiton diferente del resto de puntos y asociada a bajos valores de sulfatos, cloruros, fluoruros en agua, excepto en los puntos RSjua-12, RSjua-13 y RSjua-14 (ubicadas aguas abajo de la UM Colquijirca y entre los PAM relave San Gregorio y PAM relave colonial Puente San Juan) donde estos aniones presentaron mayores concentraciones del resto de puntos de este tramo.

En el río San Juan entre los puntos RSjua-16 y RSjua-17A se observa un incremento de plomo (de 427 mg/kg a 2522 mg/kg) y mercurio (de 5,48 mg/kg a 11,8 mg/kg), no se descarta el aporte de metales por escorrentía superficial del sitio contaminado API-DR y los residuos del PAM relave colonial Chaqueneoc (PAM-49), PAM relave colonial Chashajircan (PAM-54) en época de avenida; estos incrementos de plomo y mercurio afectan la diversidad y composición de especies de las comunidades de perifiton y macroinvertebrados bentónicos.

En relación a los sedimentos del río Huaraupampa tributario al río Gashan y este al río San Juan, entre los puntos RHuar-01 y RHuar-05, se observa un incremento en las

concentracciones de arsénico (de 22,6 mg/kg a 63,3 mg/kg), plomo (de 15,1 mg/kg a 364 mg/kg) y mercurio (<0,01 a 14,3), no se descarta el aporte de metales por escorrentía superficial del PAM relave colonial Planta Santa Rita y Lucero (PAM-32) en época de avenida, que presentó concentraciones de 1149 mg/kg de arsénico, 12373 mg/kg de plomo y 223 mg/kg mercurio, cuyo riesgo ecológico potencial varió de «grado bajo» en el punto RHuar-01 a «moderado» en el punto RHuar-05 y se refleja en la diferencia de la composición de especies del perifiton entre el punto RHuar-01 con respecto a los puntos aguas abajo del PAM mencionado.

En el ámbito del río San Juan y sus tributarios se registraron 2 especies de anfibios *Rhinella spinulosa* (Bufonidae) y *Pleurodema marmoratum* (Leptodactylidae). Las 2 presentaron abundancias similares y se registraron solo en la quebrada sin nombre (Qsnom-02) y en el último tramo del río San Juan, entre el delta Upamayo y el centro poblado Huayrabamba.

Los anfibios, colectados en la subcuenca del río San Juan y uno de sus tributarios, están expuestos y acumulan diferentes metales, provenientes de los sedimentos del cauce y las orillas de estos cuerpos de agua. Se observó una relación entre la concentración de la mayoría de los metales en anfibios y los hallados en sedimentos; decir los puntos de elevada concentración de metales en sedimento son también los transectos con elevada la concentración de metales en anfibios, siendo esta correlación alta y significativa, para el arsénico, bario y plomo. Los metales que presentaron mayor concentración en anfibios fueron el hierro, zinc y aluminio; al igual que en los sedimentos donde además destacaron el plomo y manganeso.

La zona de mayor de afectación fue el ámbito del PAM Delta Upamayo (AM-He-T15, AM-He-T16), donde la concentración de metales en anfibios fue mucho mayor en comparación con los otros dos puntos evaluados (AM-He-T17 y AM-He-T18). El aluminio, arsénico, manganeso y plomo fueron los elementos, que tuvieron mayor diferencia porcentual. Este patrón es similar a lo hallado para la concentración de metales en sedimentos cuyos valores además de ser altos en comparación con otros sectores del río San Juan, exceden los valores referenciales PEL de la de la Guía de calidad ambiental canadiense para sedimento- CEQG, calificando como de «grave» riesgo ecológico potencial.

No se detectaron concentraciones en metales que pudieran causar efectos tóxicos directos en los anfibios; sin embargo, la alta concentración hallada en el sedimento puede ocasionar efectos subletales debido a una exposición crónica. Se identificó el plomo como un contaminante importante ya que las concentraciones en sedimentos del delta Upamayo son mucho mayores a las detectadas en localidades cercanas; y también porque su concentración en los tejidos de anfibios analizadas este año (5,957 – 23,28 mg/kg) se incrementaron respecto a muestras de *Telmatobius macrostomus* analizadas en el 2008, cuando el plomo se presentó en concentraciones casi imperceptibles (0 – 0,042 mg/kg) en la localidad de Upamayo. Los valores de sedimento en el delta Upamayo (1082 – 8441 mg/kg) sobrepasan por mucho el nivel de 540 mg/kg de plomo en sedimento, a partir del cual los anfibios empiezan a presentar malformaciones que afectan todas las partes del sistema esquelético, disminuyendo sus probabilidades de persistencia.

Sitios contaminados

Se identificó 6 sitios contaminados, de los cuales 1 está asociado a los sedimentos del río San Juan (API DR), 3 asociados a los pasivos ambientales mineros (API PAM 20, API PAM 22 y API PAM 50), 1 que no está asociado a una fuente (API MF) y 1 que está asociado a los depósitos de sedimentos del río San Juan, el PAM relave colonial CM Aurífera Aurex S.A. y el PAM Residuos Coloniales (API PRS).

a) API PRS

Sector 1. Se identificó suelos contaminados por aporte del arrastre y la acumulación de los sedimentos depositados en el río San Juan y exdesembocadura del río Ragra, el sitio presentó concentraciones de arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo, que superaron los valores establecidos en los ECA para Suelo 2017, de uso agrícola, en arsénico, mercurio y plomo en todos puntos, cadmio en 18 de 19 puntos, bario en 3 de 19 puntos y al valor de nivel de fondo, el plomo en todos los puntos, arsénico y mercurio en 17 de 19 puntos, por lo que se considera un sitio contaminado; no se descarta la movilidad al río San Juan por escorrentía superficial en época de avenida.

Sector 2. Se identificó suelos contaminados, debido a la acumulación de metales provenientes del sector donde se ubicaron los PAM C.M. Aurífera Aurex S.A. y Residuos Coloniales (ambos inventariados por el Minem), el sitio presentó concentraciones de arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo que superaron los valores establecidos en los ECA para Suelo 2017, de uso agrícola, en arsénico, mercurio y plomo en todos los puntos y cadmio en 5 de 6 puntos en suelos muestreados a nivel superficial (0-15 cm); mientras que arsénico, mercurio, cadmio y plomo en todos los puntos, bario en 2 de 6 puntos en suelos muestreado en profundidad (15-30 cm). Asimismo, al comparar con los valores de nivel de fondo los suelos muestreados a nivel superficial superaron en arsénico, mercurio y plomo en 5 de 6 puntos y los suelos muestreados en profundidad el arsénico y plomo en todos los puntos y mercurio en 5 de 6 puntos, por lo que se considera un sitio contaminado, no se descarta la movilidad de dichos metales al río San Juan por escorrentía superficial en época de avenida.

Las muestras de tejido vegetal de *Dactylis glomerata* «pasto ovillo», presentan una clara diferencia en las concentraciones de metales obtenidas en el API PRS y la zona control; siendo mucho mayor en el API, principalmente en los metales mercurio y plomo. Además, todas las muestras de *Dactylis glomerata* colectadas en el API PRS superaron, de manera referencial, el contenido máximo de los metales arsénico, cadmio, mercurio y plomo establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal).

b) API DR

El desborde del río San Juan producto de los eventos estacionales extraordinarios generó que los sedimentos que arrastra el río fueran depositados en el API DR, donde se encontró sitios con acumulación de material de arrastre de los sedimentos del río San Juan y sitios con cobertura vegetal. El API presentó concentraciones de arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo que superaron los valores establecidos en los ECA para Suelo 2017, de uso agrícola, en arsénico, plomo y cadmio en todos los puntos, mercurio en 28 de 30 puntos y bario en 20 de 30 puntos y al valor de nivel de fondo en arsénico y plomo en todos los puntos, por lo que se considera un sitio contaminado; no se descarta la movilidad de dichos metales al río San Juan por escorrentía superficial en época de avenida.

Las muestras de tejido vegetal de *Festuca rigescens* «chillihua» y *Azorella diapensioides* «pampa yareta», presentan una clara diferencia en las concentraciones de metales obtenidas en el API DR y la zona control; siendo mucho mayor en el API, principalmente en los metales plata, mercurio y plomo para *A. diapensioides*, y plomo, arsénico y bario para *F. rigescens*. Además, todas las muestras de ambas especies colectadas en el API DR superaron, de manera referencial, el contenido máximo de los metales arsénico, cadmio, mercurio y plomo establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal).

c) API PAM 20

Se identificó suelos contaminados en el sector donde se ubicaba los residuos del PAM relave colonial Tauro 6, que presentó concentraciones de arsénico, cadmio, mercurio y plomo que superaron los valores establecidos en los ECA para suelo 2017, uso agrícola, en arsénico y plomo en todos los puntos, mercurio en 5 de 6 puntos, cadmio en 3 de 6 puntos y a los valores de nivel de fondo en arsénico y plomo en 5 de 6 puntos, por lo que se considera un sitio contaminado; no se descarta la movilidad de dichos metales al río San Juan por escorrentía superficial en época de avenida.

Las muestras de tejido vegetal de *Festuca rigescens* «chillihua», no presentan una clara diferencia en las concentraciones de metales obtenidas entre el API PAM 20 (zona con vegetación) y la zona control. Sin embargo, las muestras de tejido vegetal colectadas en el API superaron, de manera referencial, el contenido máximo de los metales arsénico y mercurio establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal).

d) API MF

Se identificó suelos contaminados, cuyo origen no ha sido identificado en la presente evaluación, que registraron concentraciones de arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo las cuales superaron los valores establecidos en los ECA para suelo 2017, uso agrícola, en arsénico, cadmio y mercurio en todos los puntos, bario en 1 de 12 puntos y plomo en 11 de 12 puntos y a los valores de nivel de fondo en arsénico en todos los puntos y plomo en 9 de 12 puntos, por lo que se considera un sitio contaminado; no se descarta la movilidad de dichos metales al río San Juan por escorrentía superficial en época de avenida.

e) API PAM 22

Se identificó suelos contaminados en el sector donde se ubicaba los residuos del PAM relave colonial Canal Rancas, que presentó concentraciones de arsénico, cadmio, mercurio y plomo que superaron los valores establecidos en los ECA para suelo 2017, uso agrícola, en arsénico, cadmio, mercurio y plomo en 3 de 5 puntos, y a los valores de nivel de fondo en arsénico y plomo en 3 de 5 puntos, por lo que se considera un sitio contaminado; no se descarta la movilidad de dichos metales al río San Juan por escorrentía superficial en época de avenida.

Las muestras de tejido vegetal de *Plantago tubulosa* y *Festuca rigescens* «chillihua», no presentaron una clara diferencia en las concentraciones de metales obtenidas entre el API PAM 22 (zona con vegetación) y la zona control. Sin embargo, las muestras de tejido vegetal colectadas en el API superaron, de manera referencial, el contenido máximo de los metales arsénico, mercurio y plomo establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal) en *P. tubulosa*, y arsénico y mercurio en *F. rigescens*.

d) API PAM 50

Se identificó suelos contaminados en el sector donde se ubicaba los residuos del PAM relave colonial Chaquiniyo, que presentaron concentraciones de arsénico, bario, cadmio, mercurio y plomo que superaron los valores establecidos en los ECA para suelo 2017, uso agrícola, en arsénico y plomo en todos los puntos, mercurio y cadmio en 7 de 8 puntos y bario en 6 de 8 puntos, y a los valores de nivel de fondo en arsénico y plomo en todos los puntos, por lo que se considera un sitio contaminado; no se descarta la movilidad de dichos metales al río San Juan por escorrentía superficial en época de avenida.

Las muestras de tejido vegetal de *Festuca rigescens* «chillihua», presentaron una clara diferencia en las concentraciones de metales obtenidas en el API PAM 50 y la zona control; siendo mucho mayor en el API, principalmente en los metales mercurio y plata. Además, todas las muestras de *Festuca rigescens* colectadas en el API superaron, de manera referencial, el

contenido máximo de los metales arsénico, cadmio, mercurio y plomo establecidos en el Real Decreto 465/2003 (sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal).

9 RECOMENDACIÓNES

- Actualización del plan de cierre, debido a que no se pudo comparar la diversidad hallada con estudios previos debido a que la evaluación de fauna realizada en el marco del «Plan de Cierre Integral de los Pasivos Ambientales de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo», estuvo enfocada solo en el grupo de las aves. Dicha evaluación no consideró la temporalidad ni medida del esfuerzo de muestreo, acciones recomendadas en la guía de inventario de fauna silvestre del MINAM.

- Aprobar el informe de la Evaluación ambiental de causalidad en el área de influencia de los pasivos de origen minero en el río San Juan y delta Upamayo, en el 2020; en vista que cuenta con el sustento técnico requerido.

- Remitir a la Dirección de Supervisión Ambiental en Energía y Minas para los fines que se estimen convenientes.

10 ANEXOS

Anexo 1:	**REPORTES DE CAMPO**
Anexo 1.1:	RC-034-2020-STEC (agua, sedimento, hidrobiología, roca y residuos mineros)
Anexo 1.2:	RC-036-2020-STEC (reptiles y anfibios)
Anexo 1.3:	RC-048-2020-STEC (suelo, roca y residuos mineros)
Anexo 1.4:	RC-053-2020-STEC (flora y fauna)
Anexo 1.5:	RC-063-2020-STEC (levantamiento fotogramétrico)
Anexo 2:	**REPORTE DE RESULTADOS**
Anexo 2.1:	RRE-035-2020-STEC
Anexo 2.2:	RRE-043-2020-STEC
Anexo 3:	**FOTOS Y VIDEOS** (Se presentan en CD)
Anexo 4:	**CÁLCULOS ESTADÍSTICOS**
Anexo 4.1:	Agua
Anexo 4.2:	Hidrobiología
Anexo 4.3:	Geoquímica de roca – fondo geoquímico
Anexo 4.4:	Suelo – nivel de fondo
Anexo 5:	**SISTEMATIZACIÓN DE RESULTADOS DE INFORME DE ANA**
Anexo 6:	**CONTROL DE CALIDAD DE FRASCOS**

11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A

Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernandez, E., Cruz-Sanchez, M., Cruz-Chavez, E. 2004. Terra Latinoamericana. 22 (4), 485-497.

Alford, R. A., & Richards, S. J. (1999). Global Amphibian Declines: A Problem in Applied Ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *30* (1), 133–165. https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.30.1.133

AmphibiaWeb. (2018). *AmphibiaWeb,* University of California, Berkeley, CA, USA. [07 de febrero de 2018]. Recuperado de: https://amphibiaweb.org

Angulo, A. (2008). Conservation needs of Batrachophrynus and Telmatobius frogs of the andes of Peru. *Conservation and Society*, *6*(4), 328–333. https://doi.org/10.4103/0972-4923.49196

B

Batayneh, A. T. (2012). Toxic (aluminum, beryllium, boron, chromium and zinc) in groundwater: Health risk assessment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *9*(1), 153–162. https://doi.org/10.1007/s13762-011-0009-3

Bradl, H. (2005). *Heavy Metals in the Environment: Origin, Interaction and Remediation, Volume 6 - 1st Edition* (H. Bradl, Ed.; 3rd ed.).

C

Canadian Council of Ministers of the Environment (2018). Canadian Environmental Quality Guidelines. Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human of use Agricultural o Industrial (Valores guía de calidad ambiental de Canadá para la protección del medio ambiente y salud humana de uso agrícola).

Castillo, H. (2008). Influencia antropogénica minera sobre la especie endémica Batracophrynus macrostomus Peters, 1873 en peligro de extinción del lago Chinchaycocha (Pasco, Juín). (Tesis de doctoral). Universidad Nacional de Trujillo, Escuela de Post Grado, Programa Doctoral en Ciencias Biológicas.

Cattaneo, A., Couillard, Y., Wunsam, S., & Courcelles, M. (2004). Diatom taxonomic and morphological changes as indicators of metal pollution and recovery in Lac Dufault (Québec, Canada). Journal of Paleolimnology, 32(2), 163–175. https://doi.org/10.1023/B:JOPL.0000029430.78278.a5

Chocano, L. 2005. Las zonas alto andinas peruanas y su ictiofauna endémica. Revista virtual de la Universidad Autónoma de México. 6(8), art. 82.

Cuizano, N., Reyes, U., Dominguez, S., Llanos, B., Navarro, A. 2009. Relevancia del pH en la adsorción de iones metálicos mediante algas pardas. Revista sociedad química Perú. 76 82), 126-130.

Custodio, E. & Llamas, M. R. (1976). Hidrología Subterránea. 2a ed. Barcelona. Editorial Omega.

Castillo, F. E. (2019). Determinación de las capacidades de carga animal de los pastos naturales en la quebrada Shallap – Parque Nacional Huascarán – Huaraz – Ancash (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz, Anchash, Perú.

Cerrate, E. (1969). Manera de preparar Plantas para el Herbario. Museo de Historia Natural, Serie de Divulgación, N°1. 10 pp.

Carvalho, C. S., Utsunomiya, H. S. M., Pasquoto, T., Lima, R., Costa, M. J., & Fernandes, M. N. (2017). Blood cell responses and metallothionein in the liver, kidney and muscles of bullfrog tadpoles, Lithobates catesbeianus, following exposure to different metals. *Environmental Pollution*, *221*, 445–452. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.012

Castillo Roque, Luis. (2017). *Preferencia de microhábitat del renacuajo de Telmatobius macrostomus (Peters 1873) "rana gigante de Junín" en los afluentes del lago Chinchaycocha, Junín, Perú*.

Castillo, Luis, & Aguilar, César. (2019). Descripción del renacuajo de Telmatobius brachydactylus (Anura: Telmatobiidae). *Revista Peruana de Biología*, *26*(4), 469-474. https://dx.doi.org/10.15381/rpb.v26i4.16777

Chagas, B. R. C., Utsunomiya, H. S. M., Fernandes, M. N., & Carvalho, C. S. (2020). Metabolic responses in bullfrog, Lithobates catesbeianus after exposure to zinc, copper and cadmium. In *Comparative Biochemistry and Physiology Part - C: Toxicology and Pharmacology* (Vol. 233). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2020.108768

Chao A, Chiu CH, Jost L. (2014). Unifying species diversity, phylogenetic diversity, functional diversity, and related similarity and differentiation measures through Hill numbers. Ann Rev Ecol Evol Syst 45:297–324. doi:10.1146/annurev-ecolsys- 120213-091540.

Correia, L. O., Siqueira Júnior, S., Carneiro, P. L. S., & Bezerra, M. A. (2014). Evaluation of the use of leptodactylus ocellatus (anura: Leptodactylidae) frog tissues as bioindicator of metal contamination in contas river, northeastern Brazil. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, *86*(4), 1549–1561. https://doi.org/10.1590/0001-3765201420130357

Convención Internacional sobre el Comercio de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (Cites). (2017). *Convención Internacional sobre el Comercio de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres. Apéndices I, II y III*. Recuperado en: http://www.cites.org/esp/app/appendices.shtml/ (Acceso 6 de junio 2018).

Crump, M.L. & N.J. Scott. 1994. Visual Encounter Surveys. En: W.M. Heyer, A. Donnelly, R.A. McDiarmid, L.C. Hayec & M.C. Foster (eds). Measuring and Monitoring Biological Diversity. Standard Method for Amphibians. Smithsonian Institution Press, Washington, D.C. 364p

D

Digesa, 2008. Digesa «Río San Juan-Mantaro y Afluentes» 2008 pp1.

Domínguez, E. & Fernández, H. (2009). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: Sistemática y biología. 1era edición. Tucumán, Argentina. Fundación Miguel Lillo.

Durand. M. J. (2014). Comportamiento productivo de alfalfa (Medicago sativa L.) en cultivo puro y asociado con gramineas forrajeras en el CIP – Camacani. (Tesis de grado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

Dodd, C.K.J. (2010) Amphibian Ecology and Conservation: A Handbook of Techniques, Oxford University Press. C. Kenneth Dodd Jr., Oxford

F

Farnham, I.M., Johannesson, K.H., Singh, A.K., Hodge, V.F., Stetzenbach, K.J., 2003. Factor analytical approaches for evaluating groundwater traceelement chemistry data. Anal. Chim. Acta 490, 123–138.

Flores, A. (1992). Las Praderas Nativas del Perú" En Florez, Malpartida y San Martín Manual de Forrajes para Zonas Áridas y Semiaridas Andinas. Lima. Red de Rumiantes Menores. pp 55-124

Flores, C. (2001). Composición florística en bofedales de Puna húmeda y Puna seca del departamento de Puno. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

Frost, Darrel R. (2018). Amphibian Species of the World: an Online Reference. Vers. 6.0. American Museum of Natural History, New York, USA [7 de agosto 2018]. Recuperado de: http://research.amnh.org/herpetology/amphibia/index.html.

Ferreyra, R. (1946). A revision of the Peruvian species of Monnina (Polygalaceae).

Frost, Darrel R. (2020). *Amphibian Species of the World: Referencia en linea*. Vers. 6.1. American Museum of Natural History, New York, USA. [20 de noviembre 2020]. Recuperado de: http://research.amnh.org/herpetology/amphibia/index.html. doi.org/10.5531/db.vz.0001

G

Galán, E. & Romero, A (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía (Macla)

Guo, Weihua, Liu, Xianbin, Liu, Zhanguang, Li, Guofeng, 2010. Pollution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the sediments around Dongjiang Harbor, Tianjin. Procedia Environ. Sci. 2, 729–736, doi: 10.1016/j.proenv.2010.10.084.

Gou, X., Li, Y., Wang, G., 2007. Heavy metal concentrations and correlations in rain-fed farm soils of Sifangwu Village, Central Gansu Province, China. Land Degrad. Dev. 18 (1), 77–88.

G. Suresh, P.Sutharsan, V.Ramasamy, R.Venkatachalapathy, (2012). Evaluación de la distribución espacial y el riesgo ecológico potencial de los metales pesados en relación con el contenido granulométrico de Veranam sedimentos del lago, India. Ecotoxicology and Environmental Safety 84, 117–124, doi: 10.1016/j.ecoenv.2012.06.027

Gunamani, T., Gurusamy, R. & Swamynathan, K. (1991). Efecto de la contaminación por polvo en los apéndices dérmicos y la anatomía de las hojas en algunas plantas herbáceas. J Swamy Boli Club; 8 (3–4): 79–85.

Girotto, L., Espíndola, E. L. G., Gebara, R. C., & Freitas, J. S. (2020). Acute and Chronic Effects on Tadpoles (Lithobates catesbeianus) Exposed to Mining Tailings from the Dam Rupture in Mariana, MG (Brazil). *Water, Air, and Soil Pollution*, *231*(7). https://doi.org/10.1007/s11270-020-04691-y

Guo, R., Zhang, W., Ai, S., Ren, L., & Zhang, Y. (2017). Fluctuating asymmetry rather than oxidative stress in Bufo raddei can be an accurate indicator of environmental pollution induced by heavy metals. *Environmental Monitoring and Assessment*, *189*(6). https://doi.org/10.1007/s10661-017-5991-6

H

Hakanson, 1979. Un índice de riesgo ecológico para el control de la contaminación acuática. un enfoque sedimentológico. Water Research Vol. 14, pp 975-1001, doi: https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8.

He, Z. L., Yang, X. E., & Stoffella, P. J. (2005). Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. In *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* (Vol. 19, Issues 2–3, pp. 125–140). Elsevier GmbH. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.02.010

Hill, M. O. 1973. Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. Ecology 54:427–432.

Hidalgo, M. & Chocano, L. 2016. *Orestias empyraeus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: e.T49829862A53817528.https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.20161.RLTS.T49829862A53817528.en. Downloaded on 27 December 2020.

Hopkins, W., & Rowe, C. (2010). Interdisciplinary and Hierarchical Approaches for Studying the Effects of Metals and Metalloids on Amphibians. *Ecotoxicology of Amphibians and Reptiles, Second Edition*, *20*(7), 325–336. https://doi.org/10.1201/ebk1420064162-c11

I

Instituto Nacional de estadística e informática (INEI). Censo Nacional 2017. Instituto Nacional de Estadística e Informática-INEI (2017). Censos Nacionales 2017. [en línea]. [Fecha de acceso 10 de agosto de 2020]. URL disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1572/

Instituto Nacional de Innovación Agraria – INNIA (2013). Manejo y utilización de praderas naturales en la zona altoandina. Serie Manual Nº 1 – 13. Lima, Perú. J. Arnold Arbor. 27(2): 123-167.

International Union for Conservation of Nature (IUCN). (2019). The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2019.1. http://www.iucnredlist.org

Intamat, S., Phoonaploy, U., Sriuttha, M., Tengjaroenkul, B., & Neeratanaphan, L. (2016). Heavy metal accumulation in aquatic animals around the gold mine area of Loei province, Thailand. *Human and Ecological Risk Assessment*, *22*(6), 1418–1432. https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1187062

IUCN (2020). *The IUCN Red List of Threatened Species* vers. 2020-2 [20 de noviembre del 2020]. Recuperado de: http://www.iucnredlist.org

IUCN 2020. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2020-3. https://www.iucnredlist.org. Downloaded on [01 December 2020].

J

Jara. L. L. (2017). Influencia de la actividad minera en la flora y vegetación del hábitat de un bofedal hidromórfico altoandino - Potoni - San Antonio de Putina 2013. (Tesis de maestría) Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú

Jiménez, R. (2017). Introducción a la contaminación de suelos, Madrid: Mundi – Prensa.

Jofré, M. B., Antón, R. I., & Caviedes-Vidal, E. (2012). Lead and cadmium accumulation in anuran amphibians of a permanent water body in arid Midwestern Argentina. *Environmental Science and Pollution Research*, *19*(7), 2889–2897. https://doi.org/10.1007/s11356-012-0795-2

Jost, L. (2007). *Partitioning diversity into independent alpha and beta components*. Ecology 88:2427–2439.

Jost, L., A. Chao, and R. L. Chazdon. (2011). *Compositional similarity and b (beta) diversity.* Pp. 66–84 in A. E. Magurran and B. J. McGill, eds. Biological diversity: frontiers in measurement and assessment. Oxford Univ. Press, Oxford, U.K

Juan Manuel Trujillo-González. Marco Aurelio Torres-Mora, 2018. Raimundo Jiménez-Ballesta. Jin Zhang. Variación espacial dependiente del uso de la tierra y riesgo de exposición de metales pesados en sedimentos depositados en carreteras en Villavicencio, Colombia. Variación espacial dependiente del uso de la tierra y riesgo de exposición de metales pesados en sedimentos depositados en carreteras en Villavicencio, Colombia. Environ Geochem Health (2019) 41:667–679, doi: https://doi.org/10.1007/s10653-018-0160-6(0123456789.

L

León, A. Y. (2016). Reserva de carbono en bofedales y su relación con la florística y condición del pastizal. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú.

López. E. (2019). Comportamiento agronómico y composición nutricional de diez variedades de pastos mejorados bajo condiciones agroclimáticas del distrito Sonche, región Amazonas. (Tesis de grado). Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Chachapoyas, Perú.

Lehr, E. 2005. The *Telmatobius* and *Batrachophrynus* species of Peru. In: *Estudios sobre las Ranas Andinas de los Generos Telmatobius y Batrachophrynus (Anura: Leptodactylidae)* (eds. Lavilla, E.O. and I. De la Riva). Pp. 39-64. Valencia: Asociación Herpetológica Espanola, Monografías de Herpetología 7.

Loumbourdis, N. S., & Wray, D. (1998). Heavy-metal concentration in the frog Rana ridibunda from a small river of Macedonia, Northern Greece. *Environment International*, *24*(4), 427–431. https://doi.org/10.1016/S0160-4120(98)00021-X

Loza Del Carpio, A. (2017). Evaluación poblacional y estado de conservación de Telmatobius macrostomus Peters, 1873 (Anura: Telmatobiidae) en humedales altoandinos, Región Pasco-Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, *19*(2), 145–156. https://doi.org/10.18271/ria.2017.273

M

Macbride, J. F. 1936-1954. Flora del Perú. Chicago: Publ. Field Museum Natural History. Bot. Ser.

Macuri. J. C. (2017). Evaluación de tres métodos para estimar la capacidad de carga en vicuñas. (Tesis de grado). Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú.

MacDonald, D. D., Ingersoll, C. G., & Berger, T. A. (2000). Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of*

Environmental Contamination and Toxicology, *39*(1), 20–31. https://doi.org/10.1007/s002440010075

Magurran, A. E. (1988). *Ecological diversity and its measurement*. Princeton University Press, New Jersey.

Mardirosian, M., Bieczynski, F., Luquet, C., Pérez, C. A., Bongiovanni, G., Lascano, C., & Venturino, A. (2017). Arsenic absorption and excretion in chronically exposed developing toad Rhinella arenarum. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, *52*, 255–261. https://doi.org/10.1016/j.etap.2017.04.014

Maldonado-Fonkén, M. S. (2010). Comportamiento de la vegetación de bofedales influenciados por actividades antrópicas (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

Maldonado-Fonkén, M. S. (2014). An introduction to the bofedales of the Peruvian High Andes. 13.

Magesh, N.S., Chandrasekar, N., Elango L. 2017. Trace element concentrations in the groundwater of the Tamiraparani river basin, South India: Insights from human health risk and multivariate statistical techniques. Chemosphere. 185 (1), 468-479

McKenna, J. E. 2003. An enhanced cluster analysis program with bootstrap significance testing for ecological community analysis. Environ. Model. Software., 18: 205-220

Matis, K. A., D. Zamboulis, A. I. Zouboulis y N. K. Lazaridis. (1999). «Goethite Mineral as a Sorbent for Heavy Metal Ions». En Natural Microporous Materials in Environmental Technology, editado por P. Misaelides, F. Macášek, T. J. Pinnavaia, y C. Colella, 425-33. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4499-5_32

Ministerio del Ambiente (2014). Guía de muestreo de suelos. Perú

Ministerio de Agricultura y Riego – MINAGRI (2019). Protocolo de muestreo para la determinación de niveles de cadmio en suelos, hojas, agua, y granos de cacao.

Ministerio de la Presidencia – Gobierno de España (2003). Real Decreto 465/2003, de 25 de abril, sobre las sustancias indeseables en la alimentación animal. Boletín Oficial del Estado núm. 102.

Ministerio del Ambiente – MINAM. (2015). Guía de inventario de la flora y vegetación.

Ministerio del Ambiente – MINAM (2015). *Guía de inventario de Fauna Silvestre.* Ministerio del Ambiente, Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural – Lima. 83 pp.

Molau U. (1990). The genus Bartsia (Scrophulariaceae-Rhinanthoideae). Opera Bot. 102, p 1-99.

Mostacedo, B. y Fredericksen, T. S. (2000). Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR). Santa Cruz-Bolivia, Ed. El País. 87 pp.

Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la Biodiversidad*. 1era Edición. Manuales y Tesis. Editado por CYTED (Programa Iberoamericano de ciencia y Tecnología para el Desarrollo). Volumen 1: 83 pp.

O

Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura - FAO (2009). Guía para la descripción de suelos, Organización de las naciones unidas para la Alimentación y la Agricultura. Mexico. 53 p.

Ortiz-Ordoñez, E., López-López, E., Sedeño-Díaz, J. E., Uría, E., Morales, I. A., Pérez, M. E., & Shibayama, M. (2016). Liver histological changes and lipid peroxidation in the amphibian Ambystoma mexicanum induced by sediment elutriates from the Lake Xochimilco. *Journal of Environmental Sciences (China)*, *46*, 156–164. https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.06.020

Ortega, H. Max Hidalgo, Giannina Trevejo, Ericka Correa, Ana María Cortijo, Vanessa Meza y Jessica Espino. (2012). Lista anotada de los peces de aguas continentales del Perú: Estado actual del conocimiento, distribución, usos y aspectos de conservación. Pp 56.

P

Padilla, T.,García, N., 2012. Hidroquímica del agua superficial de la subcuenca del río Quiscab, Guatemala. Revista ciencias tecnicas agropecuarias. 21, 17-20.

Pan de Cierre Integral de los Pasivos «Depósitos de Sedimentos en el río San Juan y Delta Upamayo» (2006). Estudios de suelo – Pasco.

Pearson, O. P., & Bradford, D. F. (1976). Thermoregulation of Lizards and Toads at High Altitudes in Peru. *Copeia*, *1976*(1), 155. https://doi.org/10.2307/1443786

Pollo, F. E., Grenat, P. R., Otero, M. A., Salas, N. E., & Martino, A. L. (2016). Assessment in situ of genotoxicity in tadpoles and adults of frog *Hypsiboas cordobae* (Barrio 1965) inhabiting aquatic ecosystems associated to fluorite mine. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *133*, 466–474. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.08.003

R

Rahman, M.S., Saha, N., Molla, A.H., 2014b. Potential ecological risk assessment of heavy metal contamination in sediment and water body around Dhaka export processing zone, Bangladesh. Environ. Earth Sci. 71 (5), 2293–2308.

Rodbell, D.T.; Delman, E.M.; Abbott, M.B.; Besonen, M.T., Tapia, P. M. (2014). The heavy metal contamination of Lake Junín National Reserve, Peru: an unintended consequence of the juxtaposition of hydroelectricity and mining. GSA Today 24: 4−10

Reglamento N.° 333/2007 por el que se establecen los métodos de muestreo y análisis para el control oficial de los niveles de plomo, cadmio, mercurio, estaño inorgánico, 3-MCPD y benzo(a)pireno en los productos alimenticios. Comisión de la Comunidad Europea. España. 28 de marzo de 2007. Recuperado de https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/TXT/?uri=CELEX%3A32007R0333.

R Core Team (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

Rodríguez, Daniel, D'Elía, Guillermo, Ortega, Hernán, & Aguilar, César. (2019). Revisión taxonómica de la rana marsupial Gastrotheca peruana (Amphibia: Hemiphractidae) en base al gen mitocondrial 16S. *Revista Peruana de Biología*, *26*(4), 461-468. https://dx.doi.org/10.15381/rpb.v26i4.16238

S

Salvarredy, M., 2008. Contaminación en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. These se Doctorat de L´Universite Toulouse lll – Paul Sabatier.

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre - SERFOR. (2018). Libro Rojo de la Fauna Silvestre Amenazada del Perú. SERFOR (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre), Lima. Perú, pp. 1- 532 páginas.

Sparling, D.W.; Lowe, T.P. (1996). Metal concentrations of tadpoles in experimental ponds. Environ. Pollut. 91, 149e159. https://doi.org/10.1016/0269-7491(95) 00057-7.

Schoenberger, P. J., Wysocki, D. A. and Benham E.C. (1998). Field book for descrcribing and sampling soils. National Soil Survey Center. United States, Department of Agriculture. Lincoln, Nebraska.

Soil Survey Manual. (2017). By Soil Science Division Staff. United States Department of Agriculture. Handbook No. 18.

Sagástegui A. y S. Leiva. (1993). Segundo. Flora invasora de los cultivos del Perú. 1nd ed. Trujillo, Editorial Libertad EIRL. 539 p.

Servicio Nacional de Sanidad Agraria – SENASA (2017). Plan Anual de Monitoreo de Residuos Químicos y Otros Contaminantes en Alimentos Agropecuarios Primarios y Piensos, para el período Abril a Diciembre del 2017

Smith, A.; Pryer, R.; Kathleen M.; Schuettpelz, E.; et al. (2006). A classification for extant ferns. Taxon. Vol. 55, nº 3, 705-731 pp.

Scheuhammer, A. M. (1991). Effects of acidification on the availability of toxic metals and calcium to wild birds and mammals. *Environmental Pollution*, *71*(2–4), 329–375. https://doi.org/10.1016/0269-7491(91)90036-V

Singh, R., Gautam, N., Mishra, A., & Gupta, R. (2011). Heavy metals and living systems: An overview. In *Indian Journal of Pharmacology* (Vol. 43, Issue 3, pp. 246–253). Wolters Kluwer -- Medknow Publications. https://doi.org/10.4103/0253-7613.81505

Sinsch, U. (1986). Anfibios de la sierra central del Peru - Una clave de identificacion para adultos y larvas: *Boletin de Lima*, *45*(8), 23–33. ISSN 0253-0015

Sinsch, U. (1988). El sapo andino Bufo spinulosus: analisis preliminar de su orientacion hacia sus lugares de reproduccion. *Boletin de Lima*, *57*, 83–92.

Sinsch, U. (1990). Froschlurche (Anura) der zentral-peruanischen Anden: Artdiagnose, Taxonomie, Habitate, Verhaltensökologie. In *Salamandra* (Vol. 26, Issue 2).

Sinsch, U., & Lehr, E. (2010). Geographical variation in the high andean frog telmatobius carrillae morales, 1988 (Ceratophryidae, Telmatobiinae): Size, skin texture, and coloration. *Journal of Herpetology*, *44*(4), 495–505. https://doi.org/10.1670/09-081.1

Smalling, K. L., Anderson, C. W., Honeycutt, R. K., Cozzarelli, I. M., Preston, T., & Hossack, B. R. (2019). Associations between environmental pollutants and larval amphibians in wetlands contaminated by energy-related brines are potentially mediated by feeding traits. *Environmental Pollution*, *248*, 260–268. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.033

Snodgrass, J. W., Hopkins, W. A., & Roe, J. H. (2003). Relationships among developmental stage, metamorphic timing, and concentrations of elements in bullfrogs (Rana catesbeiana). *Environmental Toxicology and Chemistry*, *22*(7), 1597–1604. https://doi.org/10.1897/1551-5028(2003)22<1597:RADSMT>2.0.CO;2

Stolyar, O.B., N.S. Loumbourdis, H.I. Falfushinska, and L.D. Romanchuk. (2008). Comparison of metal bioavailability in frogs from urban and rural sites of Western Ukraine. Archives of Environmental Contamination and Toxicology 54: 107–113.

T

Takamura, N., Kasai, F. & Watanabe, M.M. (1989). Effects of Cu, Cd and Zn on photosynthesis of freshwater benthic algae. J Appl Phycol 1, 39–52. https://doi.org/10.1007/BF00003534

Tovar, O. (1993). Las Gramíneas (Poaceas) del Perú. Ruizia 13: 1-481 pp

Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. In *EXS* (Vol. 101, pp. 133–164). NIH Public Access. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6

U

Uetz, P., Freed, P. & Jirí Hošek (eds.). (2018). The Reptile Database [07 de febrero del 2018]. Recuperado de: http://www.reptile-database.org.

V

Verb, R.G. & Vis, M.L. (2001). An examination of macroalgal communities from an acid mine drainage impacted watershed. *Aquatic Botany 71*: 93-107.

Verb, R.G. & Vis, M.L. (2005). Periphyton assemblages as bioindicators of mine-drainage in unglaciated Western Allegheny Plateau lotic systems. *Water, Air, and Soil Pollution 161*: 227-265.

W

Water Mangement Consultants (2013), Plan de cierre integral de Pasivos de Origen minero río San Juan y delta Upamayo.

Watson, A., Fitzgerald, A., Damián Baldeón, O., & Elías, R. (2017). Habitat characterization, occupancy and detection probability of the Endangered and endemic Junín giant frog Telmatobius macrostomus. *Endangered Species Research*, *32*(1), 429–436. https://doi.org/10.3354/esr00821

Welch, S. A., Kirste, D., Christy, A. G., Beavis, F. R. y Beavis, S. G. (2008). *Jarosite dissolution II—Reaction kinetics, stoichiometry and acid flux. Chemical Geology, 254(1-2), 73–86.* doi:10.1016/j.chemgeo.2008.06.010

Weberbauer, A. (1945). El Mundo Vegetal de los Andes Peruanos. Estudio Fitogeográfico.

Lima, Edit. Lumen. Ministerio de Agricultura. 776 pp.

X

Xu, Chi & Li, Yutong & Hu, Jian & Yang, Xuejiao &, Sheng & Sheng & Liu, Maosing. (2011). Evaluating the difference between the normalized difference vegetation index and net primary productivity as the indicators of vegetation vigor assessment at landscape scale. Environmental monitoring and assessment.

Y

Yasser A. El-Amier, Abdelhamid A. Elnaggar, Muhammad A. El-Alfy, Evaluación y mapeo de la distribución espacial de la contaminación por metales pesados de sedimentos del fondo en el lago Burullus, Egipto. *Journal of Basic and Applied Science*s (2016), doi: 10.1016/j.ejbas.2016.09.005

Z

Zocche, J. J., da Silva, L. A., Damiani, A. P., Mendonça, R. Á., Peres, P. B., dos Santos, C. E. I., Debastiani, R., Dias, J. F., de Andrade, V. M., & Pinho, R. A. (2014). Heavy-metal content and oxidative damage in Hypsiboas faber: The impact of coal-mining pollutants on amphibians. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, *66*(1), 69–77. https://doi.org/10.1007/s00244-013-9949-6