



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»



Organismo
de Evaluación
y Fiscalización
Ambiental

EVALUACIÓN AMBIENTAL EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA UNIDAD DE PRODUCCIÓN CERRO VERDE DE SOCIEDAD MINERA CERRO VERDE S.A.A. - 2018

SUBDIRECCIÓN TÉCNICA CIENTÍFICA

DIRECCIÓN DE EVALUACIÓN AMBIENTAL

2019



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	ANTECEDENTES.....	1
3.	OBJETIVOS	4
3.1	Objetivo general	4
3.2	Objetivos específicos.....	4
4.	ÁREA DE ESTUDIO	4
5.	METODOLOGÍA.....	5
5.1	Agua superficial	6
5.2	Calidad de sedimento	10
5.3	Comunidades hidrobiológicas.....	13
5.4	Calidad de aire	21
5.5	Agua subterránea	28
5.6	Caracterización geológica.....	31
5.7	Caracterización de roca.....	32
5.8	Caracterización de componentes mineros	34
5.9	Prospección geofísica.....	37
5.10	Caracterización hidroquímica	39
5.11	Caracterización de suelo	41
5.12	Caracterización de polvo sedimentado	42
6.	RESULTADOS	43
6.1	Componentes ambientales evaluados en el río Chili y tributarios	44
6.2	Calidad de aire	69
6.3	Estudios especializados.....	80
7.	DISCUSIÓN.....	223
	Río Chili y tributarios.....	223
	Aire, suelo y polvo sedimentado	229
	Agua subterránea	248
	Zona I: Depósito de relaves Enlozada	248
	Zona II: Depósito de relaves Linga.....	264
	Zona III: PAD, presa Huayrondo, tajos y DDM Noreste, Sureste y Cerro Negro	271
	Zona IV: DDM Oeste y DDM Suroeste.....	277
8.	CONCLUSIONES	278
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	281
10.	ANEXOS	286



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5-1. Cuerpos de agua y número de puntos de muestreo evaluados	6
Tabla 5-2. Ubicación de puntos de muestreo de agua superficial.....	6
Tabla 5-3. Parámetros y métodos de análisis en agua	8
Tabla 5-4. Estándares nacionales de calidad ambiental para agua Categoría 3.....	9
Tabla 5-5. Referencias para el muestreo de la calidad de sedimento	10
Tabla 5-6. Cuerpos de agua asociados y número de los puntos de muestreo de sedimento	11
Tabla 5-7. Ubicación de puntos de muestreo de sedimento	11
Tabla 5-8. Parámetros evaluados y métodos de análisis	11
Tabla 5-9. Valores de comparación para la calidad de sedimento de aguas continentales ..	12
Tabla 5-10. Cuerpos de agua asociados y número de puntos de muestreo de comunidades hidrobiológicas.....	13
Tabla 5-11. Ubicación de puntos de muestreo de comunidades hidrobiológicas	13
Tabla 5-12. Parámetros y métodos de análisis en comunidades hidrobiológicas	14
Tabla 5-13. Puntajes de sensibilidad asignadas a las familias de macroinvertebrados bentónicos para la obtención del índice ABI.....	17
Tabla 5-14. Estados de la calidad del cuerpo de agua según el índice biótico andino (ABI)	18
Tabla 5-15. Calidad hidromorfológica del cuerpo de agua.....	19
Tabla 5-16. Calidad ecológica del cuerpo de agua.....	19
Tabla 5-17. Estados de calidad ecológica del agua según el ABI.....	19
Tabla 5-18. Puntajes de las familias de macroinvertebrados bentónicos para el índice BMWP/Col.....	20
Tabla 5-19. Valores y significado del índice BMWP/Col.....	20
Tabla 5-20. Escala de valores de EPT.....	20
Tabla 5-21. Valores del índice CA	21
Tabla 5-22. Valores de la proporción EPT/CA %.....	21
Tabla 5-23. Guías utilizadas para el monitoreo de aire	22
Tabla 5-24. Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad de aire	22
Tabla 5-25. Parámetros analizados en aire	23
Tabla 5-26. Escala de velocidades de los vientos según Beaufort (2008).....	23
Tabla 5-27. Estándares de calidad para metales en aire de acuerdo a los criterios de calidad ambiental de Canadá	25
Tabla 5-28. Referencias normativas para evaluación de la calidad del agua subterránea....	28
Tabla 5-29. Distribución de puntos de muestreo de agua subterránea.....	28
Tabla 5-30. Parámetros y métodos de análisis en agua subterránea	29
Tabla 5-31. Referencias para la caracterización geológica.....	31
Tabla 5-32. Referencias para la caracterización geoquímica de roca	33
Tabla 5-33. Ubicación de puntos de muestreo para la caracterización geoquímica de roca	33
Tabla 5-34. Parámetros analizados en las muestras de roca	33



Tabla 5-35. Guías utilizadas para la caracterización de componentes mineros	34
Tabla 5-36. Ubicación de puntos de muestreo en agua del sobrenadante de los depósitos de relaves	35
Tabla 5-37. Ubicación de puntos de muestreo de pulpa de relave	35
Tabla 5-38. Ubicación de puntos de muestreo en los depósitos de desmonte de mina.....	35
Tabla 5-39. Parámetros analizados en las muestras de componentes mineros.....	36
Tabla 5-40. Ubicación de las líneas de tomografía geoelectrica	38
Tabla 5-41. Guías utilizadas para la caracterización de suelo	41
Tabla 5-42. Ubicación de puntos de muestreo para la caracterización de suelo.....	41
Tabla 5-43. Parámetros analizados en las muestras de suelo.....	42
Tabla 5-44. Referencias para el muestreo de polvo sedimentado	42
Tabla 5-45. Ubicación de los puntos de muestreo de polvo sedimentado.....	43
Tabla 5-46. Parámetros analizados en las muestras de polvo sedimentado.....	43
Tabla 6-1. Resumen de parámetros que incumplieron los ECA agua-2015 y 2017 en el río Chili y tributarios	44
Tabla 6-2. Riqueza de especies de la comunidad de perifiton (microalgas) por phylum en el río Chili y tributarios.....	52
Tabla 6-3. Abundancia de organismos/cm ² de la comunidad de perifiton (microalgas) por phylum en el río Chili y tributarios	53
Tabla 6-4. Índices de diversidad alfa de la comunidad de perifiton (microalgas) en el río Chili y tributarios	53
Tabla 6-5. Riqueza de especies de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por orden en el río Chili y tributarios.....	55
Tabla 6-6. Abundancia de individuos de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por orden en el río Chili y tributarios.....	56
Tabla 6-7. Índices de diversidad alfa de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en el río Chili y tributarios	57
Tabla 6-8. Análisis de componentes principales (ACP) para las variables consideradas en el río Chili y tributarios (río Mollebaya y quebrada Uchumayo).....	59
Tabla 6-9. Análisis de correspondencia canónica (ACC) entre la comunidad de macroinvertebrados bentónicos y los factores abióticos	59
Tabla 6-10. Calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios, a partir del índice biótico andino (ABI).....	62
Tabla 6-11. Calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios a partir del protocolo CERA-S.....	65
Tabla 6-12. Calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios, a partir del índice BMWP/Col	65
Tabla 6-13. Calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios a partir del índice EPT%.....	65
Tabla 6-14. Calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios, a partir del índice CA%	66
Tabla 6-15. Calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios a partir del índice EPT/CA %.....	66
Tabla 6-16. Riqueza de especies de la comunidad del neoton en el río Chili y tributarios....	67
Tabla 6-17. Registro meteorológicos en cada estación de monitoreo	70



Tabla 6-18. Resumen estadístico de concentraciones de material particulado	73
Tabla 6-19. Valores máximos y mínimos obtenidos en los piezómetros evaluados en la zona I	81
Tabla 6-20. Valores máximos y mínimos obtenidos en los piezómetros evaluados en la zona II	94
Tabla 6-21. Valores máximos y mínimos obtenidos en los piezómetros evaluados en la zona III	103
Tabla 6-22. Valores máximos y mínimos obtenidos en los piezómetros evaluados en la zona IV	111
Tabla 6-23. Análisis mineralógico de caliza (RE-1)	138
Tabla 6-24. Análisis mineralógico de granodiorítica (RE-2)	139
Tabla 6-25. Análisis mineralógico de andesita (RE-3)	140
Tabla 6-26. Parámetros fisicoquímicos en muestras de roca	140
Tabla 6-27. Prueba SFE en muestras de roca de la zona I	146
Tabla 6-28. Análisis mineralógico de roca caliza (RL-1)	146
Tabla 6-29. Análisis mineralógico de monzodiorita (RL-2)	147
Tabla 6-30. Análisis mineralógico de la roca monzonita (RL-3)	148
Tabla 6-31. Parámetros fisicoquímicos en muestras de roca de la zona II	148
Tabla 6-32. Prueba SFE en muestras de roca de la zona II	154
Tabla 6-33. Parámetros fisicoquímicos en pulpa de relave (fracción fina)	156
Tabla 6-34. Análisis mineralógico en pulpa de relave del depósito de relaves Enlozada (DRE-SD-02)	157
Tabla 6-35. Prueba SFE en muestras de relave de la zona I	159
Tabla 6-36. Parámetros fisicoquímicos en muestras de relave de la zona II	163
Tabla 6-37. Análisis mineralógico en pulpa de relave del depósito de relaves Linga (DRL-SD-01)	164
Tabla 6-38. Prueba SFE en muestras de relave de la zona II	166
Tabla 6-39. Parámetros fisicoquímicos en muestra compuesta del DDM Noreste	169
Tabla 6-40. Análisis mineralógico en muestra compuesta del DDM Noreste (DDM-NE1) ..	169
Tabla 6-41. Prueba SFE en muestra compuesta de DDM Noreste	171
Tabla 6-42. Parámetros fisicoquímicos en muestra compuesta del DDM Sureste	172
Tabla 6-43. Análisis mineralógico en muestra compuesta del DDM Sureste (DDM-SE1) ..	173
Tabla 6-44. Prueba SFE en muestra compuesta de DDM Sureste	175
Tabla 6-45. Parámetros fisicoquímicos en muestra compuesta del DDM Cerro Negro	176
Tabla 6-46. Análisis mineralógico en muestra compuesta del DDM Cerro Negro (DDM-CN1)	177
Tabla 6-47. Prueba SFE en muestras del acceso del DDM Cerro Negro de la zona III	180
Tabla 6-48. Parámetros fisicoquímicos en muestra compuesta del DDM Oeste	182
Tabla 6-49. Análisis mineralógico en muestra compuesta del DDM Oeste	183
Tabla 6-50. Prueba shake flask extraction en muestra compuesta de DDM Oeste	185
Tabla 6-51. Parámetros fisicoquímicos en muestra compuesta del DDM Suroeste	186



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Tabla 6-52. Análisis mineralógico en muestra compuesta del DDM Suroeste	187
Tabla 6-53. Prueba SFE en muestra compuesta de DDM Suroeste.....	190
Tabla 6-54. Concentración de metales en suelo aledaño a estaciones de monitoreo de aire y canteras de explotación de materiales no metálicos	219
Tabla 6-55. Concentración de metales y metaloides en polvo sedimentado en los alrededores de la estación de calidad de aire CA-08 del Pueblo Joven Cerro Verde	221



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Historia de operaciones en la mina Cerro Verde.....	2
Figura 4-1. Ubicación de la UP Cerro Verde de Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.	5
Figura 4-2. Microcuencas donde se emplaza la UP Cerro Verde.....	5
Figura 5-1. Vista del diagrama de a. Stiff y b. Piper.....	41
Figura 6-1. Calidad del agua en el río Chili y tributarios en abril 2018 comparados con los ECA agua-2015 y 2017	45
Figura 6-2. Potencial de hidrógeno en el río Chili y tributarios en abril de 2018	46
Figura 6-3. Conductividad eléctrica en el río Chili y tributarios en abril de 2018	46
Figura 6-4. Cloruros en el río Chili y tributarios en abril de 2018.....	47
Figura 6-5. Boro en el río Chili y tributarios en abril de 2018.....	47
Figura 6-6. Fluoruros en el río Chili y tributarios en abril de 2018	48
Figura 6-7. Potencial de hidrogeno en sedimento del río Chili y tributario en abril de 2018	49
Figura 6-8. Materia orgánica en sedimento del río Chili y tributario en abril de 2018	49
Figura 6-9. Triangulo textural del sedimento en el río Chili y tributario en abril de 2018.....	50
Figura 6-10. Metales en sedimento en el río Chili y sus tributarios	51
Figura 6-11. Concentración de cobre en sedimento del río Chili y tributario	52
Figura 6-12. Análisis de diversidad beta (similitud de Bray-Curtis) de la comunidad del perifiton (microalgas) en el río Chili y tributarios	54
Figura 6-13. Análisis de similitud de la comunidad de perifiton (microalgas) a partir del ordenamiento multidimensional no paramétrico (NMDS).	55
Figura 6-14. Análisis de diversidad beta (similitud de Bray-Curtis) de la comunidad macroinvertebrados bentónicos en el río Chili y tributarios	57
Figura 6-15. Análisis de similitud de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos, a partir del ordenamiento multidimensional no paramétrico (NMDS).	58
Figura 6-16. Análisis de correspondencia canónica (ACC) entre la comunidad de macroinvertebrados bentónicos y los factores abióticos	61
Figura 6-17. Calidad ecológica según el índice ABI en el río Chili y sus tributarios.....	63
Figura 6-18. Número de especies de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por grupos bioindicadores, definidos referencialmente a partir del índice ABI	64
Figura 6-19. Composición porcentual de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por grupos bioindicadores, definidos referencialmente a partir del índice ABI	64
Figura 6-20. Diagramas de Stiff de los puntos de agua superficial evaluados en el río Chili y tributarios.....	68
Figura 6-21. Diagrama de Piper de los puntos de agua superficial en el río Chili y tributarios	69
Figura 6-22. Rosa de vientos de las estaciones de monitoreo registradas del 05 al 19 de setiembre de 2018.....	72
Figura 6-23. Concentración de material particulado con diámetro menor a 10 micras	75
Figura 6-24. Concentración de material particulado con diámetro menor a 2,5 micras	75
Figura 6-25. Concentración de arsénico en PM ₁₀ registrados en las estaciones de monitoreo	76
Figura 6-26. Concentración de plomo en PM ₁₀ registrados en las estaciones de monitoreo.....	76
Figura 6-27. Concentración de material particulado con diámetro menor a 10 micras	78



Figura 6-28. Concentración de material particulado con diámetro menor a 2,5 micras	78
Figura 6-29. Concentración de metales en PM ₁₀ registrados en las estaciones de monitoreo: a. Aluminio (Al), b. Calcio (Ca), c. Cobre (Cu), d. Magnesio (Mg), e. Hierro (Fe) y f. Potasio (K)	79
Figura 6-30. Esquema de la distribución de zonas evaluadas	80
Figura 6-31. Piezómetros de la zona I que registraron valores máximos en los parámetros evaluados en agua subterránea en los meses de mayo y/o julio 2018.	82
Figura 6-32. Potencial de hidrógeno en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I	84
Figura 6-33. Conductividad eléctrica en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I	84
Figura 6-34. Cloruros en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I ...	85
Figura 6-35. Sulfatos en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I ...	85
Figura 6-36. Aluminio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I ..	86
Figura 6-37. Arsénico en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I ..	86
Figura 6-38. Boro en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I	87
Figura 6-39. Bario en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I	87
Figura 6-40. Calcio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I	88
Figura 6-41. Molibdeno en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I ..	88
Figura 6-42. Cobre en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I	89
Figura 6-43. Hierro en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I	89
Figura 6-44. Potasio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I	90
Figura 6-45. Magnesio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I ..	90
Figura 6-46. Manganeso en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I	91
Figura 6-47. Sodio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I	91
Figura 6-48. Plomo en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I	92
Figura 6-49. Selenio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I	92
Figura 6-50. Estroncio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I ..	93
Figura 6-51. Zinc en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I	93
Figura 6-52. Piezómetros de la zona II que registraron valores máximos en los parámetros evaluados en agua subterránea en los meses de abril y/o julio 2018.	95
Figura 6-53. Potencial de hidrógeno en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II	96
Figura 6-54. Conductividad eléctrica en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II	96
Figura 6-55. Cloruros en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II ..	97
Figura 6-56. Sulfatos en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II ..	97
Figura 6-57. Aluminio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II ..	97
Figura 6-58. Arsénico en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II ..	98
Figura 6-59. Boro en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II	98
Figura 6-60. Bario en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II	98
Figura 6-61. Calcio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II	99



Figura 6-62. Molibdeno en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II	99
Figura 6-63. Cobre en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II.....	99
Figura 6-64. Hierro en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II ..	100
Figura 6-65. Potasio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II	100
Figura 6-66. Magnesio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II	100
Figura 6-67. Manganeso en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II	101
Figura 6-68. Sodio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II ..	101
Figura 6-69. Plomo en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II ..	101
Figura 6-70. Selenio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II	102
Figura 6-71. Estroncio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II	102
Figura 6-72. Zinc en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II.....	102
Figura 6-73. Piezómetros de la Zona III que registraron valores máximos en los parámetros evaluados en agua subterránea en los meses de abril, mayo y/o julio 2018	104
Figura 6-74. Potencial de hidrógeno en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III	105
Figura 6-75. Conductividad eléctrica en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III	105
Figura 6-76. Cloruros en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III	105
Figura 6-77. Sulfatos en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III	106
Figura 6-78. Aluminio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III	106
Figura 6-79. Arsénico en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III	106
Figura 6-80. Boro en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III....	107
Figura 6-81. Bario en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III ...	107
Figura 6-82. Calcio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III ..	107
Figura 6-83. Molibdeno en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III	108
Figura 6-84. Cobre en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III ..	108
Figura 6-85. Hierro en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III ..	108
Figura 6-86. Potasio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III	109
Figura 6-87. Magnesio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III	109
Figura 6-88. Manganeso en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III	109
Figura 6-89. Sodio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III ..	110
Figura 6-90. Plomo en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III ..	110
Figura 6-91. Selenio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III	110



Figura 6-92. Estroncio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III	111
Figura 6-93. Zinc en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III	111
Figura 6-94. Piezómetros de la zona IV que registraron valores máximos en los parámetros evaluados en agua subterránea en los meses de abril y/o mayo 2018.....	113
Figura 6-95. Potencial de hidrógeno en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV.....	114
Figura 6-96. Conductividad eléctrica en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV.....	114
Figura 6-97. Cloruros en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV	114
Figura 6-98. Sulfatos en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV	115
Figura 6-99. Aluminio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV	115
Figura 6-100. Arsénico en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV	115
Figura 6-101. Boro en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV ..	116
Figura 6-102. Bario en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV ..	116
Figura 6-103. Calcio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV	116
Figura 6-104. Molibdeno en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV	117
Figura 6-105. Cobre en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV	117
Figura 6-106. Hierro en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV	117
Figura 6-107. Potasio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV	118
Figura 6-108. Magnesio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV	118
Figura 6-109. Manganeso en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV	118
Figura 6-110. Sodio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV ..	119
Figura 6-111. Plomo en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV	119
Figura 6-112. Selenio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV	119
Figura 6-113. Estroncio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV	120
Figura 6-114. Zinc en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la Zona IV ...	120
Figura 6-115. Litología local en la zona I	122
Figura 6-116. a. Afloramiento de granodiorita con presencia de inyecciones subcortantes de granodioritas máficas, b. Presencia de xenolitos, c. Enclaves máficos, d. Foliación milonítica y e. Dique aplítico.....	123
Figura 6-117. Afloramiento de gabbro masivo, ligada a fallas que producen una deformación dúctil esquistosa	124



Figura 6-118. Afloramiento de diorita de coloración gris con alto contenido de máficos.....	124
Figura 6-119. Afloramiento de caliza, conformado por estratos gruesos con buzamientos entre 30-40°	125
Figura 6-120. Depósitos coluviales en el área de influencia de Quebradita con presencia de: a. Depósitos coluviales, b. Sedimentación estratocreciente y c. Presencia de cantos rodados heterolítico	126
Figura 6-121. Perfil litológico en la zona I	126
Figura 6-122. Litología local en el área donde se emplaza el depósito de relave Enlozada	127
Figura 6-123. Representación de los esfuerzos principales en la zona I	128
Figura 6-124. Litología local en la zona II	129
Figura 6-125. Afloramiento de monzodiorita con presencia de hornblenda y biotita	129
Figura 6-126. Afloramiento de monzonita con presencia de hornblenda y biotita y cuerpo aislado de tufo volcánico	130
Figura 6-127. Perfil litológico en la zona II	131
Figura 6-128. Representación estructural en la zona II	131
Figura 6-129. Representación de esfuerzos principales en la zona II	132
Figura 6-130. Afloramiento de gneis ubicada al oeste del Pad 4B	132
Figura 6-131. Representación de esfuerzos principales en la zona III	133
Figura 6-132 a. Afloramiento de granodiorita gris claro de grano medio, b. Presencia de diaclasamiento, c. Elementos líticos redondeados y d. Presencia de lámelas concéntricas	134
Figura 6-133. Afloramiento de granodiorita cortada por diques aplíticos de potencias centimétricas	135
Figura 6-134. Perfil estratigráfico en la zona III	135
Figura 6-135. Representación de esfuerzos principales en la zona III	136
Figura 6-136. Representación de esfuerzos principales en la zona III	137
Figura 6-137. Distribución de muestras de roca para caracterización geoquímica: a. Zona I y b. Zona II	137
Figura 6-138. Muestra de mano de caliza tomada del estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada	138
Figura 6-139. Muestra de mano de granodiorita tomada del estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada	139
Figura 6-140. Muestra de mano de andesita tomada del estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada	139
Figura 6-141. Metales en muestras de roca de la zona I: a. RE-1, b. RE-2 y c. RE-3	141
Figura 6-142. Prueba de lixiviación de metales solubles SPLP en muestras de roca: a. RE-1, b. RE-2 y c. RE-3	142
Figura 6-143. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras de roca de la Zona I	144
Figura 6-144. Prueba ABA en muestras de roca de la zona I (primer criterio)	145
Figura 6-145. Prueba ABA en muestras de roca de la zona I (segundo criterio)	145
Figura 6-146. Muestra de mano de la monzodiorita ferromagnesiana tomada del estribo derecho del depósito de relaves Linga	146
Figura 6-147. Muestra de mano de monzodiorita tomado del estribo derecho del depósito de relaves Linga	147



Figura 6-148. Muestra de mano de monzonita tomado del estribo derecho del depósito de relaves Linga.....	147
Figura 6-149. Metales en muestras de roca de la zona II.....	149
Figura 6-150. Prueba de lixiviación de metales SPLP en muestras de roca a. RL-1, b. RL-2 y c. RL-3.....	150
Figura 6-151. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras de roca de la zona II.....	152
Figura 6-152. Prueba ABA en muestras de roca de la zona II (primer criterio).....	153
Figura 6-153. Prueba ABA en muestras de roca de la zona II (segundo criterio).....	153
Figura 6-154. Distribución de puntos de muestreo de agua del sobrenadante y pulpa de relave del depósito de relaves Enlozada.....	154
Figura 6-155. Parámetros fisicoquímicos en el depósito de relaves Enlozada: a. potencial de hidrógeno, b. conductividad eléctrica, c. cloruros y d. sulfatos.....	155
Figura 6-156. Metales en agua del sobrenadante del depósito de relaves Enlozada.....	156
Figura 6-157. Metales en pulpa de relave del depósito de relaves Enlozada.....	157
Figura 6-158. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras de la zona I.....	158
Figura 6-159. Prueba de lixiviación de metales SPLP en muestras del depósito de relaves Enlozada – zona I.....	159
Figura 6-160. Parámetros fisicoquímicos del agua de recirculación de filtraciones del depósito de relaves Enlozada: a. Potencial de hidrógeno, b. Conductividad eléctrica, c. Cloruros y d. Sulfatos.....	160
Figura 6-161. Metales en el agua de recirculación de filtraciones del depósito de relaves Enlozada - zona I.....	160
Figura 6-162. Distribución de puntos de muestreo de agua del sobrenadante y pulpa de relave del depósito de relaves Linga - zona II.....	161
Figura 6-163. Parámetros fisicoquímicos en el depósito de relaves Linga - zona II: a. potencial de hidrógeno, b. conductividad eléctrica c. cloruros y d. sulfatos.....	162
Figura 6-164. Metales en agua del sobrenadante del depósito de relaves Linga – zona II.....	163
Figura 6-165. Metales en pulpa de relave del depósito de relaves Linga – zona II.....	164
Figura 6-166. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras de la zona II.....	165
Figura 6-167. Prueba de lixiviación de metales solubles SPLP en muestras del depósito de relaves Linga – zona II.....	166
Figura 6-168. Parámetros fisicoquímicos del agua de recirculación de filtraciones del depósito de relaves Linga: a. Potencial de hidrógeno, b. Conductividad eléctrica, c. Cloruros y d. Sulfatos.....	167
Figura 6-169. Metales totales en el agua de recirculación de filtraciones del depósito de relaves Linga - zona II.....	167
Figura 6-170. Área de colecta de muestras en el DDM Noreste – zona III.....	168
Figura 6-171. Granulometría en muestras del DDM Noreste.....	168
Figura 6-172. Metales en muestras compuestas del DDM Noreste.....	169
Figura 6-173. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras del DDM Noreste - zona III.....	170
Figura 6-174. Prueba de lixiviación de metales SPLP en muestras del DDM Noreste – zona III.....	171
Figura 6-175. Vista panorámica del área de colecta de muestras en el DDM Sureste.....	172



Figura 6-176. Granulometría en el área de influencia del DDM Sureste	172
Figura 6-177. Metales en muestra compuesta del DDM Sureste	173
Figura 6-178. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras del DDM Noreste - zona III.....	174
Figura 6-179. Prueba de lixiviación de metales solubles SPLP en muestras del DDM Sureste – zona III	175
Figura 6-180. Vista del área de colecta de muestras en el acceso al DDM Cerro Negro	176
Figura 6-181. Granulometría en muestras del acceso hacia el DDM Cerro Negro	176
Figura 6-182. Metales en muestra compuesta del DDM Cerro Negro.....	177
Figura 6-183. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras del acceso al DDM Cerro Negro - zona III	178
Figura 6-184. Prueba de lixiviación de metales SPLP en muestras del DDM Cerro Negro – zona III	179
Figura 6-185. Prueba ABA en muestras del acceso al DDM Cerro Negro de la zona III (primer criterio).....	180
Figura 6-186. Prueba ABA en muestras del acceso al DDM Cerro Negro de la zona III (segundo criterio).....	180
Figura 6-187. Vista del área de colecta de muestra en el DDM - Oeste	181
Figura 6-188. Granulometría en muestras del DDM Oeste	181
Figura 6-189. Metales en muestras compuestas del DDM Oeste	182
Figura 6-190. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras del DDM Oeste - Zona III	184
Figura 6-191. Prueba de lixiviación de metales solubles SPLP en muestras del DDM Noreste – zona IV	185
Figura 6-192. Vista del área de colecta de muestras en el DDM Suroeste	186
Figura 6-193. Granulometría en muestras del DDM Suroeste	186
Figura 6-194. Metales totales en muestra compuesta del DDM Suroeste	187
Figura 6-195. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras del DDM Suroeste - zona VI	189
Figura 6-196. Prueba de lixiviación de metales solubles SPLP en muestras del DDM Suroeste – zona VI	190
Figura 6-197. Ubicación de las líneas tomográficas en las zonas I, II y III de evaluación.....	191
Figura 6-198. Sección de la línea tomográfica L-1	193
Figura 6-199. Sección de la línea tomográfica L-2	194
Figura 6-200. Sección de la línea tomográfica L-6	195
Figura 6-201. Sección de la línea tomográfica L-3	196
Figura 6-202. Sección de la línea tomográfica L-4	197
Figura 6-203. Sección de la línea tomográfica L-5	198
Figura 6-204. Sección de la línea tomográfica L-7	199
Figura 6-205. Sección de la línea tomográfica L-8	200
Figura 6-206. Sección de la línea tomográfica L-12	201
Figura 6-207. Sección de la línea tomográfica L-13	202
Figura 6-208. Sección de la línea tomográfica L-14	203



Figura 6-209. Sección de la línea tomográfica L-15	204
Figura 6-210. Sección de la línea tomográfica L-16	205
Figura 6-211.. Sección de la línea tomográfica L-16	206
Figura 6-212. Sección de la línea tomográfica L-11	207
Figura 6-213. Sección de la línea tomográfica L-10	208
Figura 6-214. Sección de la línea tomográfica L-9	209
Figura 6-215. Diagramas de Stiff del agua subterránea en los piezómetros evaluados en la zona I	211
Figura 6-216. Diagramas de Stiff del agua subterránea en los piezómetros evaluados en la zona II	212
Figura 6-217. Diagramas de Stiff del agua subterránea en los piezómetros evaluados en la zona III.....	213
Figura 6-218. Diagramas de Stiff del agua subterránea en los piezómetros evaluados en la zona IV	214
Figura 6-219. Diagramas de Piper de los piezómetros evaluados en la a. zona I; b. zona II; c. zona III y d. zona IV.....	216
Figura 6-220. Diagramas de Stiff de las muestras de agua evaluadas en componente minero en la zona I y zona II	218
Figura 6-221. Diagramas de Piper de las muestras de agua en la a. zona I – depósito de relaves Enlozada y b. zona II – depósito de relaves Linga.....	219
Figura 6-222. Esquema de concentración de metales en suelo aledaño a estaciones de monitoreo de aire y canteras de explotación de materiales no metálicos	220
Figura 6-223. Concentración de metales y metaloides en polvo sedimentado en los alrededores de la estación de calidad de aire CA-08 del Pueblo Joven Cerro Verde	222
Figura 7-1. Potencial de hidrógeno registrado en el río Chili: a. AS-16 b. AS-02 y c. AS-04; y quebrada Uchumayo d. AS-10 entre el 2009 y 2018.....	224
Figura 7-2. Ubicación y facies hidroquímicas del agua en pozos y manantiales cercanos al río Mollebaya	225
Figura 7-3. Representación de la relación B y Cl de fuentes con alto contenido de boro en el río Mollebaya y en manantiales y pozos cercanos.....	226
Figura 7-4. Concentraciones de a. cloruros, b. boro y c. conductividad eléctrica en el río Mollebaya del 2009 al 2018	226
Figura 7-5. Punto de muestreo de sedimento SD-01 ubicado a. Aguas abajo y b. Aguas arriba de la estación de bombas 1	227
Figura 7-6. Encauzamiento del río Chili en el punto HB-08.....	228
Figura 7-7. Comparación entre el número de especies del perifiton y macroinvertebrados bentónicos en el río Chili y tributarios con la materia orgánica.....	228
Figura 7-8. Análisis de conglomerados para metales en suelo y polvo sedimentado	229
Figura 7-9. Concentración de metales de los años 2013 y 2018, en los puntos de suelo alejados a las canteras de extracción de materiales no metálicos a. calcio y b. aluminio, c. potasio, d. magnesio, e. sodio y f. titanio.....	230
Figura 7-10. Análisis de componentes principales entre muestras de suelo y polvo sedimentado	231
Figura 7-11. Análisis de componentes principales entre muestras de suelo y polvo sedimentado	231



Figura 7-12. Dirección predominante de los vientos en periodo diurno y nocturno en las estaciones de monitoreo de calidad del aire	233
Figura 7-13. Distribución de las concentraciones de PM ₁₀ y PM _{2,5} en las estaciones de monitoreo	234
Figura 7-14. Comparación de concentración de material particulado a. PM ₁₀ y b. PM _{2,5} entre las estaciones CA-09 (OEFA) y San José 1 (SMCV)	235
Figura 7-15. Concentraciones de material particulado PM ₁₀ obtenidas en la estación CA-07 (OEFA) y la estación Chancado Mirador (SMCV)	236
Figura 7-16. Concentración de material particulado PM ₁₀ obtenidas en la estación CA-06 (OEFA) y estación KPH1 (SMCV)	236
Figura 7-17. Concentración de material particulado PM ₁₀ obtenidas en la estación CA-06 (OEFA) y estación Huayrondo (SMCV)	237
Figura 7-18. Concentraciones de material particulado a. PM ₁₀ y b. PM _{2,5} obtenidas en la estación Corazón de Jesús (SMCV) durante el 2016, 2017 y 2018, y durante la evaluación	237
Figura 7-19. Concentraciones de material particulado a. PM ₁₀ y b. PM _{2,5} obtenidas en la estación PPJJ Cerro Verde por el OSINERGMIN, SMCV y el OEFA	238
Figura 7-20. Concentraciones de material particulado durante la evaluación comparados con a. PM ₁₀ de la estación Banco Minero y b. PM _{2,5} de la estación Yarabamba	239
Figura 7-21. Correlación de concentración de material particulado PM ₁₀	240
Figura 7-22. Dispersión de metales en PM ₁₀ , considerando el aluminio como especie independiente	241
Figura 7-23. Dispersión de metales en PM ₁₀ considerando al cobre como especie independiente	242
Figura 7-24. Comparación referencial de concentración de metales de la corteza terrestre con las muestras de suelos	242
Figura 7-25. Dispersión de metales en PM ₁₀ , considerando al potasio como especie independiente	243
Figura 7-26. Perfil de factores asociados a fuentes de metales en PM ₁₀	244
Figura 7-27. Quema de biomasa en campos de cultivo agrícola	245
Figura 7-28. Resuspensión de material particulado a., b. y c. Tránsito vehicular en vías sin pavimentar y d. Explotación de materiales no metálicos – Concretos Supermix S.A. Proyecto La Enlozada	247
Figura 7-29. Porcentaje de contribución de metales a la masa del PM ₁₀ por factores identificados	248
Figura 7-30. Distribución de las concentraciones de a. sulfatos y b. cloruros en el agua de los piezómetros circundantes al depósito de relaves Enlozada	249
Figura 7-31. Distribución de los piezómetros y filtraciones en el área circundante al depósito de relaves Enlozada	250
Figura 7-32. Vista esquemática en planta y perfil de los piezómetros aguas abajo del depósito de relaves Enlozada	251
Figura 7-33. Estudios de prospección geofísica realizados por el OEFA a. L-1, b. L-2 y c. SMCV aguas arriba y abajo del sumidero de colección de filtraciones del depósito de relaves Enlozada	252
Figura 7-34. Relaciones binarias (Ca-SO ₄ , Sr-SO ₄ , Ca-Cl ⁻ y Sr-Cl ⁻) entre el agua subterránea de los piezómetros aguas abajo del depósito de relaves Enlozada, filtraciones y relave	253
Figura 7-35. Registro histórico de a. sulfatos y b. cloruros en el agua subterránea del piezómetro ASB-05 (MAS-26)	254



Figura 7-36. Registro histórico de a. sulfatos y b. cloruros en el agua del piezómetro ASB-118 (MAS-25)	255
Figura 7-37. Registro histórico de a. sulfatos y b. cloruros en el agua del piezómetro ASB-15 (MAS-146)	257
Figura 7-38. Estudios de prospección geofísica realizados por SMCV en el estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada	258
Figura 7-39. Relaciones binarias (Ca-SO_4 , Sr-SO_4) entre el agua subterránea de los piezómetros del estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada, filtraciones y relave	259
Figura 7-40. Registro histórico de a. sulfatos y b. cloruros en el agua del piezómetro ASB-94 (MWH-P4)	260
Figura 7-41. Registro histórico de a. sulfatos y b. cloruros en el agua del piezómetro ASB-14 (MAS-122)	261
Figura 7-42. Registro histórico de a. sulfatos y b. cloruros en el agua del piezómetro ASB-117 (MAS-36)	262
Figura 7-43. Comparación de facies hidroquímicas del agua subterránea de los piezómetros del estribo derecho del depósito de relaves Enlozada	263
Figura 7-44. Relaciones binarias (Ca-SO_4 , Sr-SO_4 , Ca-Cl^- y Sr-Cl^-) entre el agua subterránea de los piezómetros del estribo derecho del depósito de relaves Enlozada	264
Figura 7-45. Distribución de los piezómetros y filtraciones en el área circundante al depósito de relaves Linga	265
Figura 7-46. Registro histórico de las concentraciones de sulfatos en el agua subterránea del piezómetro ASB-48 (MAS-195)	266
Figura 7-47. Vista esquemática en planta y perfil de los piezómetros aguas abajo del depósito de relaves Linga	266
Figura 7-48. Concentraciones de a. sulfatos y b. cloruros en el agua subterránea y filtraciones del depósito de relaves Linga aguas arriba y abajo del <i>seepage</i>	267
Figura 7-49. Comparación de facies hidroquímicas del agua subterránea de los piezómetros aguas abajo del sumidero de colección de filtraciones (<i>seepage</i>) – Linga	268
Figura 7-50. Relaciones binarias (Na-Cl^- y Br-Cl^-) entre el agua subterránea de los piezómetros aguas abajo del sumidero de colección de filtraciones (<i>seepage</i>) - Linga	269
Figura 7-51. Estudios de prospección geofísica realizados por a. SMCV y el OEFA b. L-15 y c. L-16 aguas arriba y abajo del <i>seepage</i> - Linga	270
Figura 7-52. Comparación de facies hidroquímicas del agua subterránea de los piezómetros aguas arriba y abajo del DDM Noreste	271
Figura 7-53. Concentraciones de a. sulfatos, b. cloruros y c. cobre en el agua subterránea aguas arriba y abajo de presa Huayrondo	273
Figura 7-54. Vista esquemática en planta y perfil de los piezómetros aguas abajo de la presa Huayrondo	274
Figura 7-55. Registro histórico de a. potencial de hidrogeno y b. sulfatos del 2013 al 2018 en el agua subterránea del piezómetro ASB-17 (MA-41) aguas abajo de presa Huayrondo	275
Figura 7-56. Relaciones binarias (Ca-SO_4 , Mg-SO_4) entre el agua subterránea de los piezómetros de la zona III	276
Figura 7-57. Registro histórico en el agua del piezómetro ASB-68 (MACN-31) a. potencial de hidrogeno, b. conductividad eléctrica, c. cloruros y d. sulfatos	276
Figura 7-58. Comparación de facies hidroquímicas del agua subterránea del piezómetro ASB-71 cercano al DDM Suroeste.	277
Figura 7-59. Registro histórico de sulfatos en el agua subterránea de los piezómetros a. ASB-63 y b. ASB-64	277



1. INTRODUCCIÓN

La unidad de producción Cerro Verde (en adelante UP Cerro Verde), administrada por Sociedad Minera Cerro Verde (en adelante SMCV), se ubica en los distritos Uchumayo, La Joya, Yarabamba y Tiabaya, provincia y departamento Arequipa. Es un yacimiento cuprífero, su explotación es a tajo abierto con tratamientos por lixiviación y concentración de minerales, cuenta, además, con una planta de beneficio.

Desde el 2011 hasta el 2017 el Servicio de Información Nacional de Denuncias Ambientales (Sinada), cuenta con 8 denuncias ambientales relacionadas a: presuntas filtraciones y afloramientos de agua a partir de los depósitos de relaves que estarían afectando el agua subterránea y el río Chili, así como, incremento en las concentraciones de gases y material particulado que estarían alterando la calidad de aire ocasionando problemas de salud a la población aledaña a la minera.

Adicionalmente, los pobladores del asentamiento humano La Mansión del distrito Socabaya solicitaron al Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), la realización de un monitoreo de calidad de aire en el área de influencia de la minera¹. En la reunión del 7 de abril de 2017, donde participaron el alcalde de la Municipalidad Distrital de Socabaya y representantes del OEFA, se acordó mediante acta la ejecución de la evaluación ambiental en el área de influencia de la UP Cerro Verde durante el 2018.

La Dirección de Evaluación Ambiental - DEAM² (antes, Dirección de Evaluación) del OEFA, para abordar la problemática socioambiental y con la finalidad de evaluar la calidad ambiental e identificar las posibles fuentes de alteración en el área de influencia de la UP Cerro Verde, y en cumplimiento al Plan Anual de Evaluación y Fiscalización Ambiental 2018 del OEFA (Planefa 2018) aprobado mediante Resolución de Consejo Directivo N.º 037-2017-OEFA/CD, desarrolló la evaluación ambiental de muestras de agua, sedimento, aire, suelo y estudios especializados como tomografía geoelectrica, caracterización geoquímica de componentes mineros, roca y polvo sedimentado, descripción geológica local y comunidades hidrobiológicas.

La información contenida en este informe, constituye un soporte técnico para las acciones de supervisión y fiscalización ambiental, de acuerdo con las funciones del OEFA.

2. ANTECEDENTES

Mediante la Resolución de Consejo Directivo N.º 037-2018-OEFA/CD, publicado el 30 de diciembre de 2018 en el diario oficial El Peruano, se aprobó el Plan Anual de Evaluación y Fiscalización Ambiental correspondiente al año 2018 (en adelante Planefa 2018) del OEFA, el que comprende el Plan Anual de Evaluación Ambiental, que está orientado a ejecutar acciones de evaluación ambiental en las áreas de influencia de las actividades fiscalizables de competencia del OEFA, en aras de otorgar un soporte efectivo a la función supervisora.

El Planefa 2018 señala que la función evaluadora, en el marco del proceso de fiscalización ambiental, tiene diversos objetivos; entre ellos, generar un diagnóstico ambiental que contenga un análisis integral del estado de los diversos componentes ambientales e identificar los factores que podrían estar influenciando en ellos.

¹ Vecinos del distrito de Socabaya, solicitan monitoreo participativo. Hoja de Trámite N° 2017-E-01-026601 con fecha: 30 de marzo de 2017.

² D.S. N.º 013-2017-MINAM. Aprueban el Reglamento de Organización y Funciones del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental – OEFA.

Entre los criterios considerados por el OEFA para priorizar la ejecución de las evaluaciones ambientales se consideró la conflictividad socioambiental, afectación a la calidad de los componentes ambientales, existencia de cuerpos de agua, bofedales, áreas naturales protegidas, número de vertimientos autorizados por la Autoridad Nacional del Agua (en adelante ANA) y compromisos asumidos pendientes por el OEFA. Teniendo en consideración estos criterios, el OEFA consideró realizar una evaluación ambiental en el área de influencia de la UP Cerro Verde.

El inicio de la explotación de minerales en el área de la mina Cerro Verde data de 1868, el mineral era extraído y embarcado a Gales para su recuperación, posteriormente en 1916 es adquirido por Anaconda. En 1970 Minero Perú adquirió la mina y continuó con las operaciones mineras entre 1976 y 1993, que incluyeron 2 áreas a tajo abierto, manejo de 3 plataformas de lixiviación (Pads), pozas de colección de solución enriquecida (PLS), una planta de extracción por solventes y electrodeposición (SX/EW) y una planta concentradora piloto e instalaciones de servicios auxiliares³.

En 1993, la UP Cerro Verde es operada por Sociedad Minera Cerro Verde S.A., al año siguiente es privatizada siendo adquirida por Cyprus Climax Metals Company (CCMC), para continuar con la explotación e instalación de nuevas plataformas de lixiviación (Pads 2X y 4A), cabe precisar que recién en 1997 se aprobó el plan de adecuación y manejo ambiental. En 1999 Phelps Dodge Corporation adquirió Cyprus Climax Metals Company y se adecua a la ley general de sociedades convirtiéndose en sociedad anónima abierta. En el 2004 se aprueba el primer EIA del proyecto sulfuros primarios, y finalmente en el 2007, Freeport-McMoRan Copper & Gold Inc. adquirió Phelps Dodge Corporation convirtiéndose en el nuevo operador de SMCV⁴.

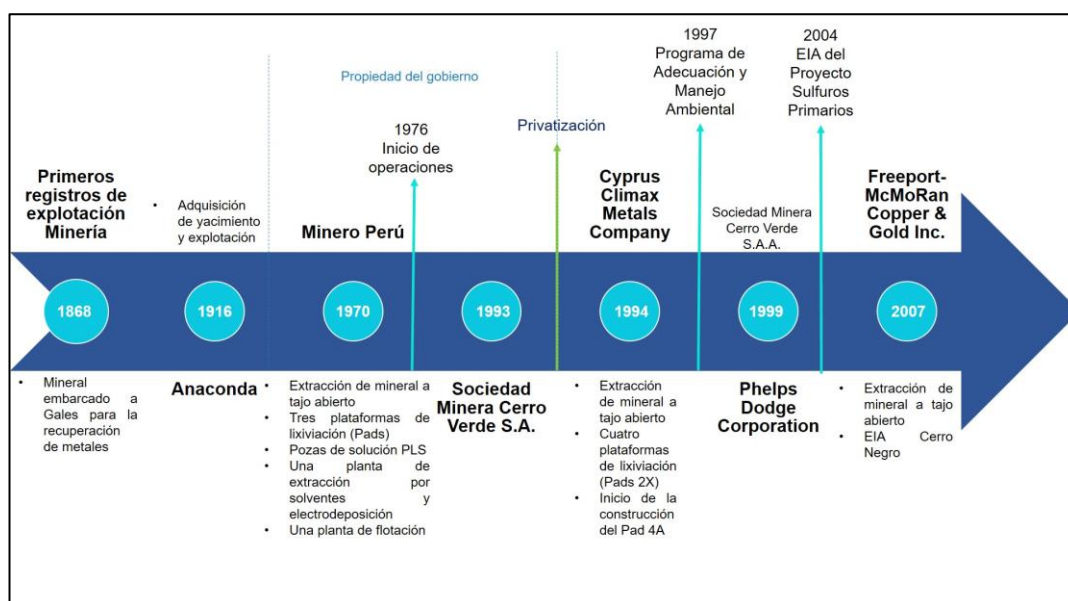


Figura 2-1. Historia de operaciones en la mina Cerro Verde

La UP Cerro Verde cuenta con 25 Instrumentos de Gestión Ambiental (IGA) aprobados desde 1997 hasta el 2018 que incluyen: Estudios de Impacto Ambiental (EIA), modificatorias de EIA e informes técnicos. Por otro lado, desde el 2011 al 2015 la ANA realizó 13 monitoreos participativos de agua superficial en el río Chili. De estos monitoreos, los parámetros que superaron los ECA para agua categoría 3 (2008) fueron pH, conductividad eléctrica, aceites y grasas, demanda química de oxígeno (DQO),

³ R.D. N.º 099-97-EM/DGM. Programa de de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) de la unidad de producción Cerro Verde.1996

⁴ Freeport-MacMoRan Inc. 2018. Our History. Disponible en : <https://www.fcx.com/about/history> [17 de febrero de 2018]



demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), nitratos, fosfatos, nitrógeno amoniacal, coliformes termotolerantes, coliformes totales, aluminio (Al), boro (B) calcio (Ca), hierro (Fe), manganeso (Mn), fósforo (P) y plomo (Pb), indicando que la existencia de estos parámetros se debe al contexto geológico de la zona, actividades antrópicas, descargas de aguas residuales domésticas y municipales sin tratamiento previo y la erosión de suelos.

El organismo supervisor de la inversión en energía y minería (OSINERGMIN), realizó 7 monitoreos participativos entre el 2008 y 2009 que comprendieron los componentes de aire, en 5 distritos aledaños a la UP Cerro Verde (Uchumayo, Tiabaya, Yarabamba, Quequeña y Hunter), agua superficial en el río Chili (M-19) y agua subterránea en 8 piezómetros distribuidos en las quebradas Siete Vueltas (MACN-30 y MACN-31), Tinajones (MAS-27, MAS-28 y CVKP-01) y Enlozada (MAS-25, MAS-26 y CV-KP-02).

En relación a los resultados de calidad de aire, en las 5 estaciones de monitoreo concluyeron que los parámetros PM₁₀, SO₂ y plomo estuvieron por debajo de los ECA - D. S. N.º 074-2001-PCM, y la concentración de arsénico se encontró por debajo de los Niveles Máximos Permisibles de la R.M. N.º 315-96-EM-VMM.

En el caso de las aguas subterráneas concluyeron que los parámetros nitratos (MAS-25, MAS-26, MAS-27, MAS-28, CVKP-01 y CVKP-02), plomo (MAS-26, MACN-31) y selenio (MACN-31, MAS-25, MAS-26 y CVKP-02) superaron los límites permisibles para la Clase I de la ley general de aguas (LGA), utilizada de manera referencial. Además, las concentraciones de pH, cloruros y sulfatos variaron respecto a los resultados de la línea de base del EIA (Proyecto de Sulfuros Primarios) en los puntos MAS-25 y MAS-26, y la concentración de plomo superó la concentración de la línea de base referida en el punto MAS-26. Asimismo, registró una ligera variación de pH y sulfatos en los puntos MAS-27 y MAS-28.

En cuanto a la calidad de agua del río Chili (M-19) indicaron la existencia de coliformes fecales y totales, así como concentraciones de nitratos, DBO₅, aceites y grasas, sulfuros, cromo y arsénico que superaron los valores límites de la LGA Clase III.

El OEFA a través de la Dirección de Evaluación realizó 3 informes de monitoreos ambientales de calidad de agua superficial, sedimento⁵ y aire^{6,7}. Los parámetros que superaron los ECA para agua Categoría 3 (2015) fueron conductividad eléctrica, cloruros, coliformes totales y fecales. Para la matriz sedimento, los parámetros que superaron los valores de la guía canadiense CEQG⁸ fueron arsénico, cobre y cromo; y para la matriz aire el parámetro que superó los ECA para aire (2008) fue el material particulado menor a 2,5 micras (PM_{2,5}).

Como parte de las actividades de evaluación ambiental el OEFA realizó una visita de reconocimiento del 17 al 28 de febrero del 2018⁹, en la cual se definieron los puntos de muestreo de agua: superficial, subterránea, residual industrial; hidrobiología, sedimento, aire, suelo y roca; relacionados a los principales componentes mineros.

⁵ Informe N.º 276-2016-OEFA/DE-SDCA, «Informe del monitoreo ambiental de calidad de agua superficial y sedimento en el río Chili y afluentes, realizado del 14 al 18 de mayo de 2016».

⁶ Informe N.º 081-2015-OEFA/DE-SDCA, «Informe de monitoreo de calidad del aire en el distrito de Jacobo Hunter, provincia y departamento de Arequipa»

⁷ Informe N.º 263-2015-OEFA/DE-SDCA, «Informe de monitoreo ambiental participativo de calidad de aire realizado en el distrito de Jacobo Hunter, provincia y departamento de Arequipa»

⁸ Canadian Environmental Quality Guidelines (CEQG) - SQGs (*Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*, 1999)

⁹ Informe N.º 100-2018-OEFA/DEAM-STEAC. Informe de visita de reconocimiento para el desarrollo del Plan de Evaluación Ambiental en el área de influencia de la unidad de producción Cerro Verde. Aprobado con fecha 11 de abril de 2018.



La ejecución de los muestreos se efectuó en distintas fechas y por matrices ambientales, siendo el primero del 22 de abril al 12 de mayo de 2018, en las matrices agua superficial, subterránea, residual industrial, sedimento, comunidades hidrobiológicas y mapeo geológico; el segundo del 18 al 31 de julio de 2018, agua subterránea, componentes mineros, roca y prospección geofísica; finalmente, del 1 al 19 de setiembre de 2018 se realizó el monitoreo de aire, y el muestreo de suelo y polvo sedimentado. La totalidad de los puntos evaluados corresponden a 11 para agua superficial (9 en el río Chili, 1 en el río Mollebaya y 1 en la quebrada Uchumayo), 72 para agua subterránea, 10 para hidrobiología, 10 para sedimento, 6 estaciones de aire, 6 para suelo, 2 para polvo sedimentado y 17 líneas de tomografía geoeléctrica (prospección geofísica).

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar la calidad ambiental e identificar las posibles fuentes de alteración en el área de influencia de la UP Cerro Verde.

3.2 Objetivos específicos

- Evaluar la calidad de agua y sedimento de los ríos Chili y Mollebaya, y la quebrada Uchumayo.
- Evaluar la composición, riqueza, abundancia y diversidad de las comunidades hidrobiológicas de perifiton, macroinvertebrados bentónicos y peces en los ríos Chili, Mollebaya y la quebrada Uchumayo.
- Describir la geología local asociadas a posibles filtraciones de las áreas donde se emplazan los depósitos de relaves Linga, Enlozada y la presa Huayrondo.
- Identificar y caracterizar posibles filtraciones a partir de métodos de prospección geofísica, geoquímica e hidroquímica en el área de influencia de la UP Cerro Verde.
- Evaluar la calidad del aire en el Pueblo Joven Cerro Verde, Batolito de la Caldera y en la I.E. Corazón de Jesús de Socabaya.
- Caracterizar el suelo superficial circundante a las estaciones de monitoreo de aire.
- Caracterizar el polvo sedimentado de techos y paneles solares de viviendas del Pueblo Joven Cerro Verde.

4. ÁREA DE ESTUDIO

La UP Cerro Verde se ubica en los distritos Uchumayo, La Joya, Yarabamba y Tiabaya, provincia y departamento Arequipa. Hidrográficamente comprende 10 microcuencas: Del Ataque, Tinajones, Enlozada, Huayrondo, Siete Vueltas, Linga, Cañón Roto, San José, Cerro Verde y La Gloria, pertenecientes a la cuenca Quilca Vitor Chili, a excepción de Linga que pertenece a la cuenca Tambo (Figuras 4-1 y 4-2).

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

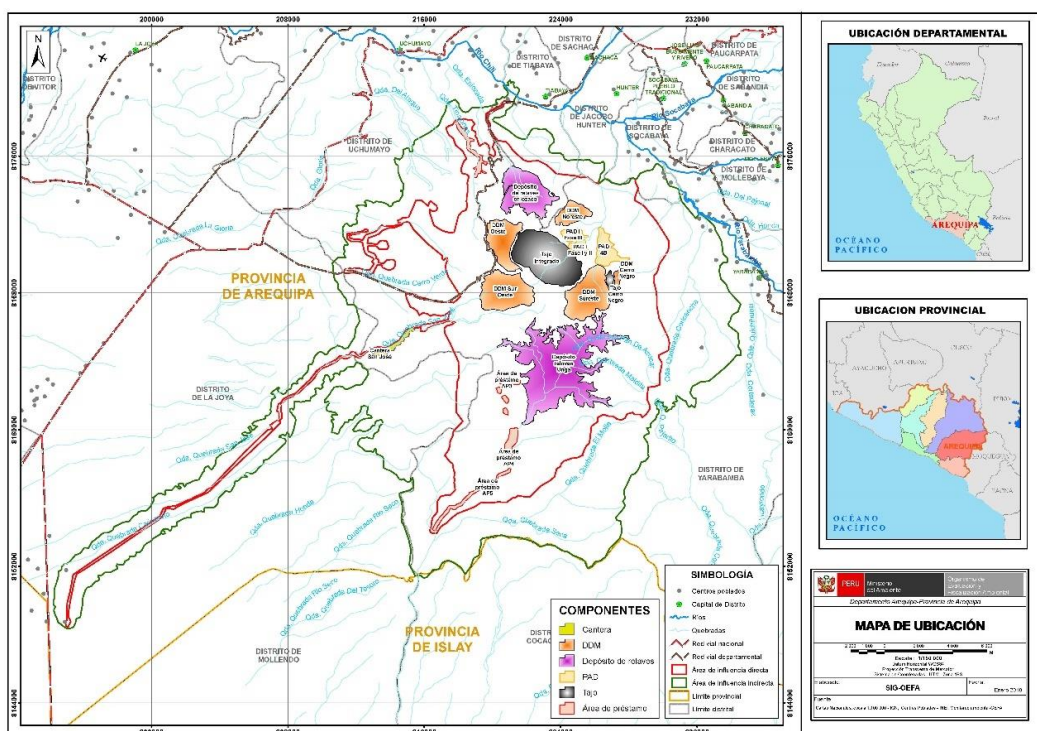


Figura 4-1. Ubicación de la UP Cerro Verde de Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.

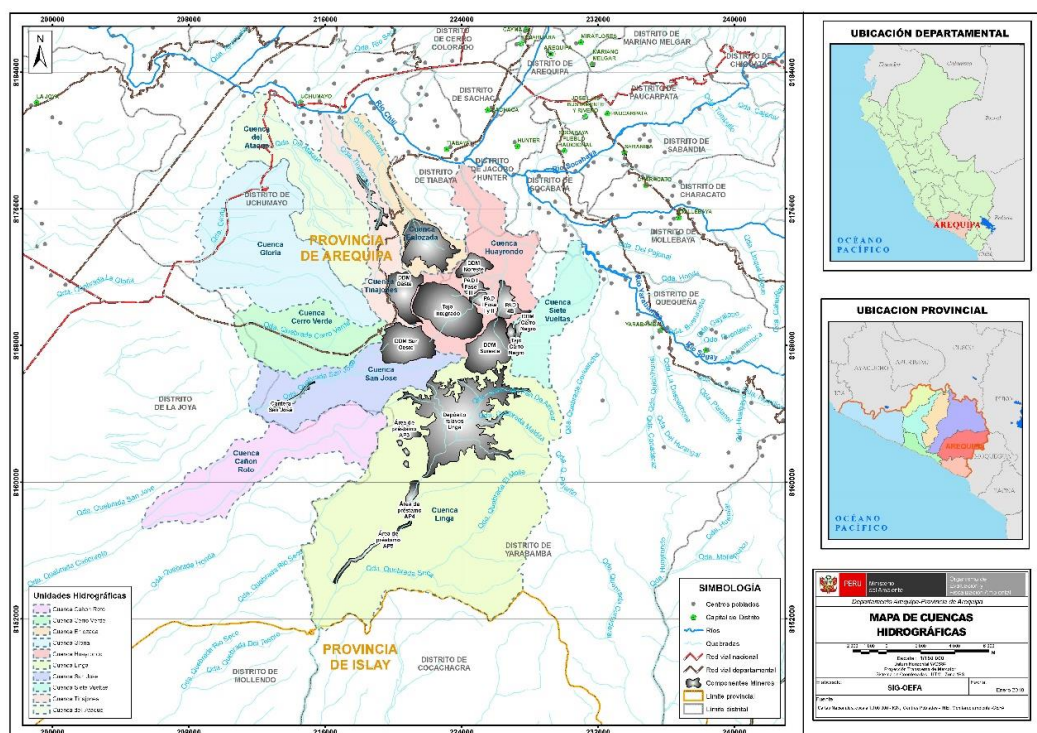


Figura 4-2. Microcuencas donde se emplaza la UP Cerro Verde

5. METODOLOGÍA

En esta sección se proporciona la información de la metodología aplicada en la evaluación ambiental en el área de influencia de la UP Cerro Verde. La estructura del presente capítulo está dividida para cada una de las matrices ambientales evaluadas.



5.1 Agua superficial

En esta sección se detalla la información relacionada con la metodología para la toma de muestras de agua, ubicación de los puntos de muestreo, aspectos relacionados al aseguramiento de la calidad y análisis de los resultados.

5.1.1 Guía utilizada para la evaluación

La metodología aplicada para la colecta de muestras de agua superficial (ríos y quebradas), se enmarcó en la sección 6 «Monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales» del «Protocolo Nacional para el Monitoreo de Calidad de Recursos Hídricos Superficiales»¹⁰, el cual establece los lineamientos generales y criterios técnicos a aplicarse en las actividades de monitoreo de la calidad de agua, logística mínima necesaria, establecimiento de los puntos de muestreo, preparación de materiales, equipos e indumentaria de protección, seguridad en el trabajo de campo, procedimiento para la toma de muestras, preservación, llenado de la cadena de custodia, almacenamiento, conservación y transporte de muestras, para su posterior análisis por un laboratorio acreditado ante el Instituto Nacional de Calidad¹¹ (Inacal) contratado por el OEFA.

5.1.2 Ubicación de puntos de muestreo

La ubicación de los puntos de muestreo fue establecida previamente en gabinete tomando como referencia los puntos declarados en los IGA del administrado, los cuales posteriormente fueron validados en la visita de reconocimiento¹².

Se realizaron 11 puntos de muestreo para evaluar la calidad de ríos y quebradas cercanos a la UP Cerro Verde en abril de 2018. En las Tablas 5-1 y 5-2, se detalla la cantidad y ubicación de los puntos muestreados por cuerpo de agua.

Tabla 5-1. Cuerpos de agua y número de puntos de muestreo evaluados

Cuenca	Unidad Hidrográfica	Cuerpo de agua	Número de puntos
Quilca-Vitor-Chili	Medio Quilca-Vitor-Chili (U.H. 1325)	Río Chili	9
		Río Mollebaya (Postrerio)	1
		Quebrada Uchumayo	1
		Total	11

Tabla 5-2. Ubicación de puntos de muestreo de agua superficial

N.º	Cuerpo de agua	Punto de muestreo	Código IGA	Coordenadas UTM WGS84 – Zona 19 K		Altitud (m s.n.m.)	Descripción
				Este (m)	Norte (m)		
Ríos							
1	Río Chili	AS-17	QECV-05	229142	8188744	2396	Ubicado en el río Chili, aguas arriba de la ciudad de Arequipa, a la altura del casino civil militar Chilina.
2		AS-16	QECV-04	226158	8181673	2223	Ubicado en el río Chili, sector del río que fluye dentro de la

¹⁰ Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales, aprobado mediante Resolución Jefatural N.º 010-2016-ANA, del 11 de enero de 2016.

¹¹ El Instituto Nacional de Calidad (INACAL) es un Organismo Público Técnico Especializado adscrito al Ministerio de la Producción, es el ente rector y máxima autoridad técnico-normativa del Sistema Nacional para la Calidad. Son competencias del Inacal la normalización, acreditación y metrología, acorde con lo previsto en las normas que regulan las materias respectivas.

¹² Informe N.º 100-2018-OEFA/DEAM-STEAC. Informe de visita de reconocimiento para el desarrollo del Plan de Evaluación Ambiental en el área de influencia de la unidad de producción Cerro Verde. Aprobado con fecha 11 de abril de 2018.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

N.º	Cuerpo de agua	Punto de muestreo	Código IGA	Coordenadas UTM WGS84 – Zona 19 K		Altitud (m s.n.m.)	Descripción
				Este (m)	Norte (m)		
							zona urbana de Arequipa, aproximadamente a 100 metros aguas arriba del puente Tingo.
3		AS-05	M-33	224559	8179090	2149	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 80 metros aguas arriba de la confluencia con el río Mollebaya (Posterior).
4		AS-02	M-34	224230	8178789	2138	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 400 metros aguas abajo de la confluencia con el río Mollebaya (Posterior).
5		AS-04	M-22	223752	8178675	2135	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 300 metros aguas abajo de la confluencia con la quebrada Huayrondo.
6		AS-01	M-19	221069	8179678	2092	Ubicado en el río Chili, a la altura de la Estación de Bombas 1, aguas abajo de la quebrada Huayrondo.
7		AS-08	QECV-03	220791	8180144	2078	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 500 metros aguas abajo de la Estación de Bombas 1.
8		AS-07	QECV-02	214969	8181832	1951	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 700 metros aguas arriba de la confluencia con la quebrada Uchumayo.
9		AS-06	QECV-01	213369	8182971	1919	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 1 km aguas abajo de la confluencia con la quebrada Uchumayo.
10	Río Mollebaya	AS-09	QECV-06	224931	8178607	2159	Ubicado en el río Mollebaya, aproximadamente a 600 metros aguas arriba de la confluencia con el río Chili.
Quebradas							
11	Quebrada Uchumayo	AS-10	QECV-07	214845	8182640	1972	Ubicado en la quebrada Uchumayo, aproximadamente a 800 metros aguas arriba de la confluencia con el río Chili.

5.1.3 Parámetros y métodos de análisis

Se seleccionaron los parámetros de campo y laboratorio considerados en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua de la normativa vigente, establecidos mediante el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM y la categoría del cuerpo de agua asignada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Sobre esta base se priorizaron los parámetros relacionados con la actividad minera.

En todos los puntos de muestreo se registraron en campo los siguientes parámetros: temperatura (T°), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), potencial redóx (ORP) y turbidez. En la Tabla 5-3, se presentan los parámetros analizados y el método de análisis empleado por el laboratorio.

Las muestras de agua fueron analizadas por laboratorios acreditados ante el Instituto Nacional de Calidad (Inacal) que proporcionaron los coolers, frascos y preservantes necesarios.

**Tabla 5-3. Parámetros y métodos de análisis en agua**

N.º	Parámetro	Método de ensayo	Descripción
1	Demanda química de oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 22nd Ed. 2012	Reflujo cerrado, método colorimétrico
2	Demanda bioquímica de oxígeno	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 22nd Ed. 2012	Incubación por 5 días
3	Sólidos suspendidos totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 22nd Ed. 2012	Sólidos suspendidos totales secados a 103-105 ° C
4	Sólidos totales disueltos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 22nd Ed. 2012	Sólidos totales disueltos secados a 180 ° C
5	Cromo hexavalente total	SMEWW Part 3500Cr-B, 22nd Ed 2012	Método colorimétrico
6	Metales totales	EPA 6020A, Rev. 1 February 2007	Espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente
7	Metales disueltos	EPA 6020A, Rev. 1 February 2007	Espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente
8	Cloruros	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-Cl- B, 22nd Ed. 2012	Método Argentométrico
9	Fluoruros	EPA METHOD 300.1, Rev 1, 1997 (validado)	Cromatografía Iónica
10	Sulfatos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-SO4(2)-E, 22nd Ed. 2012	Método turbidimétrico
11	Nitratos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-NO3- E, 22nd Ed. 2012	Método de reducción de cadmio
12	Fosfatos	EPA METHOD 365.3, 1983	Colorimétrica por ácido ascórbico, dos reactivos.
13	Carbonatos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2320 B, 22nd Ed. 2012	Método de titulación
14	Bicarbonatos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2320 B, 22nd Ed. 2012	Método de titulación
15	Acidez	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2310 B, 22nd Ed. 2012	Método de titulación
16	Alcalinidad total	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2320 B, 22nd Ed. 2012	Método de titulación
17	Dureza total	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2340 B, 22nd Ed. 2012	Método de titulación EDTA
18	Silicatos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-SiO2, D, 22nd Ed. 2012	Método del heteropolio azul

Fuente: Informes de ensayo del laboratorio ALS Perú S.A.C. – Anexo 3.

EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, SMEWW: Estándar Métodos para la Examinación de Agua y Agua Residuales, APHA-AWA-WEF: Asociación Americana de Trabajos en Agua – Salud Pública Americana – Federación Ambiental.

5.1.4 Equipos utilizados

Antes de iniciar con el desarrollo del muestreo se prepararon los materiales y equipos necesarios acorde al plan de trabajo a cubrir. Los equipos utilizados, certificados de calibración, registros de verificación y herramientas para la evaluación ambiental se detallan en el Anexo 2.

5.1.5 Aseguramiento de la calidad

Para garantizar la representatividad de los resultados, se realizó como control de calidad la toma de un duplicado, un blanco viajero y un blanco de campo, acorde a lo indicado en el protocolo citado en sección 5.1.1. Es así que, antes de salir a campo, se definió la ubicación de estos controles.

5.1.6 Criterios de comparación

El tramo del río Chili evaluado se encuentra clasificado con la Categoría 3 de acuerdo a lo establecido en la Resolución Jefatural N.º 056-2018-ANA «Clasificación de cuerpos de Agua Continentales Superficiales», asimismo, el río Mollebaya y la quebrada



Uchumayo que tributan al río Chili, asumen la categoría del recurso hídrico al que tributan¹³.

Los resultados de análisis obtenidos del muestreo de calidad de agua en ríos y quebradas fueron comparados con la norma aprobada en el instrumento de gestión ambiental del administrado¹⁴, Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (en adelante ECA agua – 2015), Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales, subcategorías D1: Riego de cultivos de tallo alto y bajo y D2: Bebida de animales, aprobado mediante Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM.

Estos resultados también fueron comparados con la norma vigente, Estándares de Calidad Ambiental para agua (en adelante ECA agua – 2017), Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales, subcategorías D1: Riego de vegetales (agua para riego no restringido y agua para riego restringido) y D2: Bebida de animales, aprobado mediante Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM.

En la Tabla 5-4, se presenta los valores de los ECA para agua Categoría 3 (en adelante Cat. 3) aprobados por Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM y Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM, donde se observa que para los parámetros evaluados los valores establecidos son los mismos en ambas normativas. En ese sentido se realizó un solo análisis de comparación ya que aplicó a ambas normativas.

Tabla 5-4. Estándares nacionales de calidad ambiental para agua Categoría 3

Categoría C						
Parámetro	Unidad	ECA para agua aprobado por Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM		ECA para agua aprobado por Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM		
		Parámetros para riego de vegetales	Parámetros para bebidas de animales	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		D1: Riego de cultivo de tallo alto y bajo	D2: Bebida de animales	Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido	Bebida de animales
Físicos - químicos						
Bicarbonatos	mg/l	518	---	518	---	
Cloruros	mg/l	500	---	500	---	
Conductividad eléctrica	(µS/cm)	2500	5000	2500	5000	
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/l	15	15	15	15	
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	40	40	40	40	
Fluoruros	mg/l	1	---	1	---	
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/l	4	5	4	5	
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 - 8,5	6,5 - 8,4	6,5 - 8,5	6,5 - 8,4	
Sulfatos	mg/l	1000	1000	1000	1000	
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	Δ 3	Δ 3	
Inorgánicos						
Aluminio	mg/l	5	5	5	5	
Arsénico	mg/l	0,1	0,2	0,1	0,2	
Bario	mg/l	0,7	---	0,7	---	

¹³ Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM, Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias.
Disposiciones Complementarias Transitorias
(...)

Tercera- De la aplicación de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua en cuerpos naturales de agua no categorizados En tanto la Autoridad Nacional del Agua no haya asignado una categoría a un determinado cuerpo natural de agua, se debe aplicar la categoría del recurso hídrico al que este tributa, previo análisis de dicha Autoridad.

¹⁴ Modificación del Estudio de Impacto Ambiental y Social de la Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde Resolución Directoral N.º 072-2016-SENACE-DCA.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Parámetro	Unidad	ECA para agua aprobado por Decreto Supremo N.° 015-2015-MINAM		ECA para agua aprobado por Decreto Supremo N.° 004-2017-MINAM		
		Parámetros para riego de vegetales	Parámetros para bebidas de animales	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		D1: Riego de cultivo de tallo alto y bajo	D2: Bebida de animales	Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido	Bebida de animales
Berilio	mg/l	0,1	0,1	0,1		0,1
Boro	mg/l	1	5	1		5
Cadmio	mg/l	0,01	0,05	0,01		0,05
Cobre	mg/l	0,2	0,5	0,2		0,5
Cobalto	mg/l	0,05	1	0,05		1
Cromo Total	mg/l	0,1	1	0,1		1
Hierro	mg/l	5	---	5		---
Litio	mg/l	2,5	2,5	2,5		2,5
Magnesio	mg/l	---	250	---		250
Manganeso	mg/l	0,2	0,2	0,2		0,2
Mercurio	mg/l	0,001	0,01	0,001		0,01
Níquel	mg/l	0,2	1	0,2		1
Plomo	mg/l	0,05	0,05	0,05		0,05
Selenio	mg/l	0,02	0,05	0,02		0,05
Zinc	mg/l	2	24	2		24

---: No presenta valor en ese parámetro para la subcategoría.

5.2 Calidad de sedimento

A continuación, se proporciona la información relacionada con la metodología desarrollada para la evaluación de la calidad de sedimento y aspectos relacionados con el análisis de los resultados obtenidos.

5.2.1 Guía utilizada para la evaluación

Se utilizó, a modo referencial, el manual técnico «Métodos para colección, almacenamiento y manipulación de sedimentos para análisis químicos y toxicológicos» de la Agencia para la Protección Ambiental de Estados Unidos (*Methods for collection, storage and manipulation of sediments for chemical and toxicological analyses: technical manual*, 2001) y el Procedimiento Operativo Estándar del Muestreo de sedimentos de la Agencia para la Protección Ambiental de Estados Unidos (Sediment Sampling, *Standard Operating Procedure - SOP*, 2016)¹⁵, detallados en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5. Referencias para el muestreo de la calidad de sedimento

Protocolo	Institución	País	Sección	Año
Manual técnico Métodos para colección, almacenamiento y manipulación de sedimento para análisis químicos y toxicológicos de la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos (<i>Methods for collection, storage and manipulation of sediments for chemical and toxicological analyses: technical manual</i> , 2001)	Agencia de Protección Ambiental EPA	Estados Unidos	Todo	2001
Procedimiento de Operación Estándar – Standard Operating Procedure (SOP). #2016, Muestreo de Sedimento, de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.				2003

5.2.2 Ubicación de puntos de muestreo

La ubicación de los puntos de muestreo de sedimento fueron los mismos puntos establecidos para agua superficial, con excepción del punto ubicado en la quebrada Uchumayo. En las Tablas 5-6 y 5-7 se muestra la cantidad de puntos de muestreo y los cuerpos de agua asociados.

¹⁵

Environmental Protection Agency (EPA). Standard Operating Procedure-SOP #2016, Sediment Sampling https://www.epa.gov/sites/production/files/documents/r8-src_eh-02.pdf.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Tabla 5-6. Cuerpos de agua asociados y número de los puntos de muestreo de sedimento

Cuenca	Unidad Hidrográfica	Cuerpo de agua asociado	Número de puntos
Quilca-Vítor-Chili	Medio Quilca-Vítor-Chili (U.H. 1325)	Río Chili	9
		Río Mollebaya (Postrerio)	1
		Total	10

Tabla 5-7. Ubicación de puntos de muestreo de sedimento

Tabla 6. Ubicación de los puntos de muestreo de los ríos de la zona						
N.º	Cuerpo de agua asociado	Punto de muestreo	Coordenadas UTM WGS84 – Zona 19 K		Altitud (m s.n.m.)	Descripción
			Este (m)	Norte (m)		
Ríos						
1	Río Chili	SD-17	229142	8188744	2396	Ubicado en el río Chili, aguas arriba de la ciudad de Arequipa, a la altura del casino civil militar Chilina.
2		SD-16	226158	8181673	2223	Ubicado en el río Chili, sector del río que fluye dentro de la zona urbana de Arequipa, aproximadamente a 100 metros aguas arriba del puente Tingo.
3		SD-05	225043	8179730	2163	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 80 metros aguas arriba de la confluencia con el río Mollebaya (Postrerio).
4		SD-02	224230	8178789	2138	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 400 metros aguas abajo de la confluencia con el río Mollebaya (Postrerio).
5		SD-04	223752	8178675	2135	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 300 metros aguas abajo de la confluencia con la quebrada Huayrondo.
6		SD-01	221069	8179678	2092	Ubicado en el río Chili, a la altura de la Estación de Bombas 1, aguas abajo de la quebrada Huayrondo.
7		SD-08	220791	8180144	2078	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 500 metros aguas abajo de la Estación de Bombas 1.
8		SD-07	214969	8181832	1951	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 700 metros aguas arriba de la confluencia con la quebrada Uchumayo.
9		SD-06	213369	8182971	1919	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 1 km aguas abajo de la confluencia con la quebrada Uchumayo.
10	Río Mollebaya	SD-09	224931	8178607	2159	Ubicado en el río Mollebaya, aproximadamente a 600 metros aguas arriba de la confluencia con el río Chili.

5.2.3 Parámetros y métodos de análisis

Se consideró el análisis granulométrico, potencial de hidrógeno (pH), materia orgánica y metales totales incluido el mercurio. En la Tabla 5-8, se presentan los parámetros y métodos de análisis.

Tabla 5-8. Parámetros evaluados y métodos de análisis

N.º	Parámetro	Método de ensayo	Descripción
1	Análisis granulométrico	PE-4041; PE-4042; PE-4043; PE-4044; PE-4045; PE-4046; PE-4047; PE-4048; PEC-018.	Densitometría
2	pH	PEC-001	Potenciometría pH



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

N.º	Parámetro	Método de ensayo	Descripción
3	Materia orgánica	ES_NOM21_AS07_MO_TOC	Determinación de materia orgánica (AS-07 Walkley y Black). (Validado) 2017.
4	Metales (+Hg)	EPA 3050 B: 1996 / EPA 6010 B: 1996. EPA 7471 B, Rev. 2, February 2007.	Mercurio en residuos sólidos y semisólidos (técnica manual de vapor frío). Digestión ácida de sedimentos / Espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente.

Fuente: Informes de ensayo de los laboratorios AGQ del Perú S.A.C.; ALS Perú S.A.C. y SGS del Perú S.A.C.;- Anexo 3.

5.2.4 Equipos utilizados

Los equipos y herramientas utilizados durante la evaluación en campo *in situ* se muestran en el Anexo 2. Se extrajo el sedimento del lecho de los cuerpos de agua, las cuales fueron colectadas en bolsas herméticas hasta completar el peso requerido, siguiendo las recomendaciones por el laboratorio acreditado.

5.2.5 Aseguramiento de la calidad

Para el aseguramiento de la calidad se consideró un duplicado que representó el 10 % de las muestras colectadas (10 muestras), para el análisis de metales en sedimento. Los resultados del aseguramiento de calidad se adjuntan en el Anexo 3.

5.2.6 Criterios de comparación

Los resultados de metales totales fueron comparados referencialmente con los valores de la guía de calidad ambiental de Canadá (CCME¹⁶) que define 2 valores límites. En la Tabla 5-9, se presentan los valores de comparación de la mencionada guía.

- *Interim Sediment Quality Guidelines* - ISQG (valores guía provisional de calidad de sedimento): representa el nivel por debajo del cual no se esperan efectos biológicos adversos sobre los macroinvertebrados bentónicos.
- *Probable Effect Level* - PEL (nivel de efecto probable): representa el nivel de concentración química por encima del cual usualmente o siempre - está asociado a efectos biológicos adversos en los macroinvertebrados bentónicos.

Tabla 5-9. Valores de comparación para la calidad de sedimento de aguas continentales

Normativa	Parámetro	Unidad	Valor ISQG	Valor PEL
<i>Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life</i>	Arsénico	mg/kg MS	5,9	17
	Cadmio	mg/kg MS	0,6	3,5
	Cobre	mg/kg MS	35,7	197
	Cromo	mg/kg MS	37,3	90
	Mercurio	mg/kg MS	0,17	0,486
	Plomo	mg/kg MS	35	91,3
	Zinc	mg/kg MS	123	315

Fuente: (CCME) Consejo Canadiense de Ministerios del Ambiente.

¹⁶

Canadian Council of Ministers of the Environment (2002). Canadian Environmental Quality Guidelines. Sediment. Quality Guidelines for Protection of Aquatic Life – Fresh water (Valores guía de calidad ambiental de Canadá para sedimentos en cuerpos de agua dulce).



5.3 Comunidades hidrobiológicas

A continuación, se presenta la información relacionada con la metodología desarrollada para la evaluación de las comunidades hidrobiológicas en abril de 2018, así como, para el análisis de los resultados obtenidos.

5.3.1 Guía utilizada para la evaluación

La evaluación de las comunidades hidrobiológicas en el río Chili y tributarios tuvo como base la guía «Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y necton (peces) en aguas continentales del Perú»¹⁷. En la mencionada guía, se establecen los criterios técnicos y lineamientos generales a aplicarse, como la logística mínima necesaria, establecimiento de los puntos de muestreo, preparación de materiales, equipos e indumentaria de protección, procedimiento para la toma de muestras, preservación, almacenamiento, conservación y transporte de muestras, entre otros.

5.3.2 Ubicación de los puntos

La ubicación de los puntos de muestreo de las comunidades hidrobiológicas fueron establecidas considerando los mismos puntos de agua superficial y sedimento, a excepción del punto ubicado en el río Chili en la Estación de Bombas 1 (AS-01, SD-01). En las Tablas 5-10 y 5-11 se muestra la cantidad de puntos de muestreo y los cuerpos de agua asociados.

Tabla 5-10. Cuerpos de agua asociados y número de puntos de muestreo de comunidades hidrobiológicas

Cuenca	Unidad Hidrográfica	Cuerpo de agua asociado	Número de puntos
Quilca-Vitor-Chili	Medio Quilca-Vitor-Chili (U.H. 1325)	Río Chili	8
		Río Mollebaya (Posterior)	1
		Quebrada Uchumayo	1
		Total	10

Tabla 5-11. Ubicación de puntos de muestreo de comunidades hidrobiológicas

N.º	Cuerpo de agua asociado	Punto de muestreo	Coordenadas UTM WGS84 – Zona 19 K		Altitud (m s.n.m.)	Descripción
			Este (m)	Norte (m)		
Ríos						
1	Río Chili	HB-17	229142	8188744	2396	Ubicado en el río Chili, aguas arriba de la ciudad de Arequipa, a la altura del casino civil militar Chilina.
2		HB-16	226158	8181673	2223	Ubicado en el río Chili, sector del río que fluye dentro de la zona urbana de Arequipa, aproximadamente a 100 metros aguas arriba del puente Tingo.
3		HB-05	225043	8179730	2149	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 80 metros aguas arriba de la confluencia con el río Mollebaya (Posterior).

¹⁷

Ministerio del Ambiente - Minam. (2014). Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y necton (peces) en aguas continentales del Perú.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

N.º	Cuerpo de agua asociado	Punto de muestreo	Coordenadas UTM WGS84 – Zona 19 K		Altitud (m s.n.m.)	Descripción
			Este (m)	Norte (m)		
4		HB-02	224230	8178789	2138	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 400 metros aguas abajo de la confluencia con el río Mollebaya (Posterior).
5		HB-04	223752	8178675	2135	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 300 metros aguas abajo de la confluencia con la quebrada Huayrondo.
6		HB-08	220791	8180144	2078	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 500 metros aguas abajo de la Estación de Bombas 1.
7		HB-07	214969	8181832	1951	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 700 metros aguas arriba de la confluencia con la quebrada Uchumayo.
8		HB-06	213369	8182971	1919	Ubicado en el río Chili, aproximadamente a 1 km aguas abajo de la confluencia con la quebrada Uchumayo.
9	Río Mollebaya	HB-09	224931	8178607	2159	Ubicado en el río Mollebaya, aproximadamente a 600 metros aguas arriba de la confluencia con el río Chili.
Quebrada						
10	Quebrada Uchumayo	HB-10	214845	8182640	1972	Ubicado en la quebrada Uchumayo, aproximadamente a 800 metros aguas arriba de la confluencia con el río Chili.

5.3.3 Parámetros y métodos de análisis

En la Tabla 5-12 se describen los parámetros evaluados en comunidades hidrobiológicas y los métodos de análisis utilizados.

Tabla 5-12. Parámetros y métodos de análisis en comunidades hidrobiológicas

N.º	Parámetros	Métodos de análisis
1	Perifiton	SMEWW 10300C, SMEWW 10300E o EPA 841-B-99-002
2	Macroinvertebrados bentónicos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF, Part 10500 C. 1, 2. Pp 10-74-10-76. 21 st Ed.
3	Peces	EPA 841-B-99-002

5.3.4 Equipos utilizados

Las herramientas y equipos utilizados para el trabajo de campo se describen en el Anexo 2.

5.3.5 Aseguramiento de la calidad

El aseguramiento de la calidad consistió en la colecta de 5 réplicas independientes para macroinvertebrados bentónicos y muestras compuestas por quintuplicado para el perifiton, de acuerdo a lo descrito en la guía «Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y



necton (peces) en aguas continentales del Perú», secciones: 4.3 perifiton, 5.3 macroinvertebrados bentónicos.

5.3.6 Análisis de datos

En esta sección se describen las comunidades hidrobiológicas en cuanto a la composición, riqueza y abundancia, índice de diversidad alfa, índice de diversidad beta y calidad ecológica; obtenidos en función de los reportes emitidos en los análisis de identificación taxonómica para el perifiton y los macroinvertebrados bentónicos. En el caso del necton sólo se consideró la composición, riqueza y abundancia debido a la escasa cantidad de individuos registrados (Anexo 3).

a) Composición, riqueza y abundancia

Se representó la clasificación taxonómica (phylum, clase, orden, familia y especie) del perifiton, macroinvertebrados bentónicos y necton (peces) en el río Chili y tributarios.

La evaluación de la riqueza y la abundancia del perifiton se desarrolló sobre la base de la categoría taxonómica «phylum»; y para los macroinvertebrados bentónicos y peces se desarrolló sobre la base de la categoría taxonómica «orden».

Los resultados se analizaron en base a la abundancia total; para esto, se utilizó el programa Excel en el que se sistematizó los nombres y números de cada especie por cada punto de muestreo; posteriormente, se realizó las representaciones mediante gráficas acumuladas por punto evaluado.

b) Diversidad alfa

Para la evaluación de diversidad de especies (diversidad alfa) se utilizaron los siguientes índices:

- Riqueza de Margalef (D)

Este índice es una medida utilizada en ecología para estimar la biodiversidad de una comunidad con base a la distribución numérica de los individuos de las diferentes especies en función del número de individuos existentes en la muestra analizada, expresada como:

$$D_{Mg} = S - 1 / \ln N \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde:

S: Número de especies presentes.

N: Número total de individuos encontrados (pertenecientes a todas las especies).

- Índice de diversidad Shannon-Wiener (H')

Para el análisis de diversidad se utilizó el índice de Shannon Wiener (H'). Es un índice basado en la abundancia relativa de especies y combina 2 propiedades de las comunidades: La riqueza o variedad de especies y la abundancia relativa de las mismas. Este es un método ampliamente usado para calcular la diversidad biótica en ecosistemas acuáticos y terrestres, y se expresa como:

$$H' = - \sum (P_i) (\log_2 P_i) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dónde:

H' = índice de diversidad de especies.

Pi = proporción del total de la muestra perteneciente a su especie i.



La expresión de Shannon Wiener mostrará valores altos cuando la zona de evaluación tenga un mayor número de especies y/o la distribución de sus abundancias sea homogénea. El valor del índice es cero en los casos en que todos los individuos recogidos pertenezcan a una sola especie (Magurran, 1987).

- Índice de diversidad verdadera (Números de Hill)

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 esto, se usó la variable N1 como la modificación del índice Shannon (H') (Jost, 2006) que tiene como fórmula:

$$N1 = \exp(H')$$

(Ecuación 3)

Donde H es el índice de Shannon; por otro lado, se usó la variable N2 como la modificación del índice de Simpson (D) (Jost, 2006) que tiene como fórmula:

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

(Ecuación 4)

- Equidad de Pielou (J')

El índice de equidad de Pielou, mide la proporción de la diversidad observada con relación a la máxima diversidad esperada. Su valor va de 0 a 1, de forma que 1 corresponde a situaciones donde todas las especies son igualmente abundantes (Pielou, 1975; Peet, 1974).

$$J' = \frac{H'}{H'_{\max}}$$

(Ecuación 5)

Donde:

J' : índice de equidad de Pielou

H' : índice de diversidad de Shannon-Wiener

H'_{\max} : $\ln(S)$

S : Número de especies

- Índice de dominancia de Simpson (λ)

Al igual que el índice de Shannon-Wiener es un índice basado en la abundancia relativa de especies, mide la probabilidad de que dos individuos seleccionados al azar de una población de N individuos, provengan de la misma especie.

$$\lambda = \sum p_i^2$$

(Ecuación 6)

Donde:

p_i : Proporción de individuos.

c) Diversidad beta

- Índice de similitud de Bray-Curtis

Para la evaluación de diversidad beta se utilizó el coeficiente de similitud de Bray-Curtis con base en la similitud de especies entre puntos de muestreo para cada comunidad hidrobiológica. Para determinar el índice de Bray-Curtis se empleó la fórmula:

$$IBC = 1 - \frac{(\sum x_i - y_i)}{(\sum x_i + y_i)}$$

(Ecuación 7)



Donde:

IBC : Índice de Bray-Curtis

x_i : Abundancia o densidad de especies i en un conjunto 1

y_i : Abundancia de las especies en el otro

Para facilitar el análisis de los valores de similitud de manera visual se procedió a la elaboración de dendogramas mediante la unión de pares promedio (Sokal y Michener, 1958); además se representó gráficamente a través del método no paramétrico de ordenamiento multidimensional (NMDS); mediante el software Paleontological Data Analysis PAST, versión 3.15 (programa estadístico PAST).

- Análisis de componentes principales (ACP)

Para determinar el gradiente de presiones que afecta a las comunidades de perifiton y macroinvertebrados bentónicos se realizó un análisis de componentes principales (ACP) utilizando la totalidad de variables ambientales medidas en los puntos de muestreo utilizando el software Paleontological Data Analysis PAST, versión 3.15. Estas variables correspondieron a los parámetros fisicoquímicos tomados *in situ*, como son, temperatura, pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica; así como, los metales considerados en el estándar de calidad ambiental para agua.

- Análisis de correspondencia canónica (ACC)

Para determinar la relación entre las variables ambientales y las comunidades hidrobiológicas del perifiton y macroinvertebrados bentónicos se realizó el análisis de correspondencia canónica (ACC) utilizando el software Paleontological Data Analysis PAST versión 3.15. Dicho análisis aportará información importante sobre el porcentaje de variabilidad de las comunidades mencionadas que podrán ser explicadas por el efecto de las variables ambientales.

Para el análisis fueron seleccionadas como variables ambientales aquellas especies que presentaron una abundancia relativa (A.R.) ≥ 3 y una frecuencia relativa (F.R.) ≥ 30 en relación con el total de puntos evaluados. Mientras que, las variables ambientales correspondieron a los parámetros de campo y metales del primer componente del ACP el cual explica mayor variabilidad de datos.

d) Índices de calidad ecológica

- Índice biótico andino (ABI)

A partir de la identificación de las muestras de macroinvertebrados bentónicos se determinó la calidad ecológica del agua utilizando el ABI (*Andean Biotic Index*), este índice fue desarrollado para ríos altoandinos (sobre los 2000 m s.n.m.) y se obtiene sumando los valores de sensibilidad de cada familia de macroinvertebrados bentónicos (Tabla 5-13) presentes 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



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Orden / Clase	Familia	Puntaje	Orden / Clase	Familia	Puntaje
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		Blepharoceridae	10
	Coenagrionidae	6	Diptera	Athericidae	10
Plecoptera	Libellulidae	6		Simuliidae	5
	Perlidae	10		Tipulidae	5
Heteroptera	Gripopterygidae	10		Ceratopogonidae	4
	Corixidae	5		Dixidae	4
	Gerridae	5		Dolichopodidae	4
	Naucoridae	5		Empididae	4
	Notonectidae	5		Limoniidae	4
	Velidae	5		Stratiomyidae	4
Trichoptera	Belostomatidae	4		Tabanidae	4
	Anomalopsychidae	10		Psychodidae	3
	Calamoceratidae	10		Chironomidae	2
	Helicopsychidae	10		Culicidae	2
	Odontoceridae	10		Ephydriidae	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 índice biótico andino (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

Se estimó el grado de perturbación de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos 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 correspondió a las familias sensibles, que presentaron 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 correspondió a las especies que se agruparon dentro de familias facultativas, que según las condiciones pueden tener un grado intermedio de sensibilidad/tolerancia (entre 4 y 7). El tercer grupo correspondió a las especies que se agruparon dentro de familias tolerantes, que presentan un bajo nivel de sensibilidad (entre 1 y 3) y que viven en ambientes alterados.

- Protocolo de calidad ecológica de ríos altoandinos

El protocolo CERA-S da 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 y 100 m de longitud del punto de muestreo se observó y valoró las siguientes características hidromorfológicas:

- Estructura y naturalidad de la vegetación de ribera
- Continuidad de la ribera
- Conectividad de la vegetación de ribera con otros elementos del paisaje
- Presencia de basura y escombros
- Naturalidad del canal fluvial
- Composición del sustrato
- Regímenes de velocidad y profundidad del río
- 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	Moderada	Moderada	Moderada	Mala	Pésima
	Pésima	Moderada	Mala	Mala	Pésima	Pésima

La sumatoria obtenida se comparó con la tabla de «estados de calidad ecológica de agua» (Tabla 5-17) propuesta por Acosta *et al.* (2009).

Tabla 5-17. Estados de calidad ecológica del agua según el ABI

Calidad	ABI
Muy bueno	> 74
Bueno	45 – 74
Moderado	27 – 44
Malo	11 – 26
Pésimo	< 11

Fuente: Acosta *et al.*, 2009.

- Índice *Biological Monitoring Working Party* (BMWP/Col)

Este índice combina el número total de taxas con un valor de tolerancia. El nivel taxonómico requerido es el de Familia y el valor final se obtiene por la sumatoria de los valores de tolerancia de cada una de las familias (Roldan, 2003), detallado en la Tabla 5-18.

**Tabla 5-18.** Puntajes de las familias de macroinvertebrados bentónicos para el índice BMWP/Col.

Familias	Puntajes
Anomalopsychidae, Atriplectididae, Blepharoceridae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Chordodidae, Gomphidae, Hidridae, Lampyridae, Lymnessiidae, Odontoceridae, Oligoneuriidae, Perlidae, Polythoridae, Psephenidae	10
Ampullariidae, Dytiscidae, Ephemeridae, Euthyplociidae, Gyrinidae, Hydrobiosidae, Leptophlebiidae, Philopotamidae, Polycentropodidae, Xiphocentronidae.	9
Gerridae, Hebridae, Helicopsychidae, Hydrobiidae, Leptoceridae, Lestidae, Palaemonidae, Pleidae, Pseudothelpusidae, Saldidae, Simuliidae, Veliidae.	8
Baetidae, Caenidae, Calopterygidae, Coenagrionidae, Corixidae, Dixidae, Dryopidae, Glossosomatidae, Hyalellidae, Hydroptilidae, Hydropsychidae, Leptohyphidae, Naucoridae, Notonectidae, Planariidae, Psychodidae, Scirtidae.	7
Aeshnidae, Ancyliidae, Corydalidae, Elmidae, Libellulidae, Limnichidae, Lutrochidae, Megapodagrionidae, Sialidae, Staphylinidae.	6
Belostomatidae, Gelastocoridae, Hydropsychidae, Mesoveliidae, Nepidae, Planorbiidae, Pyralidae, Tabanidae, Thiaridae	5
Chrysomelidae, Stratiomyidae, Haliplidae, Empididae, Dolycopodidae, Sphaeridae, Lymnaeidae, Hydraenidae, Hydrometridae, Noteridae.	4
Ceratopogonidae, Glossiphoniidae, Cyclobdellidae, Hydrophilidae, Physidae, Tipulidae.	3
Culicidae, Chironomidae, Muscidae, Sciomyzidae.	2
Tubificidae	1

Fuente: Roldán, 2003.

La Tabla 5-19 muestra el valor y calidad ecológica según el índice BMWP/Col.

Tabla 5-19. Valores y significado del índice BMWP/Col

Clase	Calidad	Valor del BMWP/Col	Calidad ecológica
I	Buena	150 101-120	Aguas muy limpias Aguas no contaminadas
II	Aceptable	61-100	Se evidencia efectos de la contaminación.
III	Dudosa	36-60	Aguas moderadamente contaminadas.
IV	Crítica	16-35	Aguas muy contaminadas.
V	Muy Crítica	15	Aguas fuertemente contaminadas, situación crítica.

- Índice EPT (Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera) %

Este índice expresa el número total de individuos de los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera, en proporción a la abundancia total encontrada. Estos insectos son considerados mayormente como organismos de aguas limpias y su presencia generalmente está relacionada a aguas de buena calidad. Se obtiene de la siguiente manera:

$$\%EPT = (Ephemeroptera + Plecoptera + Trichoptera) \times 100 / N$$

Dónde:

N= número de individuos de la muestra

El valor obtenido se comparó en un cuadro de calidad de agua (Klemm *et al.*, 1990). Valores mayores >50%, indican buena calidad de agua (Tabla 5-20).

Tabla 5-20. Escala de valores de EPT

Clase	EPT %	Calidad de agua
1	75-100	Muy Buena
2	50-74	Buena
3	25-49	Regular
4	0-24	Mala

- Índice CA (Chironomidae, Annelida) %

Este índice es generado como complemento del EPT, el índice CA está relacionado con la abundancia relativa de los dos grupos más «tolerantes» a condiciones limitantes en los ecosistemas acuáticos continentales, la familia Chironomidae (Diptera) y el Phylum Annelida. Este índice expresa el número total de individuos de la familia Chironomidae y el Phylum Annelida, en proporción a la abundancia total encontrada:

$$\%CA = (\text{Chironomidae} + \text{Annelida}) \times 100 / N$$

Dónde:

N= número de individuos de la muestra

Este índice está diseñado para complementar la información brindada por el EPT y también es de amplio uso; el índice CA es por lo general interpretado de una manera muy sencilla según la Tabla 5-21.

Tabla 5-21. Valores del índice CA

Clase	CA %	Calidad de agua
1	>50	Aguas contaminadas
2	<50	Aguas no contaminadas

- Índice EPT/CA (Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera/ Chironomidae, Annelida) %

Esta proporción determina la presencia de señales de contaminación orgánica en el agua, se calcula dividiendo el EPT porcentual por la relación de las poblaciones de Chironomidae y Annelida.

$$\text{Contaminación orgánica} = \text{EPT} / \text{CA}$$

Dónde:

EPT = Valor porcentual de Ephemeroptera, Plecoptera, y Tricoptera

CA = Valor porcentual de Chironomidae y Annelida

Se considera que si la relación EPT/CA es mayor a 1 (esto significa que la abundancia proporcional de los órdenes sensibles a contaminación es mayor que la de los grupos tolerantes) el ambiente se encuentra en buen estado, por el contrario si la relación EPT/CA es menor a 1 el sistema acuático se encuentra perturbado y se considera que el agua presenta contaminación orgánica (Tabla 5-22).

Tabla 5-22. Valores de la proporción EPT/CA %

Clase	EPT/CA %	Calidad de agua
1	>1	Aguas de buena calidad, el ambiente se encuentra en buen estado
2	<1	Aguas de mala calidad, el ambiente se encuentra perturbado, agua con contaminación orgánica

5.4 Calidad de aire

Se presenta la guía utilizada, la ubicación de las estaciones de monitoreo, los parámetros y métodos de análisis, equipos utilizados y los criterios de comparación de los resultados del monitoreo de aire realizado del 1 al 19 de setiembre de 2018.

5.4.1 Guía utilizada para la evaluación

El monitoreo de aire se realizó considerando las guías y protocolos elaborados por instituciones del estado que se detallan en la Tabla 5-23.

**Tabla 5-23.** Guías utilizadas para el monitoreo de aire

Guía o protocolo	Sección	País	Institución	Dispositivo legal	Año
Protocolo de monitoreo de Calidad de Aire y Emisiones - Subsector minería	Todo	Perú	MINEM	Resolución Ministerial N.º 315-96-EM/VMM	1996
Protocolo de monitoreo de la Calidad del Aire y Gestión de los Datos	Todo		DIGESA	Resolución Directoral N.º 1404-2005-DIGESA	2005
Calidad de aire. Método de referencia para la determinación de material particulado respirable como PM ₁₀ en la atmósfera	Todo		Indecopi	NTP 900.030	2003
Calidad del aire. Método de referencia para la determinación de material particulado fino como PM _{2,5} en la atmósfera	Todo		Indecopi	NTP 900.069	2017

5.4.2 Ubicación de las estaciones

Las estaciones de monitoreo se ubicaron de acuerdo con los lineamientos indicados en la sección 10 del Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos¹⁸; y Capítulo II del Protocolo de monitoreo de calidad de aire y emisiones - Subsector minería¹⁹. Además, se tuvo en consideración las zonas de mayor densidad poblacional y los componentes mineros evaluados como posibles fuentes de emisión de material particulado, dirección del viento y accesibilidad a las estaciones de monitoreo.

Se estableció 6 estaciones de monitoreo, la ubicación y la descripción de las estaciones se presentan en la Tabla 5-24.

Tabla 5-24. Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad de aire

N.º	Código	Tipo de estación	Coordenadas UTM WGS 84 Zona 19 K		Altitud (m s.n.m)	Descripción
			Este (m)	Norte (m)		
1	CA-02	Operacional	233445	8168811	2496	Al sureste de la futura operación del Tajo Cerro Negro, en el Banco Minero.
2	CA-07		224130	8170718	2715	Al noreste del tajo integrado, en el Chancado III (Mirador).
3	CA-09		220886	8164083	2870	Al suroeste de la UP Cerro Verde, en la cuenca San José
4	CA-06	No operacional	227717	8172870	2732	Al noreste de la UP Cerro Verde, en el Batolito de la Caldera.
5	CA-04		231062	8175452	2350	Al noreste de la UP Cerro Verde, en la azotea de la Institución Educativa Corazón de Jesús.
6	CA-08		220801	8179369	2142	Al norte de la UP Cerro Verde, en el Pueblo Joven Cerro Verde.

La estación de monitoreo CA-06, ubicado en el Batolito de la Caldera, corresponde a un área de transición entre la Cuenca Atmosférica de Arequipa y la Cuenca Atmosférica Cerro Verde²⁰, comportándose como una barrera natural que delimita el área de operaciones del área urbana, con afloramientos líticos, depósitos aluviales y eólicos,

¹⁸ Dirección General de Salud Ambiental. (2005). Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos. Perú.

¹⁹ Ministerio de Energía y Minas - Minem. (1996). Protocolo de monitoreo de calidad de aire y emisiones. Perú.

²⁰ Consejo Nacional del Ambiente. 2005. Gesta Zonal del Aire Arequipa. Plan a Limpiar el Aire: Arequipa.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

caracterizado por la presencia de flora (cactáceas y herbáceas) y fauna silvestre propios de la zona. No se evidenció un uso agropecuario ni urbano en esta área.

5.4.3 Parámetros y métodos de análisis

Para la selección de los parámetros, se consideró lo indicado en la sección 7 del Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos²¹, y los Estándares de calidad ambiental (ECA) para aire²². Además, se consideró los parámetros asociados a los componentes mineros como posibles fuentes de afectación. En la Tabla 5-25, se presentan los parámetros analizados y métodos de análisis.

Tabla 5-25. Parámetros analizados en aire

N.º	Parámetro	Método de ensayo	Descripción
1	Material particulado menor a 10 micras (PM ₁₀) con filtro cuarzo	EPA/625/R-96/010a-Compendium Method IO-3.1, Item 4 y 5 (excepto 5.1.1, 5.2.3.7 y 5.3) June 1999.(validado)	Gravimetría
2	Material particulado menor a 2,5 micras (PM _{2,5}) con filtro teflón	EPA, 40 CFR 50 AppendixL Item 6 y 8 2006 (validado)	Gravimetría
3	Metales en material particulado menor a 10 micras (PM ₁₀)	EPA IO-3.5, June 1999	Espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)
4	Análisis mineralógico de material particulado menor a 10 micras (PM ₁₀)	Microscopia electrónica	Microscopía electrónica de barrido, con énfasis en el análisis químico por rayos X

Fuente: Informes de ensayo de los laboratorios AGQ del Perú S.A.C.; ALS Perú S.A.C.; J Ramón del Perú S.A.C.; Bizalab S.A.C. – Anexo 3 y Anexo 5

Nota: El laboratorio solo determinó el peso de los filtros con y sin muestra, el cálculo se realizó por el personal de OEFA.

EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

Asimismo, se realizó el registro meteorológico, el cual contempló la medición de los parámetros tales como, dirección y velocidad del viento, temperatura, presión atmosférica y humedad relativa. Dichas mediciones se realizaron durante todo el período de monitoreo de la calidad del aire.

Las velocidades de los vientos fueron clasificados tomando como referencia la escala de Beaufort (Tabla 5-26).

Tabla 5-26. Escala de velocidades de los vientos según Beaufort (2008)

Número de la escala Beaufort y descripción		Equivalencia de la velocidad del viento a una altura estándar de 10 m sobre terreno llano y despejado (m/s)	Especificaciones para estimar la velocidad sobre tierra
0	Calma	0 – 0,2	Calma, el humo asciende verticalmente
1	Ventolina	0,3 – 1,5	Se define la dirección del viento por la deriva del humo y no por las veletas
2	Brisa ligera	1,6 – 3,3	El viento se siente en la cara; se mueven las hojas de los árboles; el viento mueve las veletas
3	Brisa suave	3,4 – 5,4	Las hojas y ramas pequeñas se hallan en constante movimiento; ondean las banderas livianas
4	Brisa moderada	5,5 – 7,9	Se levantan polvo y papeles sueltos; se mueven las ramas pequeñas de los árboles
5	Brisa fresca	8,0 – 10,7	Los árboles pequeños con hojas empiezan a moverse; se forman

²¹ Dirección General de Salud Ambiental. (2005). Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos. Perú.

²² Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM. Aprueban estándares de calidad ambiental (ECA) para aire.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Número de la escala Beaufort y descripción		Equivalencia de la velocidad del viento a una altura estándar de 10 m sobre terreno llano y despejado (m/s)	Especificaciones para estimar la velocidad sobre tierra
			pequeñas olas en estanques y lagunas
6	Brisa fuerte	10,8 – 13,8	Se mueven las ramas grandes de los árboles; silban los cables telegráficos; los paraguas se usan con dificultad
7	Viento fuerte	13,9 – 17,1	Todos los árboles se mueven; es difícil caminar contra el viento
8	Viento duro	17,2 – 20,7	Se rompen las ramas delgadas de los árboles; generalmente es difícil caminar contra el viento
9	Viento muy duro	20,8 – 24,4	Se producen ligeros daños estructurales (caen chimeneas y tejas)
10	Temporal	24,5 – 28,4	Se experimenta raramente tierra adentro; arranca árboles; hay daños estructurales considerables
11	Borrasca	28,5 – 32,6	Muy poco frecuente; ocasiona daños generalizados
12	Huracán	32,7 y superior	-

Fuente: Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos (2008)

Finalmente, se registró *in situ*, las presiones diferenciales al inicio y término de un período de 24 ± 1 horas de muestreo, para realizar los cálculos correspondientes (Anexo 2).

5.4.4 Equipos utilizados

Los equipos fueron instalados siguiendo los criterios técnicos del «Protocolo de monitoreo de calidad de aire y gestión de datos» de la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), manteniendo las distancias adecuadas a obstáculos, la altura adecuada para el ingreso de la muestra de aire a los analizadores y para la medición de parámetros meteorológicos.

Los equipos, certificados de calibración, registros de verificación y herramientas utilizadas se detallan en el Anexo 2.

5.4.5 Aseguramiento de calidad

El aseguramiento de la calidad consideró lo señalado en las secciones 13.1, (calibraciones); 13.2 (trazabilidad); 13.3 (manejo y transporte de muestras) del Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos²³.

5.4.6 Criterios de comparación

Los resultados obtenidos de material particulado menor a 10 micras (PM_{10}) y material particulado menor a 2,5 micras ($PM_{2,5}$) colectados en las estaciones de calidad de aire no operacionales (CA-04, CA-06 y CA-08) fueron comparados con la norma aprobada en el IGA²⁴ (Decreto Supremo N.º 074-2001-PCM para PM_{10} , Decreto Supremo N.º 003-2008-MINAM para $PM_{2,5}$ y de manera referencial con la Resolución Ministerial N.º 315-96-EM/VMM), con la norma vigente (Decreto Supremo N.º 003-2017-MINAM), y con los valores históricos registrados en cada estación.

²³ Dirección General de Salud Ambiental. (2005). Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos. Perú.

²⁴ Estudio de Impacto Ambiental del proyecto «Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde» aprobado mediante Resolución Directoral N.º 403-2012-MEM-AAM.



Para las estaciones de monitoreo operacionales (CA-09, CA-07 y CA-02) fueron comparados con los valores históricos registrados en cada estación y de manera referencial con la Resolución Ministerial N.º 315-96-EM/VMM tal como indica el IGA²⁵.

Los resultados de metales contenidos en el material particulado menor a 10 micras fueron comparados con la norma de calidad ambiental de Canadá *Ontario's Ambient Air Quality Criteria Standards*, 2012 (en adelante AAQC) porque el Perú no cuenta con estándares de calidad ambiental para promedio de 24 horas (Tabla 5-27)

Tabla 5-27. Estándares de calidad para metales en aire de acuerdo a los criterios de calidad ambiental de Canadá

Contaminante	AAQC (µg/m³)	Tiempo promedio
Antimonio y compuestos de antimonio	25	24 horas
Arsénico y compuestos de arsénico	0,3	
Berilio y compuestos de berilio	0,01	
Boro	120	
Cadmio y compuestos de cadmio	0,025	
Cobalto	0,1	
Cobre	50	
Cromo y compuestos	0,5	
Hierro (metálico)	4	
Plomo y compuestos de plomo	0,5	
Manganeso y compuestos de manganeso	0,2	
Mercurio (Hg)	2	
Molibdeno	120	
Níquel y compuestos de níquel	0,1	
Selenio	10	
Plata	1	
Estroncio	120	
Estaño	10	
Titanio	120	
Uranio y compuestos de uranio	0,15	
Vanadio	2	
Zinc	120	

Fuente: *Ontario's Ambient Air Quality Criteria Standards*, 2012.

5.4.7 Procesamientos de datos

En campo se registró las presiones diferenciales al inicio y término de cada periodo de 24±1 horas, esto para realizar los siguientes cálculos:

a. Determinación de material particulado (PM₁₀)

Para la determinación de material particulado PM₁₀, se calculó el flujo promedio durante el periodo de monitoreo corregido a condiciones de referencia o estándar (25°C; 101,3 kPa) según la siguiente ecuación:

$$Q_{std} = Q_a \left(\frac{P_{av}}{P_{std}} \right) \left(\frac{T_{std}}{T_{av}} \right) \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

Q_{std} : Flujo promedio a condiciones de referencia (25 °C; 101,3 kPa)
m³/min

Q_a : Flujo promedio a condiciones ambientales, m³/min

P_{av} : Presión barométrica promedio (kPa o mm de Hg)

T_{av} : Temperatura ambiente promedio (K)

T_{std} : Temperatura estándar, definida como 298 K

P_{std} : Presión estándar, definida como 101,3 kPa o 760 mm de Hg

²⁵

Estudio de Impacto Ambiental del proyecto «Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde» aprobado mediante Resolución Directoral N.º 403-2012-MEM-AAM.



Una vez calculado el flujo promedio, se calculó el volumen total de aire muestreado mediante la siguiente ecuación:

$$V_{std} = (Q_{std})(t) \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

V_{std} : Total de aire muestreado en unidades patrón de volumen (m^3)
 t : Tiempo de muestreo (min)

Se calculó las concentraciones de material particulado en unidades de masa por unidad de volumen de los resultados de pesos en los filtros de PM_{10} determinados por el laboratorio de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$PM_{10} = (W_f - W_i) \times 10^6 / V_{std} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

PM_{10} : Concentración másica de material particulado ($\mu g/std \ m^3$)
 $W_f - W_i$: Peso final y peso inicial del filtro colector de partículas (g)

b. Determinación de metales en material particulado (PM_{10})

Se determinaron las concentraciones de metales en filtros PM_{10} según la siguiente ecuación:

$$C_{metal} = (W_{metal}) \times 10^6 / V_{std} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

C_{metal} : Concentración del metal ($\mu g/std \ m^3$)
 W_{metal} : Peso del metal (g)
 V_{std} : Total de aire muestreado en unidades patrón de volumen (m^3)

c. Determinación de material particulado ($PM_{2,5}$)

El volumen total (en m^3 a condiciones reales) y el tiempo transcurrido se obtuvo del equipo de muestreo²⁶, se verificó y se ajustó el flujo volumétrico de succión del equipo con un medidor de flujo digital externo con una exactitud de 2 % del valor esperado²⁷ para asegurar que sea 16,67 l/min.

Se calculó las concentraciones de material particulado en unidades de masa por unidad de volumen de los resultados de pesos en los filtros de $PM_{2,5}$ determinados por el laboratorio de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$PM_{2,5} = (W_f - W_i) \times 10^6 / V_a \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

$PM_{2,5}$: Concentración másica de material particulado ($\mu g/m^3$)
 $W_f - W_i$: Peso final y peso inicial del filtro colector de partículas (g)
 V_a : Volumen total de aire muestreado, a condiciones reales de muestreo

²⁶ Reference Method for the Determination of Fine Particulate Matter as $PM_{2.5}$ in the Atmosphere. Appendix L to Part 50-10.11.

²⁷ Reference Method for the Determination of Fine Particulate Matter as $PM_{2.5}$ in the Atmosphere. Appendix L to Part 50-9.2.2

**d. Modelo de Factorización de Matrices Positiva (PMF)**

La aplicación de un modelo receptor permitió determinar y cuantificar las fuentes de mayor contribución de material particulado en su fracción PM₁₀.

Para lo cual, se consideró no incluir en los cálculos aquellos resultados que fueron reportados por debajo del límite de detección y menores al límite de cuantificación, que debido a su baja fiabilidad podrían distorsionar los resultados, así como las posteriores conclusiones.

De acuerdo a los criterios mencionados, los elementos que se consideraron para el análisis en PMF, fueron: Al, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Si, Sr, Ti y Zn.

A partir de los resultados del análisis de material particulado para los elementos indicados, se construye una matriz de concentraciones [X], en la suma del producto de dos matrices, una de contribuciones de factores [G] y otra de perfil de factores [F], más una matriz de residuos o errores [E].

El modelo receptor consiste en encontrar las matrices G (contribución de factores) y F (perfil de factores) que permiten reproducir la siguiente ecuación de la matriz X (Hopke, 2000; Hopke, 2003).

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

X_{ij} : Concentración en el receptor de la especie j en la muestra i

g_{ik} : Contribución del factor k en el día i (carga factorial)

f_{ik} : Factor k para la especie química j

e_{ij} : Residual de la especie química j en la muestra i

p: Número de factores

La solución de la Ecuación (x) se realiza mediante una iteración en el que se va modificando los perfiles de las fuentes f_{ik} y las contribuciones g_{ik} de fuentes de manera alternada.

Seguidamente, la matriz G se usa para calcular los residuos x-GF y se procedió a mejorar los perfiles de las fuentes f_{ik} , mediante regresión lineal multivariable, para hallar mejores valores.

La iteración se realiza hasta que se alcanza un mínimo de la función objetivo dado por la expresión (Paatero & Tapper, 1994).

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{X_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj}}{\sigma_{ij}} \right] \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

σ_{ij} : Error de la medición X_{ij}

El número de muestras a recolectar en cada estación de monitoreo se definió en base al número de datos requeridos para la aplicación posterior del modelo de receptores. Se utilizó la ecuación formulada por Henry (1991).

$$N > 30 + \left(\frac{V+3}{2} \right) \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde:

N: Número mínimo de muestras a obtener.

V: Número de variables a determinar sobre el material particulado (especies químicas que son objeto de análisis)

5.5 Agua subterránea

A continuación, se proporciona la información relacionada con la metodología de toma de muestras de agua subterránea y aspectos relacionados con el análisis de los resultados obtenidos.

5.5.1 Guía utilizada para la evaluación

Debido a que no se cuenta con un protocolo nacional para el monitoreo y evaluación de agua subterránea, se utilizó las referencias indicadas en la Tabla 5-28.

Tabla 5-28. Referencias normativas para evaluación de la calidad del agua subterránea

Guía o protocolo	Sección	País	Institución	Año
Manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados muestreo de aguas subterráneas	Parte 2	Perú	Ministerio del Ambiente (Minam)	1996
National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data (NFM). Book 9	Capítulos del A1 al A6	Estados Unidos	U.S. Geological Survey	2005
Guía para la toma, conservación y transporte de muestras de agua subterránea. Versión 1.	Toda la guía	Uruguay	Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA)	2003

5.5.2 Ubicación de puntos

Los puntos de muestreo de agua subterránea fueron ubicados tomando como referencia los puntos declarados en los IGA²⁸, y fueron complementados con puntos establecidos en gabinete y validados mediante una visita de reconocimiento realizada del 17 al 28 de febrero del 2018, tomándose en consideración algunos criterios técnicos, como los que se detallan a continuación:

- Aguas abajo de los componentes mineros
- Cercanía a posibles fuentes de contaminación
- Redes de monitoreo ambiental contemplados en los instrumentos de gestión ambiental de SMCV
- Redes de monitoreo hidrogeológico contemplados en los estudios hidrogeológicos de SMCV
- Estructuras geológicas existentes

La distribución de puntos de muestreo de agua subterránea se detallan en la Tabla 5-29.

Tabla 5-29. Distribución de puntos de muestreo de agua subterránea

Microcuenca	Zona	Componente minero	Cantidad de puntos / Códigos	
			Abril y mayo 2018	Julio 2018
Quebradita Enlozada Tinajones	Zona I	Depósito de relaves Enlozada	29	19
			ASB-96, ASB-08, ASB-05, ASB-90, ASB-02, ASB-85, ASB-112, ASB-79, ASB-80, ASB-78, ASB-82, ASB-106, ASB-102, ASB-03, ASB-103, ASB-15, ASB-98, ASB-91, ASB-110, ASB-101, ASB-107, ASB-108, ASB-109, ASB-92, ASB-113, ASB-46, ASB-94, ASB-99, ASB-95	ASB-08, ASB-05, ASB-90, ASB-02, ASB-85, ASB-03, ASB-103, ASB-15, ASB-98, ASB-108, ASB-94, ASB-14, ASB-26, ASB-83, ASB-97, ASB-115, ASB-117 y ASB-118, ASB-120.
Linga	Zona II		10	8

²⁸

Modificación del Estudio de Impacto Ambiental y Social de la Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde Resolución Directoral N.º 072-2016-SENACE-DCA.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Microcuenca	Zona	Componente minero	Cantidad de puntos / Códigos	
			Abril y mayo 2018	Julio 2018
		Depósito de relaves Linga	ASB-52, ASB-51, ASB-54, ASB-53, ASB-40, ASB-55, ASB-50, ASB-48, ASB-74, ASB-111	ASB-53, ASB-40, ASB-55, ASB-48, ASB-111, ASB-114, ASB-116 y ASB-119
		Pad 4A, Pad 4B, PAD I, presa Huayrondo	17	6
Huayrondo Siete Vueltas	Zona III	Depósito desmonte de mina Noreste Depósito desmonte de mina Sureste Tajo integrado Tajos Cerro Negro Depósito desmonte de mina Cerro Negro	ASB-17, ASB-23, ASB-60, ASB-61, ASB-21, ASB-22, ASB-58, ASB-62, ASB-19, ASB-25, ASB-56, ASB-20, ASB-16, ASB-67, ASB-88, ASB-24A y ASB-68.	ASB-17, ASB-60, ASB-61, ASB-22, ASB-67 y ASB-88,
Tinajones San José Cerro Verde	Zona IV	Depósito desmonte de mina Oeste Depósito desmonte de mina Suroeste	5 ASB-75, ASB-43, ASB-71, ASB-64 y ASB-63	- -

De acuerdo a lo mencionado líneas arriba se plantearon 72 puntos de muestreo para agua subterránea entre los meses de abril, mayo y julio 2018. Del total de puntos solo 22 fueron muestreados en dos oportunidades. Las coordenadas de los puntos de muestreo del agua subterránea se detallan en el Anexo 2.

5.5.3 Parámetros y métodos de análisis

En la selección de los parámetros correspondientes a la evaluación de calidad de agua subterránea se priorizó aquellos que estén relacionados con las actividades de explotación y/o beneficio de yacimientos mineros polimetálicos, así como parámetros adicionales que permitieron una mejor interpretación de los resultados.

En todos los puntos de muestreo se analizaron *in situ* los parámetros de campo como temperatura, potencial hidrógeno (pH), conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y potencial redox (ORP).

La Tabla 5-30 presenta los parámetros y metodologías de los análisis en agua subterránea, a través de un laboratorio acreditado por el INACAL.

Tabla 5-30. Parámetros y métodos de análisis en agua subterránea

N.º	Parámetro	Método de ensayo	Descripción
1	Sólidos suspendidos totales	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 22nd Ed. 2012	Sólidos suspendidos totales secados a 103-105 ° C
2	Sólidos totales disueltos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 22nd Ed. 2012	Sólidos totales disueltos secados a 180 ° C
3	Sulfuros	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-S2- D, 22nd Ed. 2012	Método de azul de metileno
4	Metales totales	EPA 6020A, Rev. 1 February 2007	Espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente
5	Metales disueltos	EPA 6020A, Rev. 1 February 2007	Espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente
6	Cloruros	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-Cl- B, 22nd Ed. 2012	Método Argentométrico
7	Fluoruros	EPA METHOD 300.1, Rev 1, 1997 (validado)	Cromatografía Iónica
8	Sulfatos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-SO4(2)-E, 22nd Ed. 2012	Método tubidimétrico
9	Nitratos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-NO3- E, 22nd Ed. 2012	Método de reducción de cadmio



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

N.º	Parámetro	Método de ensayo	Descripción
10	Fosfatos	EPA METHOD 365.3, 1983	Colorimétrica por ácido ascórbico, dos reactivos.
11	Carbonatos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2320 B, 22nd Ed. 2012	Método de titulación
12	Bicarbonatos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2320 B, 22nd Ed. 2012	Método de titulación
13	Acidez	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2310 B, 22nd Ed. 2012	Método de titulación
14	Alcalinidad total	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2320 B, 22nd Ed. 2012	Método de titulación
15	Dureza total	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2340 B, 22nd Ed. 2012	Método de titulación EDTA
16	Silicatos	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-SiO ₂ , D, 22nd Ed. 2012	Método del heteropolio azul
17	Bromuros	EPA METHOD 300.1, Rev 1, 1997 (validado) 2015	Cromatografía iónica

Fuente: Informes de ensayo de los laboratorios ALS Perú S.A.C. – Anexo 3.

EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, SMEWW: Estándar Métodos para la Examinación de Agua y Agua Residuales, APHA-AWA-WEF: Asociación Americana de Trabajos en Agua – Salud Pública Americana – Federación Ambiental.

5.5.4 Equipos utilizados

Los equipos utilizados fueron el medidor de nivel freático, multiparámetros, una bomba sumergible y GPS, además de baiders, filtros tipo jeringa para el análisis de metales disueltos, entre otros materiales detallados en el Anexo 2.

5.5.5 Aseguramiento de calidad

Se realizó como control de calidad con la toma de 9 muestras duplicadas, 2 blancos viajeros y 2 blancos de campo, acorde a lo indicado en el protocolo citado en la Tabla 6-27. Los resultados del aseguramiento de calidad se adjuntan en el Anexo 3.

5.5.6 Colección de la muestra

Para la toma de muestra se utilizó baiders descartables por cada punto de muestreo o bombas sumergibles, dependiendo del nivel de agua del piezómetro o su diámetro, considerándose para ello los protocolos y guías indicadas en la Tabla 6-27. La muestra se colectó en frascos de plástico, los cuales fueron enjuagados 3 veces con el agua a ser colectada. Luego, se adicionó preservante solo para aquellos parámetros que lo requerían, según indicaciones del laboratorio contratado. Finalmente, todas las muestras fueron almacenadas en *coolers* (cajas térmicas) y conservadas con *ice-packs* (hielo gel) para trasladarlas al laboratorio respectivo, junto con las cadenas de custodia.

5.5.7 Análisis de datos

Se consideró aquellos parámetros que presentaron los mayores valores en las posibles fuentes de alteración, tales como los depósitos de relaves y depósitos de desmonte de mina, además, aquellos parámetros que podrían migrar desde los componentes mencionados hacia el agua subterránea²⁹, y se excluyeron aquellos parámetros que en

²⁹

Schlumberger Water Services (Perú) S.A. 2011. Estudio hidrogeológico del área de la faena Cerro Verde. Pág. 70 -74.



la mayoría de puntos evaluados presentaron valores por debajo del límite de detección del método del laboratorio.

Complementariamente los resultados del muestreo de agua subterránea fueron comparados con la serie de tiempo obtenida del monitoreo histórico³⁰ (de aquellos piezómetros que cuenten con información previa), debido a que no se cuenta con estándares nacionales de calidad ambiental para agua subterránea.

5.6 Caracterización geológica

La caracterización geológica consistió en la descripción litológica, estructural, alteraciones y mineralización en zonas aledañas a los componentes mineros (depósitos de relaves Linga, Enlozada y la presa Huayrondo).

5.6.1 Guías utilizadas para la evaluación

Los estándares o protocolos tomados como referencia para la caracterización geológica corresponden a los servicios geológicos del Perú, Colombia y Estados Unidos, además, las recomendaciones mencionadas en las guías y manuales internacionales que se listan en la Tabla 5-31.

Tabla 5-31. Referencias para la caracterización geológica

Autoridad emisora / autor	País	Referencia	Año
Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET)	Perú	Manual de estándares de cartografía para la digitalización de los mapas geológicos CGN a escala 1:100 000	2016
Richard J. Lisle, Peter Brabham, y John Barnes	Reino unido	Basic Geological Mapping	2011
Angela L. Coe, Tom W. Argles, David A. Rothery y Robert A. Spicer	Reino unido	Geological field techniques	2010
Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, en inglés <i>United States Geological Survey</i>)	Estados Unidos	FGDC Digital Cartographic Standard for Geological Map Symbolization	2006
Richard J. Lisle	Reino unido	Geological Structures and Maps	2004
Servicio Geológico Colombiano (INGEOMINAS)	Colombia	Estándares cartográficos y de manejo de información gráfica para mapas geológicos	2001

Las referencias de la geología regional corresponden a los Boletines N.º 19 y N.º 24 correspondientes a los cuadrángulos de Mollendo y La Joya, y Arequipa (García, 1968), además de la carta geológica nacional a escala 1:100 000 y 1:50 000 del INGEMMET. La referencia local corresponde a los estudios realizados y mencionados en los instrumentos de gestión ambiental.

5.6.2 Ubicación de puntos

La caracterización geológica se realizó en áreas circundantes a los depósitos de relaves Linga, Enlozada y la presa Huayrondo. Los puntos de control geológico fueron ubicados estratégicamente considerando las formaciones geológicas donde se emplazan los componentes mineros mencionados y los piezómetros evaluados. El detalle de los puntos de control geológico se encuentran en el Anexo 2.

5.6.3 Parámetros y método de análisis

Las mediciones y descripciones macroscópicas de afloramientos rocosos se realizaron *in situ*, se tomaron datos de rumbo/azimut, buzamiento y dirección de buzamiento de estratos (EN), fallas geológicas (FA), diaclasas (DI), fracturas (FR), estructuras

³⁰

Modificación del Estudio de Impacto Ambiental y Social de la Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde Resolución Directoral N.º 072-2016-SENACE-DCA.



geológicas (EG: diques y venillas). La descripción macroscópica consistió en determinar la litología, minerales de alteración, minerales primarios, secundarios y accesorios.

Los puntos de control geológico y el mapa de campo fueron georreferenciados y digitalizados en el software ArcGis 10.3 para preparar el mapa geológico local. Además, se generó secciones geológicas a escala 1:10 000, con la finalidad de conocer la disposición estratigráfica de las rocas en profundidad, usando la litología de perforaciones realizadas en la UP Cerro Verde³¹.

5.6.4 Equipos utilizados

Los equipos y herramientas utilizados para la caracterización geológica se detallan en el Anexo 2.

5.6.5 Análisis de datos

Los criterios de evaluación utilizados para la caracterización se detallan a continuación.

- Mapa geológico local

Los datos obtenidos en el cartografiado de campo fueron interpretados y plasmados en un mapa geológico local, el mismo que contiene las unidades litológicas, litoestratigráficas, estructurales (diacclasas, fracturas, fallas, pliegues, diques, etc.) y alteraciones. Se generaron secciones geológicas relacionadas a los componentes mineros y ambientales, así como también, la información detallada de cada litología.

- Relación con los puntos de muestreo de agua subterránea

La caracterización geológica nos permitió entender la asociación de la mineralogía de las rocas con los parámetros físicos (pH, CE y OD) y químicos de las aguas subterráneas; además, se logró entender las características hidroquímicas y el contexto hidrogeológico en función a las estructuras y litopermeabilidad.

- Geoquímica de rocas

La base de datos de litogeoquímica del INGEMMET (elementos mayores y trazas) y los estudios geoquímicos (estáticos y cinéticos) realizados en los EIA de la UP Cerro Verde, complementaron la información obtenida en campo, siendo asociada a las unidades litoestratigráficas y analizadas mediante diagramas de concentración y métodos de dispersión de metales.

5.7 Caracterización de roca

El muestreo de roca tomó en consideración la ubicación de los depósitos de relaves Linga y Enlozada, de las líneas de tomografía geoelectrica, y de los puntos de muestreo de agua subterránea (piezómetros) de la UP Cerro Verde.

5.7.1 Guías utilizadas para la evaluación

Los estándares para el muestreo de roca fueron tomados del servicio geológico del Perú y Chile, además, se tomó en consideración las recomendaciones establecidas en los libros, guías y manuales internacionales de manera referencial indicados en la Tabla 5-32.

³¹

Información proporcionada por SMCV (Item 2 - Diseño de piezómetros). Hoja de tramite E-01-085237 del 22 de octubre del 2018.

**Tabla 5-32.** Referencias para la caracterización geoquímica de roca

Título	Autor	País	Año
Manual de inventario de recursos minerales	Dirección De Recursos Minerales Y Energéticos de INGEMMET	Perú	2013
Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras	Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)	Chile	2015
Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials	Natural Resource Canada CANMET- Mining and Mineral Sciences Laboratories Smithers VOJ 2N0	Canadá	2009
Manual de muestreo para exploración, minería subterránea y rajo abierto	Angel Lambert B.	Chile	2006
Introducción al muestreo minero	Marco Antonio Alfaro Sironvalle	Chile	2002

5.7.2 Ubicación de puntos de muestreo

Se realizó el muestreo de roca acompañado de cartografiado geológico local con la finalidad de conocer el potencial de lixiviación de elementos en condiciones naturales, para lo cual se extrajeron muestras en afloramientos con presencia de oxidación y roca fresca. En la Tabla 5-33 se muestra la cantidad de puntos de muestreo asociado a su respectiva unidad litológica.

Tabla 5-33. Ubicación de puntos de muestreo para la caracterización geoquímica de roca

N.º	Código OEFA	Coordenadas UTM WGS 84 – Zona 19 K		Altitud (m s.n.m.)	Descripción
		Este (m)	Norte (m)		
1	RE-1	220653	8173446	2660	Afloramiento de caliza mudstone perteneciente a la formación Socosani, ubicado al oeste del depósito de relaves Enlozada, estribo izquierdo.
2	RE-2	220638	8173474	2665	Afloramiento de granodiorita perteneciente a la formación Tiabaya, ubicado al oeste del depósito de relaves Enlozada, estribo izquierdo.
3	RE-3	220707	8173823	2641	Afloramiento de dique andesítico, ubicado al oeste del depósito de relaves Enlozada, estribo izquierdo.
4	RL-1	222158	8162131	2520	Afloramiento de monzodiorita ferromagnésiana, ubicado al suroeste del depósito de relaves Linga.
5	RL-2	221616	8161489	2646	Afloramiento de monzodiorita, ubicado al suroeste del depósito de relaves Linga.
6	RL-3	222107	8160692	2342	Afloramiento de monzonita, ubicado al suroeste del depósito de relaves Linga.

5.7.3 Parámetros y métodos de análisis

En la Tabla 5-34, se presentan los parámetros evaluados y métodos de análisis.

Tabla 5-34. Parámetros analizados en las muestras de roca

N.º	Parámetro	Método de ensayo	Descripción
1	Metales incluido mercurio	EPA 3050 B: 1996 / EPA 6010 B: 1996. EPA 7471 B, Rev. 2, February 2007.	Espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente con detector de masa
2	Extracción de metales por la metodología de Tessier	ES_NOM21_AS07_MO_TOC	Espectrofotómetro de emisión óptico con plasma acoplado inductivamente
3	Sulfuros	PE-4016	Análítica elemental
4	Sulfatos	PE-4005	Análítica elemental
5	Cloruros	NOM-021-RECMAT-2000	Análítica elemental
6	pH	PEC-001	Potenciometría pH
7	SPLP metales: Synthetic precipitación Leaching procedure	PE-4412	Espectrofotómetro de emisión óptico con plasma acoplado inductivamente
8	ABA: Balance ácido base	PE-4408, PE-4416, PE-4407, PE-4402, PE-4409	Análítica elemental, inspección visual, electrometría, volumetría y cálculos.
9	Análisis mineralógico	Difracción de rayos X	Análisis mineralógico con énfasis en arcillas mediante la metodología de etilenglicol Base de datos del Centro Internacional de Datos para Difracción (ICDD)



N.º	Parámetro	Método de ensayo	Descripción
			Método de Refinamiento Rietveld (TOPAS Structure Database y Fiz Karlsruhe ICSD)
10	Shake Flask Extraction	EPA 300.1, Rev 01, 2014	Cromatografía iónica

Fuente: Informes de ensayo de los laboratorios AGQ del Perú S.A.C.; ALS Perú S.A.C.; J Ramón del Perú S.A.C.; Bizalab S.A.C. – Anexo 3.

5.7.4 Análisis de datos

El análisis de la caracterización geoquímica de roca se realizó mediante la descripción y análisis de la composición mineralógica y el contenido de metales totales (ICP-OES), de cada zona evaluada. La caracterización de cada litología fue complementada con la prueba estática de balance ácido-base (ABA). Además, se realizó la evaluación de metales solubles a través del método de extracción secuencial según la metodología de Tessier, el cual consideró en su técnica original los siguientes elementos: cadmio, cobalto, cobre, níquel, plomo, zinc, hierro y manganeso; esta prueba permitió caracterizar la potencial movilidad y biodisponibilidad de ciertos elementos y su posible relación con los puntos de monitoreo de agua subterránea.

Se empleó las pruebas de SPLP (*Synthetic Precipitation Leaching Procedure*) para representar la posible movilidad de analitos inorgánicos (metales) presentes en las formaciones geológicas asociadas a los depósitos de relaves. Finalmente, se complementó el análisis con la prueba de lixiviación *shake flask extraction* para aniones, el cual consistió en un análisis con agua ultra pura, que determinó los aniones fácilmente solubles a pH neutro.

5.8 Caracterización de componentes mineros

Se detalla las guías utilizadas, la ubicación de los puntos de control, los equipos utilizados y el procesamiento de datos de la caracterización de componentes mineros en el área de influencia de la UP Cerro Verde.

5.8.1 Guía utilizada para la evaluación

Las referencias para la caracterización de componentes mineros se detallan en la Tabla 5-35.

Tabla 5-35. Guías utilizadas para la caracterización de componentes mineros

Guía o protocolo	País	Institución o fuente	Año
Protocolo de monitoreo de calidad de agua sub sector - minería	Perú	Resolución 004-94-EM/DGAA. Ministerial Energía y Minas	1994
Guía Metodológica para Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras.	Chile	SERNAGEOMIN (Ministerio de Minería) Gobierno de Chile	2015

5.8.2 Ubicación de puntos de muestreo

La determinación de los puntos de muestreo para los componentes mineros se realizó considerando los lineamientos de la guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras (Sernageomin, 2015). La ubicación de puntos de muestreo de componentes mineros como los depósitos de desmonte de mina y depósitos de relaves.

En los depósitos de relaves Linga y Enlozada se realizó la toma de muestra en el agua del sobrenadante, en superficie (A) y fondo (B), además, del muestreo en la pulpa de relave (fracción fina), el detalle se presenta en las Tablas 5-36 y 5-37.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Tabla 5-36. Ubicación de puntos de muestreo en agua del sobrenadante de los depósitos de relaves

Código OEFA	Nivel de muestreo	Coordenadas UTM WGS 84 – Zona 19 K		Altitud (m s.n.m.)	Descripción
		Este (m)	Norte (m)		
Depósito de relaves Linga					
DRL-AG-01A	Superficie	224250	8163496	2564	Depósito de relaves Linga, lado noreste
DRL-AG-01B	Fondo	224250	8163496	2564	
DRL-AG-02A	Superficie	224795	8163641	2564	
DRL-AG-02B	Fondo	224795	8163641	2564	
DRL-AG-03A	Superficie	224480	8163936	2564	
DRL-AG-03B	Fondo	224480	8163936	2564	
DRL-AG-04A	Superficie	225038	8164522	2564	
DRL-AG-04B	Fondo	225038	8164522	2564	
Depósito de relaves Enlozada					
DRE-AG-01A	Superficie	223173	8173820	2581	Depósito de relaves Enlozada, lado este
DRE-AG-01B	Fondo	223173	8173820	2581	
DRE-AG-02A	Superficie	223103	8173326	2581	
DRE-AG-02B	Fondo	223103	8173326	2581	
DRE-AG-03A	Superficie	223358	8173336	2581	
DRE-AG-03B	Fondo	223358	8173336	2581	
DRE-AG-04A	Superficie	223034	8173560	2581	
DRE-AG-04B	Fondo	223034	8173560	2581	

Tabla 5-37. Ubicación de puntos de muestreo de pulpa de relave

Tabla 3-37: Ubicación de puntos de muestreo de pulpa de relave				
Código OEFA	Coordenadas UTM WGS 84 – Zona 19 K		Altitud (m s.n.m.)	Descripción
	Este (m)	Norte (m)		
Depósito de relaves Linga				
DRL-SD-01	224250	8163496	2562	Depósito de relaves Linga, lado noreste
DRL-SD-02	224795	8163641	2562	
DRL-SD-03	224480	8163936	2562	
DRL-SD-04	225038	8164522	2562	
Depósito de relaves Enlozada				
DRE-SD-01	223173	8173820	2597	Depósito de relaves Enlozada, lado este
DRE-SD-02	223103	8173326	2597	
DRE-SD-03	223358	8173336	2597	
DRE-SD-04	223034	8173560	2597	

En cada uno de los depósitos de desmonte de mina (en adelante DDM) se realizó un muestreo compuesto que consistió en 5 submuestras por punto: A, B, C, D, y E, detallados en la Tabla 5-38.

Tabla 5-38. Ubicación de puntos de muestreo en los depósitos de desmonte de mina

Código OEFA		Coordenadas UTM WGS 84 – Zona 19 K		Altitud (m s.n.m.)	Descripción
		Este (m)	Norte (m)		
Depósito de Desmonte de Mina Oeste					
DDM-O1	DDM-O1A	220854	8169379	2796	Ubicado al extremo sur del DDM Oeste
	DDM-O1B	220871	8169404	2795	
	DDM-O1C	220895	8169421	2795	
	DDM-O1D	220925	8169423	2796	
	DDM-O1E	220954	8169414	2795	
DDM-O4	DDM-O4A	221670	8171865	2771	Ubicado al extremo noreste de DDM Oeste
	DDM-O4B	221648	8171846	2773	
	DDM-O4C	221627	8171824	2773	
	DDM-O4D	221613	8171798	2772	
	DDM-O4E	221603	8171769	2771	
Depósito de Desmonte de Mina Suroeste					
DDM-O2	DDM-O2A	220561	8168910	2798	Ubicado al extremo norte del DDM Suroeste
	DDM-O2B	220575	8168935	2797	
	DDM-O2C	220592	8168960	2795	
	DDM-O2D	220606	8168987	2796	
	DDM-O2E	220619	8169014	2793	
DDM-O3	DDM-O3A	221840	8167762	2825	Ubicado al este del DDM Suroeste.
	DDM-O3B	221890	8167763	2823	
	DDM-O3C	221938	8167776	2827	
	DDM-O3D	221981	8167802	2828	
	DDM-O3E	222023	8167830	2829	



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Depósito de Desmante de Mina Noreste					
DDM-NE1	DDM-NE1A	224213	8172370	2731	Ubicado al suroeste del DDM Noreste.
	DDM-NE1B	224215	8172350	2732	
	DDM-NE1C	224213	8172330	2731	
	DDM-NE1D	224206	8172313	2735	
	DDM-NE1E	224195	8172295	2734	
DDM-NE2	DDM-NE2A	224082	8172244	2738	Ubicado al suroeste del DDM Noreste.
	DDM-NE2B	224042	8172244	2737	
	DDM-NE2C	224004	8172255	2737	
	DDM-NE2D	223992	8172292	2735	
	DDM-NE2E	224004	8172331	2736	
Depósito de Desmante de Mina Sureste					
DDM-SE1	DDM-SE1A	224752	8167374	2858	Ubicado al oeste del DDM Sureste.
	DDM-SE1B	224732	8167369	2859	
	DDM-SE1C	224713	8167373	2862	
	DDM-SE1D	224694	8167381	2861	
	DDM-SE1E	224677	8167390	2861	
DDM-SE2	DDM-SE2A	224924	8167567	2863	Ubicado al oeste del DDM Sureste.
	DDM-SE2B	224921	8167586	2867	
	DDM-SE2C	224917	8167606	2867	
	DDM-SE2D	224914	8167625	2865	
	DDM-SE2E	224909	8167644	2865	
Acceso al Depósito de Desmante de Mina Cerro Negro					
DDM-CN1	DDM-CN1A	227038	8169151	2818	Ubicado en el acceso al DDM Cerro Negro.
	DDM-CN1B	227045	8169158	2817	
	DDM-CN1C	227052	8169165	2815	
	DDM-CN1D	227058	8169173	2817	
	DDM-CN1E	227064	8169181	2815	
DDM-CN2	DDM-CN2A	226991	8169138	2813	Ubicado en el acceso al DDM Cerro Negro.
	DDM-CN2B	227001	8169136	2815	
	DDM-CN2C	227011	8169137	2814	
	DDM-CN2D	227021	8169140	2814	
	DDM-CN2E	227029	8169145	2816	

5.8.3 Equipos utilizados

Los equipos utilizados para la caracterización de componentes mineros como los depósitos de desmante de mina y los depósitos de relaves se detallan en el Anexo 2.

5.8.4 Parámetros y métodos de análisis

En la Tabla 5-39, se presentan los parámetros evaluados y métodos de análisis.

Tabla 5-39. Parámetros analizados en las muestras de componentes mineros

N.º	Parámetro	Método de ensayo	Descripción
1	Metales incluido mercurio	EPA 3050 B: 1996 / EPA 6010 B: 1996. EPA 7471 B, Rev. 2, February 2007.	Espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente con detector de masa
2	Extracción de metales por la metodología de Tessier	ES_NOM21_AS07_MO_TOC	Espectrofotómetro de emisión óptico con plasma acoplado inductivamente
3	Sulfuros	PE-4016	Análisis elemental
4	Sulfatos	PE-4005	Análisis elemental
5	pH	PEC-001	Potenciometría pH
6	SPLP metales	PE-4412	Espectrofotómetro de emisión óptico con plasma acoplado inductivamente
7	ABA*	PE-4408, PE-4416, PE-4407, PE-4402, PE-4409	Análisis elemental, inspección visual, electrometría, volumetría y cálculos.
8	Análisis mineralógico	Difracción de rayos X	Análisis mineralógico con énfasis en arcillas mediante la metodología de etilenglicol Base de datos del Centro Internacional de Datos para Difracción (ICDD) Método DE Refinamiento Rietveld (TOPAS Structure Database y Fiz Karlsruhe ICSD)
9	Cloruros	NOM-021-RECMAT-2000	Análisis elemental



N.º	Parámetro	Método de ensayo	Descripción
10	Shake Flask Extraction	EPA 300.1, Rev 01, 2014	Cromatografía iónica

Fuente: Informes de ensayo de los laboratorios AGQ del Perú S.A.C.; ALS Perú S.A.C.; J Ramón del Perú S.A.C.; Bizalab S.A.C. – Anexo 3.

* La prueba de balance ácido base (ABA), solo fue realizada en las muestras colectadas en el acceso al DDM Cerro Negro.

5.8.5 Análisis de datos

Para caracterizar la composición química, mineralógica, potencial generación de acidez, biodisponibilidad, lixiviación y movilidad de metales y aniones presentes en los depósitos de desmonte de mina y depósitos de relaves, se evaluaron los resultados de metales, análisis mineralógico, prueba estática de balance ácido-base (ABA), extracción secuencial de metales solubles mediante la metodología de Tessier, extracción *shake flask extraction* para aniones y pruebas de SPLP (*Synthetic Precipitation Leaching Procedure*) para metales.

5.9 Prospección geofísica

Se detalla el método de tomografía eléctrica utilizado, la ubicación de las líneas ejecutadas, el equipo utilizado, el aseguramiento de la calidad y el procesamiento de datos.

5.9.1 Método y configuración utilizada para la evaluación

Para la realización del trabajo de campo se empleó el método eléctrico de resistividades en su modalidad de tomografía eléctrica. Este método se basa en la implantación de electrodos a lo largo de perfiles (líneas), con una separación que viene condicionada por el grado de resolución, la profundidad y los objetivos que se pretendan cubrir, de tal modo que, a menor separación mayor resolución y a mayor separación mayor profundidad.

La configuración de electrodos, es decir, el patrón de electrodos de emisión de corriente y de recepción de potencial que son dispuestos sobre el suelo para efectuar las mediciones de resistividad fue polo-dipolo, el cual tiene buena cobertura horizontal, y su señal es significativamente más alta comparada con otras configuraciones, y esta a su vez, no es sensible al ruido telúrico (López *et al.*, 1999).

La configuración polo-dipolo requiere de un electrodo remoto (infinito), para la inyección de corriente al terreno, dicho electrodo debe ponerse lo suficientemente lejos de la línea del sondeo para facilitar una profundidad de investigación mayor (López *et al.*, 1999).

El método de tomografía eléctrica «polo-dipolo» se encuentra estandarizado en la guía EPA: Use of Airborne, Surface, and Borehole Geophysical Techniques at Contaminated Sites EPA/625/R-92/00.

5.9.2 Ubicación de líneas de tomografías geoelectrónica

Se realizó el trazado de 17 líneas tomográficas distribuidas en los componentes mineros de interés (depósitos de relaves Linga y Enlozada, y la presa Huayrondo), con un espaciado de 5 m, 10 m y 20 m, para conseguir una buena resolución y profundidad (20 m, 40 m a 160 m).

En la Tabla 5-39, se presenta los códigos, longitudes y descripciones de las líneas de tomografía geoelectrónica realizadas en las zonas aledañas a los depósitos de relaves Linga y Enlozada, así como en la presa Huayrondo, el detalle de la ubicación de los electrodos y las líneas ejecutadas se encuentra en el Anexo 4.

Tabla 5-40. Ubicación de las líneas de tomografía geoelectrica

N°	Línea de tomografía	Longitud (m)	Descripción de la línea
1	L1	197	Ubicada al noroeste del depósito de relaves Enlozada, aguas arriba del seepage Enlozada.
2	L2	155	Ubicada al noroeste del depósito de relaves Enlozada, aguas abajo del seepage Enlozada.
3	L3	332	Ubicada en el estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada.
4	L4	390	Ubicada en el estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada.
5	L5	306	Ubicada en el estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada.
6	L6	64	Ubicada al noroeste del depósito de relaves Enlozada, cercano a la garita Halcón 21.
7	L7	52	Ubicada en el estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada, aledaña a la carretera Panamericana Sur.
8	L8	150	Ubicada en el estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada, aledaña a la carretera Panamericana Sur.
9	L9	112	Ubicada aguas abajo de la presa Huayrondo, cercana al piezómetro ASB-23 (S-5A)
10	L10	140	Ubicada aguas abajo de la presa Huayrondo
11	L11	205	Ubicada aguas arriba de la presa Huayrondo.
12	L12	115	Ubicada en el estribo derecho del depósito de relaves Linga.
13	L13	130	Ubicada en el estribo derecho del depósito de relaves Linga, cercano al Dren B-2.
14	L14	108	Ubicada al suroeste del depósito de relave Linga, cercano al Dren B-1.
15	L15	222	Ubicada al suroeste del depósito de relaves Linga, aguas arriba del seepage Linga.
16	L16	110	Ubicada al suroeste del depósito de relaves Linga, aguas abajo del seepage Linga.
17	L17	115	Ubicada al sur oeste del depósito de relaves Linga y cercano al piezómetro ASB-55 (MAS-194).

5.9.3 Mediciones en las líneas de tomografía eléctrica

Para la obtención de los perfiles geoelectricos se realizaron mediciones en las líneas de tomografía eléctrica tomando en cuenta lo siguiente:

- Las lecturas obtenidas de la emisión de corriente enviada por el transmisor a través del cable de corriente y electrodos hacia el terreno.
- La recepción de potencial eléctrico y registro de valores a través del receptor.
- El proceso de medición se llevó a cabo de la siguiente manera: El operador del transmisor (Tx), realizó el envío de corriente a solicitud del operador del receptor (Rx) y siempre en coordinación con el personal de apoyo encargado de los cables de corriente. La confirmación del envío de corriente es indicado al personal de corriente para que no toquen los cables mientras se envía energía y junto a esta indicación se da el valor de la intensidad de corriente (expresado mA) al operador de Rx.
- Este valor fue ingresado al Rx y se realizó las mediciones, en cada medida se consideró los valores de resistividad y cargabilidad. Una vez registrado y almacenado en el receptor, el operador de Rx indicó al Operador de Tx para que corte el flujo de corriente y este a su vez indicó al personal de cable de corriente que la corriente está cortada y pueden avanzar al siguiente punto, de esta manera se completó la línea de investigación del subsuelo.
- Los datos obtenidos en campo se almacenaron en la memoria del receptor, en el que se consignan la ubicación de cada línea, los electrodos de medida, los electrodos de emisión de corriente, los valores la intensidad de corriente emitida, el voltaje primario, el número de repeticiones de intervalos de lecturas, el tiempo de dominio de las lecturas y los valores de resistividad aparente.



5.9.4 Equipos utilizados

El equipo de tomografía utilizado estuvo compuesto por un receptor, transmisor, batería de 12 voltios y accesorios (cables, electrodos, radios, combas, etc.). El receptor tiene la capacidad de medir y registrar las resistividades obtenidas con apoyo de un software informático instalado en un ordenador portátil. El transmisor estabiliza y gradúa, según las condiciones del medio, la corriente eléctrica de emisión al terreno alimentado por una batería. El detalle de los equipos utilizados se encuentra en el Anexo 4.

5.9.5 Aseguramiento de la calidad

Durante la obtención de los datos de campo el responsable de la ejecución de las tomografías geoelectricas se encargó de monitorear continuamente los datos, con el fin de garantizar una adecuada adquisición de los mismos, de manera que se pueda eliminar o corregir cualquier problema que pudiera presentarse debido a factores geológicos, geofísicos o de instrumentación. Asimismo, durante el procesamiento de datos en gabinete se validaron los datos y se eliminaron valores incoherentes o ruidos generados por factores externos como errores de valores de intensidad. Se validaron los valores de diferencias de potencial mayores a 0,1 mV.

5.9.6 Procesamiento de datos

El análisis de los resultados está compuesto por un proceso de inversión que nos da como resultado la obtención de los perfiles eléctricos.

a. Proceso de inversión

Para este proceso se utilizó el Software RES2DINV, de la empresa GEOTOMO. El programa utiliza técnicas y métodos numéricos relacionados a procesos de inversión para producir un modelo 2D (Loke y Barker, 1995; Loke *et al.*, 2003; Loke, 2009).

La base de datos previamente validada y empleada para la generación de pseudo-secciones (perfiles geoelectricos) fue exportada a un formato específico para el proceso de inversión, en el cual se transformaron las resistividades aparentes obtenidas en campo, a valores de resistividad real, obteniendo de esta manera, una solución más precisa para las anomalías determinadas. En el Anexo 4, se describen los resultados obtenidos luego del procesamiento de datos geofísicos. Cabe precisar que para validar los resultados obtenidos deberán ser correlacionados con resultados fisicoquímicos de muestras de agua y litología local realizados en la zona.

5.10 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 (río Chili y tributarios) y agua subterránea detalladas en las secciones 5.1.2 y 5.5.2. Es importante mencionar que Custodio y Llamas (1996) considera 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 la mayoría de acuíferos y sistemas hidrológicos.

5.10.1 Procesamiento de datos

El procesamiento de datos se realizó de la siguiente manera:



a. Balance iónico

Se realizó el control de calidad de los resultados de agua reportados por el laboratorio, que consistió en el análisis del equilibrio porcentual de las cargas en las muestras, cuando las sales se disuelven en agua para formar iones, los aniones son atraídos al polo positivo del agua mientras que los cationes son atraídos al polo negativo, el balance iónico está comprendido entre -20 % y +20 %, donde los valores que superan este rango no deberían ser considerados. El balance iónico se expresa mediante la ecuación:

$$B.I = 100 * \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}} \quad (\text{Ecuación 13})$$

b. Selección de la serie analítica

Se seleccionó la serie analítica con la finalidad de describir las propiedades de los componentes hidroquímicos del agua. Los parámetros analizados fueron los siguientes:

Parámetros fisicoquímicos: Potencial de hidrógeno, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y bicarbonatos.

Parámetros Inorgánicos: Sulfatos y cloruros.

Metales totales y metales disueltos: Al, Ag, Sb, As, Be, Ba, B, Bi, Cd, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Hg, Se, Si, Sn, Sr, Ti y Zn, siendo estos los principales (serie estándar para metales totales y disueltos).

c. Diagramas hidroquímicos

Se elaboraron diagramas hidroquímicos de Stiff y Piper, los cuales permitieron caracterizar las aguas (tipo de agua) en función a la concentración de metales, predominancia catiónica y aniónica e interacción con la roca.

- Diagrama de Stiff

Este diagrama está compuesto por 3 ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama, y los aniones al derecho. Siempre el Na^+ se confronta con el Cl^- , el Ca^{+2} con el HCO_3^- y el Mg^{+2} con el SO_4^{-2} . Todos los ejes horizontales están a la misma escala (lineal) y las concentraciones están dadas en meq/l (Figura 5-1 a).

Este tipo de diagrama permite visualizar claramente diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular) y, en forma simultánea, permite dar idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica).

- Diagrama de Piper

En este diagrama se incluyó aniones y cationes en forma simultánea, las aguas geoquímicamente similares quedaron agrupadas en áreas bien definidas (Custodio y Llamas, 1996).

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.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

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 3 cationes. A cada vértice le corresponde el 100 % de un anión o catión. Figura 5-1 b.

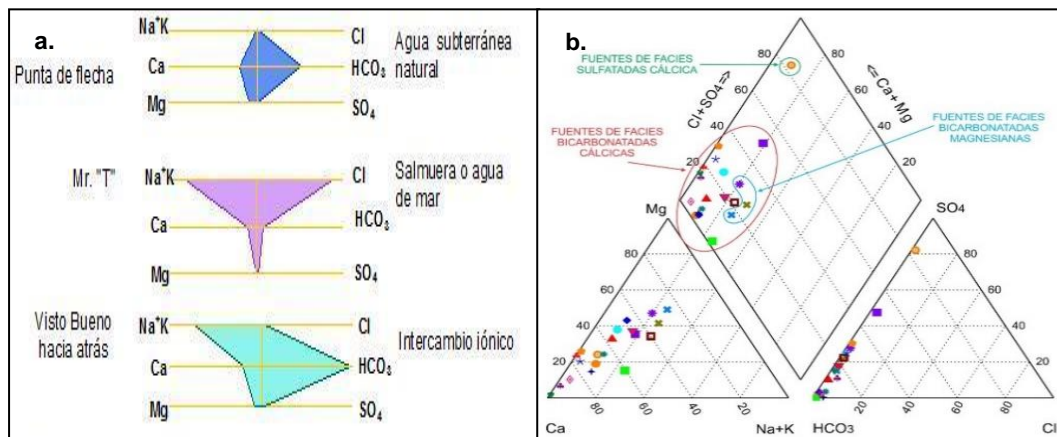


Figura 5-1. Vista del diagrama de a. Stiff y b. Piper

5.11 Caracterización de suelo

Se detalla la guía utilizada, la ubicación de los puntos de muestreo, el parámetro y método de análisis, el equipo utilizado, el aseguramiento de la calidad del muestreo de suelo y el procesamiento de datos de las concentración de metales.

5.11.1 Guía utilizada para la evaluación

La referencia para la caracterización de suelo se detalla en la Tabla 5-41.

Tabla 5-41. Guías utilizadas para la caracterización de suelo

Guía o protocolo	País	Institución o fuente	Año
Guía para muestreo de suelos	Perú	Ministerio del Ambiente (Minam)	2014

5.11.2 Ubicación de puntos de muestreo

Se realizó el muestreo superficial de suelo (0 a 5 cm) en los alrededores de las estaciones de monitoreo de calidad de aire, el cual permitió conocer la concentración de metales presentes en estas zonas. En la Tabla 5-42 se muestra los puntos de muestreo compuesto.

Tabla 5-42. Ubicación de puntos de muestreo para la caracterización de suelo

Código OEFA		Coordenadas UTM WGS 84 – Zona 19 K		Altitud (m s.n.m.)	Descripción
		Este (m)	Norte (m)		
SU-02	SU-02A	233420	8168804	2482	Ubicado al sureste de la futura operación del Tajo Cerro Negro, en el Banco Minero.
	SU-02B	233458	8168813	2488	
	SU-02C	233439	8168791	2489	
	SU-02D	233434	8168830	2488	
SU-10	SU-10A	218239	8180392	2083	Ubicado en la vía pública colindante a las canteras de Concretos Supermix S.A.
	SU-10B	218227	8180439	2077	
	SU-10C	218197	8180479	2076	
	SU-10D	218185	8180538	2074	
SU-09	SU-09A	220901	8164100	2862	Ubicado en la cuenca San José, alrededor de la estación de monitoreo de calidad de aire CA-09.
	SU-09B	220873	8164071	2865	
	SU-09C	220907	8164079	2866	
	SU-09D	220869	8164098	2868	
SU-07	SU-07A	224162	8170713	2711	Ubicado en la zona denominada Chancador Mirador, alrededor de la estación de monitoreo de calidad de aire CA-07.
	SU-07B	224120	8170683	2706	
	SU-07C	224087	8170740	2694	



Código OEFA	Coordenadas UTM WGS 84 – Zona 19 K		Altitud (m s.n.m.)	Descripción
	Este (m)	Norte (m)		
SU-07D	224116	8170776	2693	
SU-06	SU-06A	227725	8172853	Ubicado en la zona denominada Batolito de la Caldera, alrededor de la estación de monitoreo de calidad de aire CA-06.
	SU-06B	227732	8172884	
	SU-06C	227714	8172890	
	SU-06D	227695	8172869	
SU-04	SU-04A	231014	8175493	Ubicado en los alrededores de la I.E. Corazón de Jesús, estación de monitoreo de calidad de aire CA-04.
	SU-04B	231147	8175424	
	SU-04C	231123	8175369	
	SU-04D	231038	8175371	

5.11.3 Parámetros y métodos de análisis

En la Tabla 5-43, se presenta el parámetro evaluado y el método de análisis.

Tabla 5-43. Parámetros analizados en las muestras de suelo

N.º	Parámetros	Método de Análisis	Descripción
1	Metales totales incluido mercurio	EPA 3050 B: 1996 /EPA 6010 B: 1996 EPA 7471 B, Rev. 2, February 2007	Espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente con detector de masa.

5.11.4 Equipos utilizados

Los equipos utilizados y herramientas para la caracterización de suelo se detallan en el Anexo 2.

5.11.5 Procesamiento de datos

Los resultados de metales fueron representados en gráficas utilizando el programa excel, considerando aquellos metales que predominaron en las muestras.

5.12 Caracterización de polvo sedimentado

El muestreo de polvo sedimentado fue realizado en paneles solares y techos de las viviendas ubicadas en los alrededores de la estación de monitoreo de calidad de aire (CA-08) en el Pueblo Joven Cerro Verde. A continuación, se detalla la guía utilizada, la ubicación de los puntos de muestreo, el parámetro y método de análisis, y los materiales utilizados en el muestreo.

5.12.1 Guía utilizada para la evaluación

Se utilizó, a modo referencial, el protocolo para la toma de muestra de polvo sedimentado del Instituto de Salud Pública de Chile. Detallado en la Tabla 5-44.

Tabla 5-44. Referencias para el muestreo de polvo sedimentado

Protocolo	Institución	País	Sección	Año
Protocolo para la toma de muestra de polvo sedimentado	Instituto de Salud Pública	Chile	7: Toma de muestra	2013

5.12.2 Ubicación de puntos de muestreo

Se realizó el muestreo de polvo sedimentado superficial de la superficie de vidrio de los paneles solares y de la superficie policarbonato y polipropileno de los techos de viviendas los techos de viviendas del Pueblo Joven Cerro Verde en los alrededores de la estación de monitoreo de calidad de aire (CA-08). En la Tabla 5-45 se muestra los puntos de muestreo.

**Tabla 5-45.** Ubicación de los puntos de muestreo de polvo sedimentado

Código OEFA		Tipo	Coordenadas UTM WGS 84 – Zona 19 K		Altitud (m s.n.m.)	Descripción
			Este (m)	Norte (m)		
SU-08	SU-08A	Muestra compuesta	220821	8179254	2159	Polvo sedimentado obtenido de la superficie de vidrio de los paneles solares de viviendas del Pueblo Joven Cerro Verde.
	SU-08B		220831	8179256	2155	
	SU-08C		220855	8179423	2139	
	SU-08D		220837	8179423	2146	
	SU-08E		220484	8179197	2150	
	SU-08F		220761	8179374	2140	
	SU-08G		220721	8179281	2146	
	SU-08H		220673	8179276	2141	
	SU-08I		220861	8179288	2143	
	SU-08J		220830	8179280	2128	
	SU-08K		220975	8179304	2132	
	SU-08L		220827	8179379	2136	
SU-08-1	SU-08B		220831	8179256	2155	Polvo sedimentado obtenido de la superficie de policarbonato y polipropileno de los techos de viviendas del Pueblo Joven Cerro Verde.
	SU-08C		220855	8179423	2139	
	SU-08D		220837	8179423	2146	
	SU-08H		220673	8179276	2141	
	SU-08K		220975	8179304	2132	
	SU-08L		220827	8179379	2136	
	SU-08B		220831	8179256	2155	

5.12.3 Parámetros y métodos de análisis

En la Tabla 5-46, se presenta el parámetro evaluado y el método de análisis.

Tabla 5-46. Parámetros analizados en las muestras de polvo sedimentado

N.º	Parámetros	Método de Análisis	Descripción
1	Metales incluido mercurio	EPA 3050 B: 1996 /EPA 6010 B: 1996 EPA 7471 B, Rev. 2, February 2007	Espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente con detector de masa.

Nota: Las muestras colectadas fueron tratadas como muestras de suelo

5.12.4 Equipos utilizados

Los equipos utilizados y herramientas para la caracterización de polvo sedimentado se muestran en el Anexo 2.

5.12.5 Procesamiento de datos

Los resultados de metales fueron representados en tablas y figuras utilizando el programa excel, considerando aquellos metales que predominaron en las muestras.

6. RESULTADOS

Con la finalidad de tener una mejor interpretación, los resultados fueron divididos en 3 secciones: la primera contiene los resultados agua superficial, sedimento, comunidades hidrobiológicas y caracterización hidroquímica en el río Chili y tributarios (quebrada Uchumayo y río Mollebaya), la segunda presenta los resultados de calidad de aire en el área de influencia de la UP Cerro Verde y distritos aledaños, y la tercera muestra los resultados de estudios especializados en agua subterránea, caracterización de la geología local, roca y componentes mineros, prospección geofísica, hidroquímica caracterización de suelo y polvo sedimentado.

Los resultados fueron comparados con la normativa establecida en los instrumentos de gestión ambiental y con la normativa vigente, además, con normativa internacional de forma referencial, según se precisó en el ítem 5 para cada componente evaluado. Cabe



señalar que, como los parámetros evaluados en el agua tienen el mismo valor en los ECA 2015 y 2017 se realizó un solo análisis.

6.1 Componentes ambientales evaluados en el río Chili y tributarios

En esta sección se presenta los resultados de agua superficial, sedimento, comunidades hidrobiológicas e hidroquímica del río Chili y tributarios (quebrada Uchumayo y río Mollebaya), por ser los cuerpos de agua más cercanos a la UP Cerro Verde, ubicados fuera de su área de influencia.

6.1.1 Agua superficial

Los resultados de agua fueron comparados con los ECA para agua Cat.3 aprobado con el Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM y el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM (detallados en la sección 5.1.6 y el Anexo 3).

En la Tabla 6-1 se presenta los parámetros que incumplieron los ECA para agua Cat.3 D1 y D2 (2015 y 2017), en los ríos Chili y Mollebaya, así como en la quebrada Uchumayo, en un total de 11 puntos de muestreo.

Tabla 6-1. Resumen de parámetros que incumplieron los ECA agua-2015 y 2017 en el río Chili y tributarios

Chili y Insulares					
N.º	Nombre	Código	Mes	D.S. N.º 015-2015-MINAM / D.S. N.º 004-2017-MINAM	
				Categoría 3	
				D1: Riego de cultivos / vegetales de tallo alto y tallo bajo	D2: Bebida de animales
Quebradas					
1	Quebrada Uchumayo	AS-10	Abril	Fluoruros	Potencial de hidrógeno
Ríos					
2	Río Chili	AS-06	Abril	-	-
3		AS-07	Abril	-	-
4		AS-01	Abril	-	-
5		AS-08	Abril	-	-
6		AS-04	Abril	Potencial de hidrógeno	Potencial de hidrógeno
7		AS-02	Abril	Potencial de hidrógeno	Potencial de hidrógeno
8	Río Mollebaya	AS-09	Abril	Conductividad eléctrica, cloruros, boro	Boro
9	Río Chili	AS-05	Abril	-	-
10		AS-16	Abril	Potencial de hidrógeno	Potencial de hidrógeno
11		AS-17	Abril	-	-

(-) No superó ningún parámetro

En la Figura 6-1 se presenta el esquema de la calidad del agua en el río Chili y tributarios.

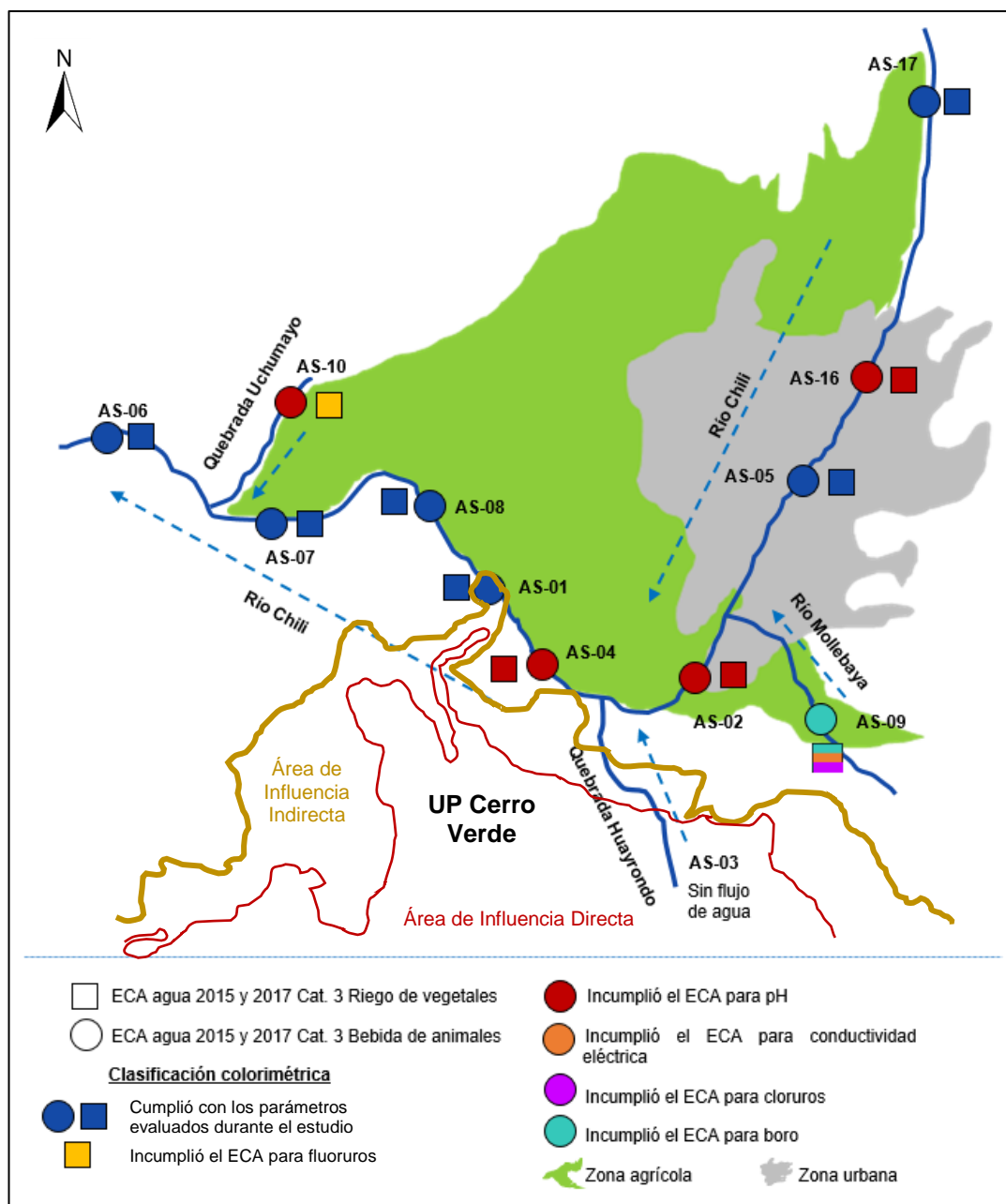


Figura 6-1. Calidad del agua en el río Chili y tributarios en abril 2018 comparados con los ECA agua-2015 y 2017

El potencial de hidrógeno (pH) en el agua se encontró fuera del rango establecido en los ECA agua-2015 y 2017, Cat. 3 en el río Chili (AS-02, AS-04 y AS-16), así como en la quebrada Uchumayo donde solo incumplió la subcat. D2 (Figura 6-2).

Los valores de conductividad eléctrica y las concentraciones de cloruros y boro en el río Mollebaya (AS-09) incumplieron los ECA agua-2015 y 2017 (Figuras 6-3 - 6-5).

La concentración de fluoruros en la quebrada Uchumayo (AS-10) incumplió los ECA agua-2015 y 2017, subcat. D2 (Figuras 6-6).



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

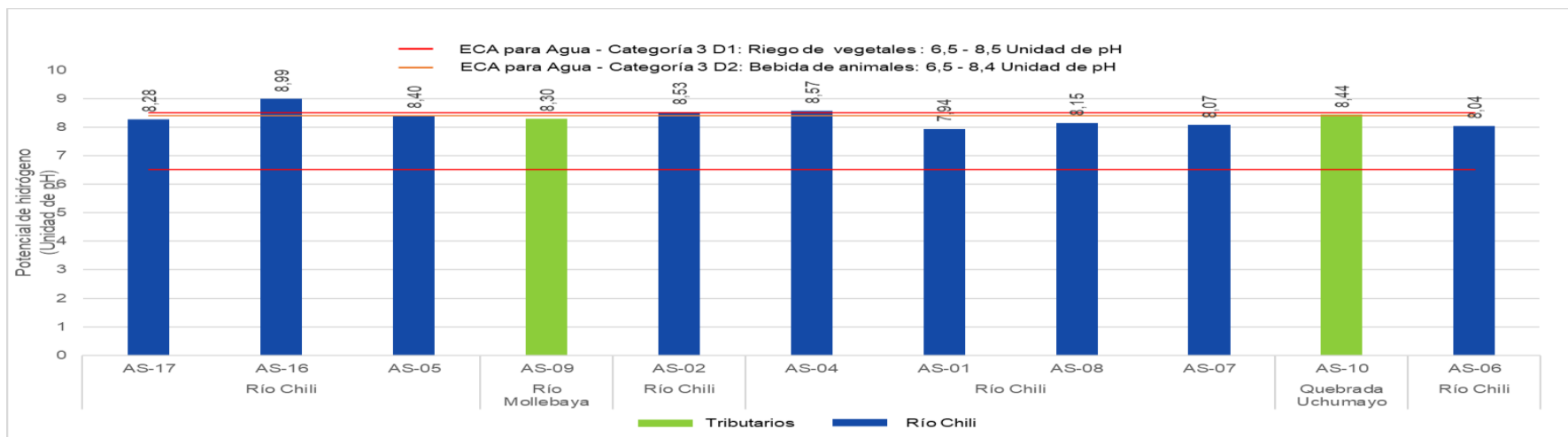


Figura 6-2. Potencial de hidrógeno en el río Chili y tributarios en abril de 2018

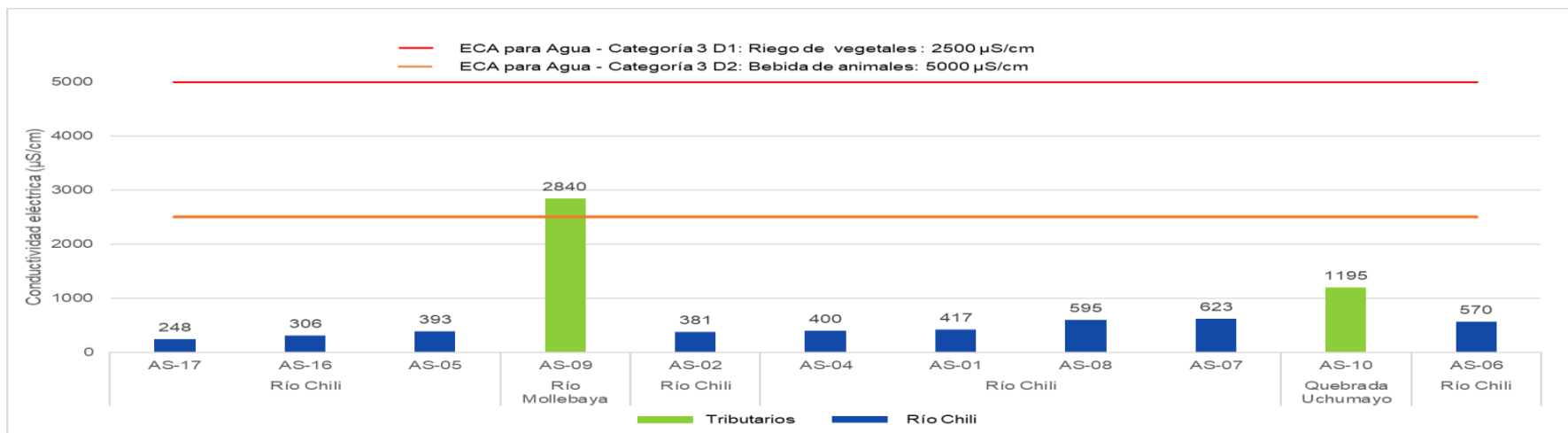


Figura 6-3. Conductividad eléctrica en el río Chili y tributarios en abril de 2018



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año del diálogo y la reconciliación nacional»

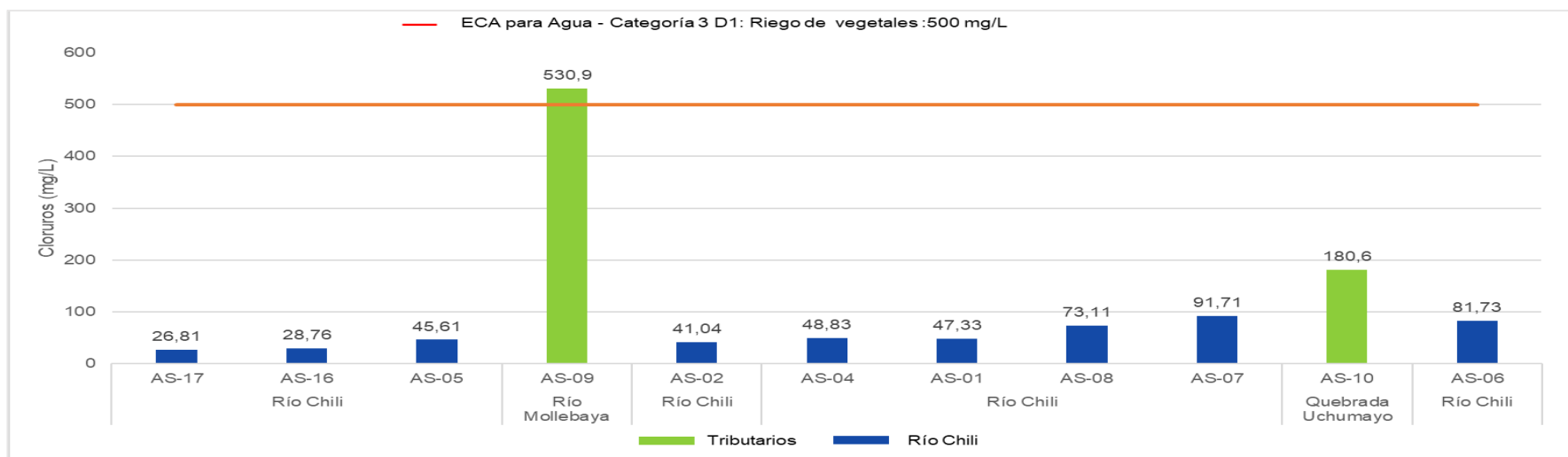


Figura 6-4. Cloruros en el río Chili y tributarios en abril de 2018

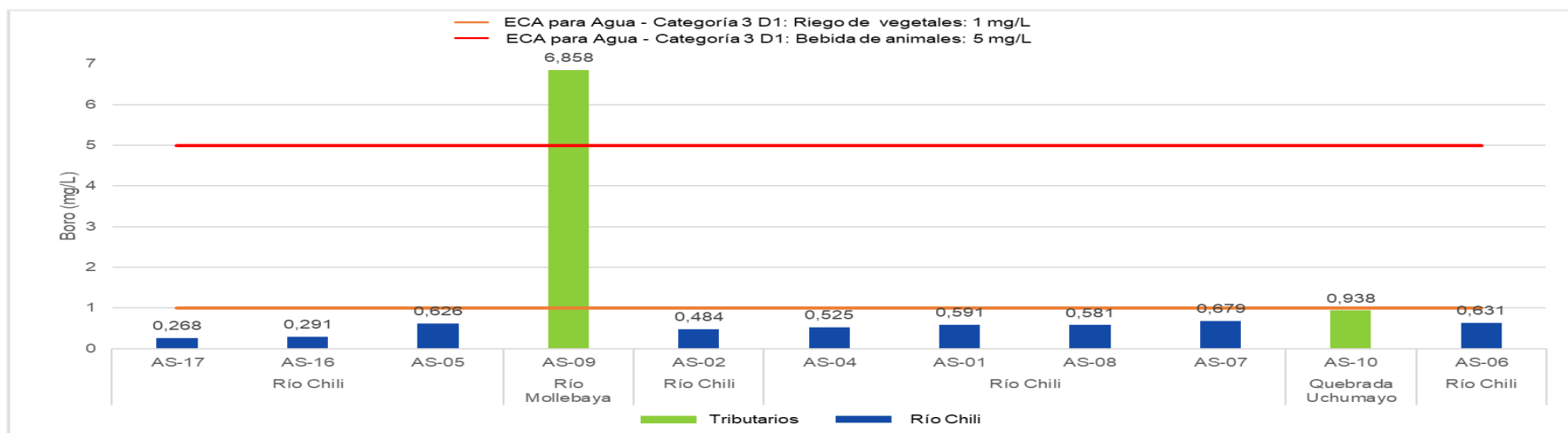


Figura 6-5. Boro en el río Chili y tributarios en abril de 2018



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año del diálogo y la reconciliación nacional»

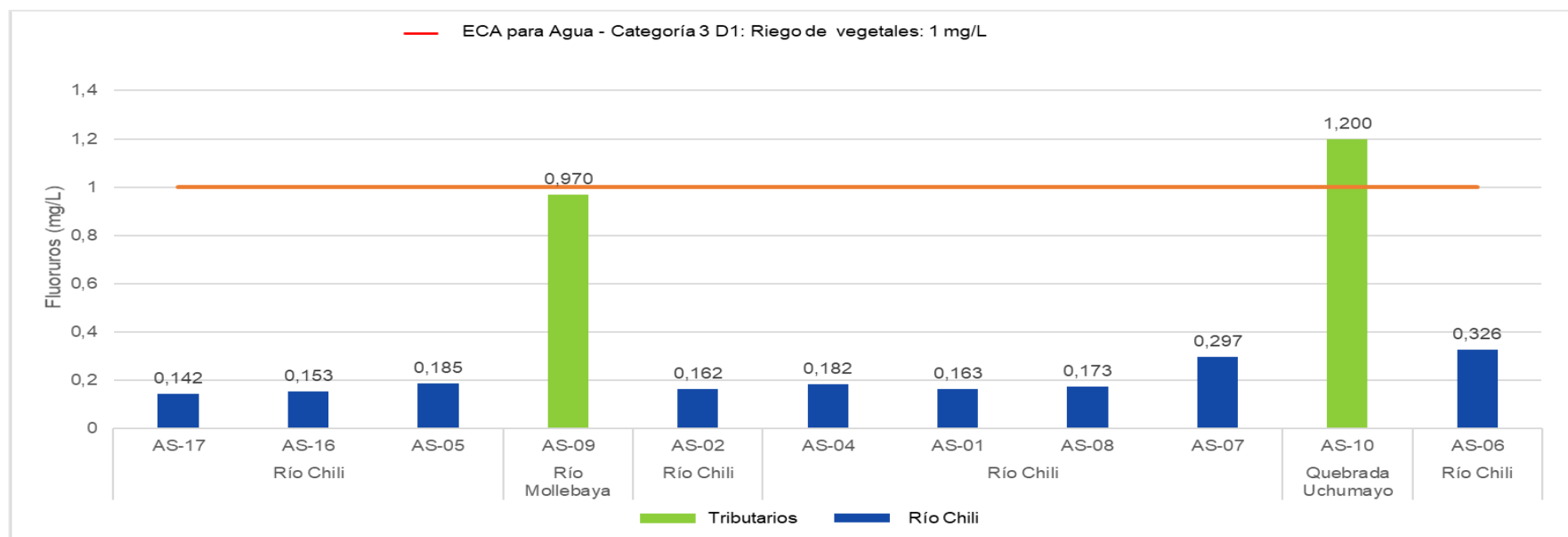


Figura 6-6. Fluoruros en el río Chili y tributarios en abril de 2018



6.1.2 Sedimento

A continuación se presentan los resultados de los parámetros de pH, materia orgánica, granulometría, y metales presentes en los sedimentos del río Chili y tributario (río Mollebaya). Los resultados de todos los parámetros evaluados se adjuntan en el Anexo 2.

El potencial de hidrógeno registrado en el sedimento varió entre 7,51 unidades de pH y 8,40 unidades de pH, siendo el más alcalino el río Mollebaya (Figura 6-7). En cuanto a la materia orgánica presentó un rango de 0,9 % a 5,3 %, el mayor porcentaje fue registrado en el río Chili (SD-08), aguas abajo de la ciudad de Arequipa (Figura 6-8).

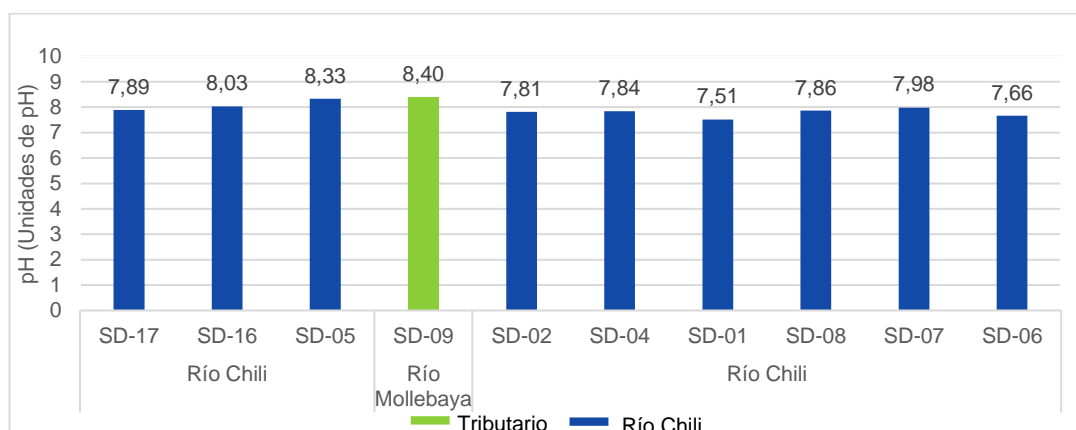


Figura 6-7. Potencial de hidrogeno en sedimento del río Chili y tributario en abril de 2018

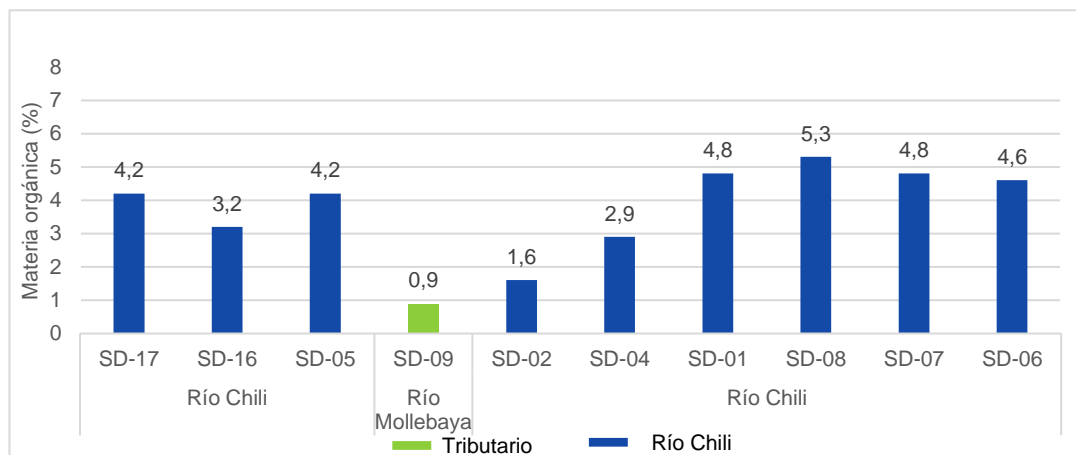


Figura 6-8. Materia orgánica en sedimento del río Chili y tributario en abril de 2018

El análisis granulométrico en las muestras de sedimento en el río Chili y río Mollebaya (tributario) presentó como material predominante la arena y en menor proporción limo y arcilla, siendo los puntos SD-01 y SD-16 del río Chili los que presentaron un mayor porcentaje de limo y arcilla (20 % y 35 %, respectivamente). El detalle de estos resultados se encuentran en el Anexo 3.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

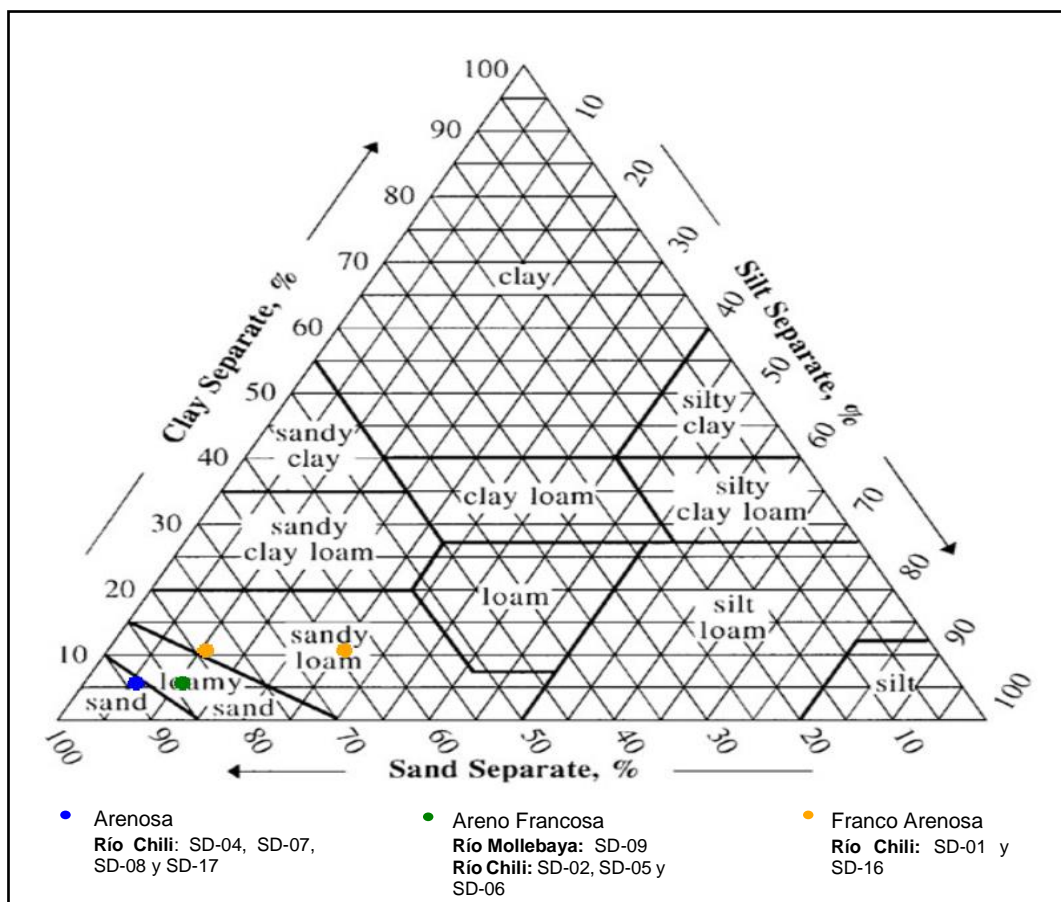


Figura 6-9. Triángulo textural del sedimento en el río Chili y tributario en abril de 2018

En la Tabla 6-2 se presenta los metales que excedieron de manera referencial los valores ISQG³² y PEL³³ de la guía canadiense (*Canadian Environmental Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life* – CEQG, 1999), en un total de 10 puntos de muestreo.

En la Figura 6-10 se presenta un esquema de la ubicación de los puntos de muestreo de sedimento y los metales que excedieron los valores ISQG y PEL de la guía canadiense.

³² ISQG (Interim Sediment Quality Guideline) es la concentración por debajo del cual no se esperan efectos biológicos adversos.

³³ PEL (Probable Effect Level) es la concentración sobre la cual se encuentran efectos biológicos adversos con frecuencia.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

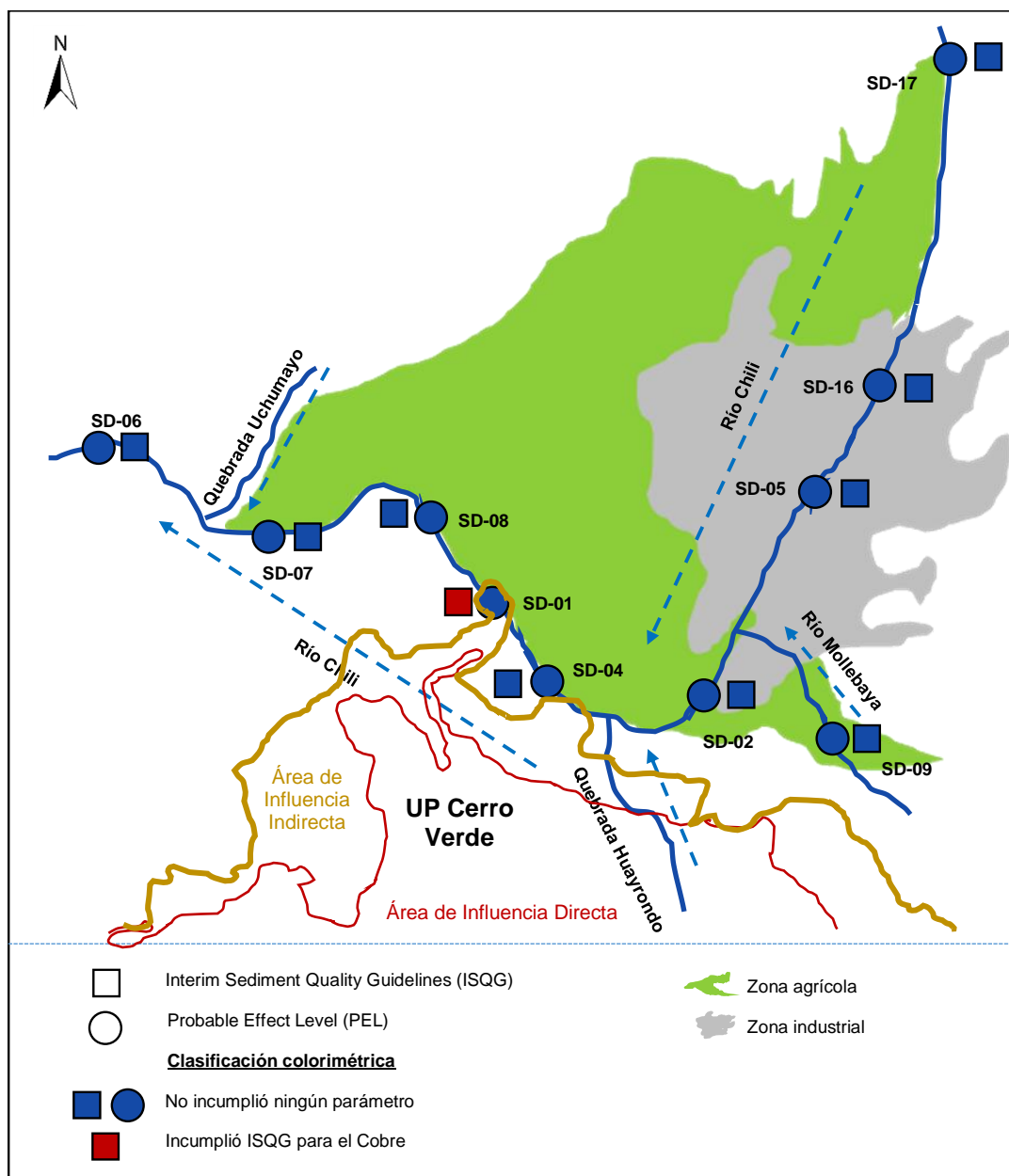


Figura 6-10. Metales en sedimento en el río Chili y sus tributarios

En el punto SD-01, ubicado en la estación de bombas 1, la concentración de cobre excedió el valor ISQG, valor por debajo del cual no se espera efectos biológicos adversos en los macroinvertebrados bentónicos (Figura 6-11).



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

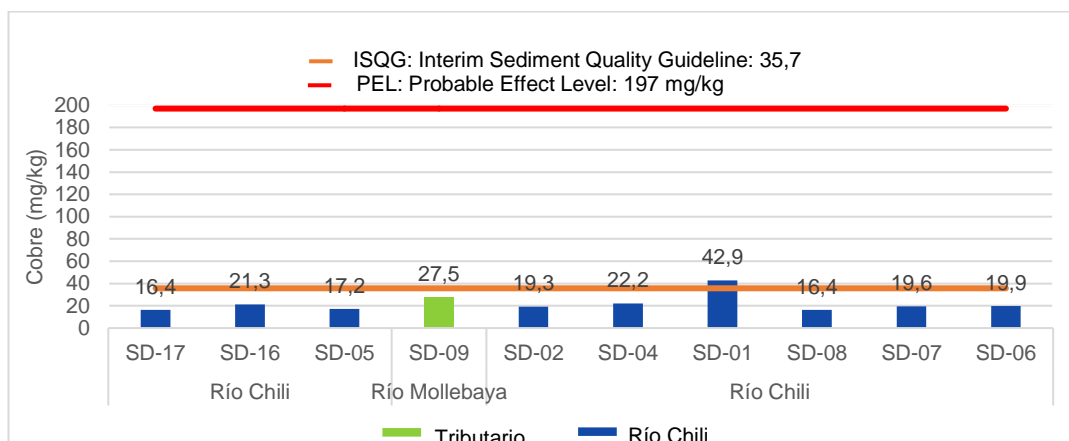


Figura 6-11. Concentración de cobre en sedimento del río Chili y tributario

6.1.3 Comunidades hidrobiológicas

Se presentan los resultados de las comunidades hidrobiológicas evaluadas en abril del 2018 en el río Chili y tributarios, detallados en el Anexo 3.

I. Perifiton

Las microalgas de la comunidad de perifiton, en los 10 puntos evaluados, estuvo representada por 3 phyla: Bacillariophyta, Chlorophyta y Cyanobacteria. En tanto que, los microorganismos sólo estuvieron representados por 2 phyla: Rotífera y Nemata.

a) Composición, riqueza y abundancia de especies

La comunidad de perifiton (microalgas) en el río Chili y tributarios (río Mollebaya y quebrada Uchumayo) estuvo constituida por 64 especies, pertenecientes a 3 phyla, 5 clases, 22 órdenes y 30 familias. El phylum de mayor diversidad fue Bacillariophyta que además estuvo presente en todos los puntos de muestreo. Asimismo, las familias Bacillariaceae y Naviculaceae fueron las de mayor diversidad sobresaliendo los géneros *Nitzschia* Hassall y *Navicula* Bory respectivamente con 7 especies cada una.

En la Tabla 6-2 se presenta los resultados de la riqueza de especies, se observa que en el punto HB-17 se registró la mayor riqueza con 27 especies, seguido de los puntos HB-02 y HB-06 localizados en el río Chili con 24 especies cada una; en cambio el punto HB-08 también en el río Chili registró la menor riqueza con 12 especies.

Tabla 6-2. Riqueza de especies de la comunidad de perifiton (microalgas) por phylum en el río Chili y tributarios

Río/Quebrada	Punto de muestreo	Bacillariophyta	Cyanobacteria	Chlorophyta	Riqueza (S)
Río Chili	HB-17	25	1	1	27
	HB-16	21	0	0	21
	HB-05	15	2	2	19
Río Mollebaya	HB-09	17	1	3	21
Río Chili	HB-02	23	1	0	24
	HB-04	18	1	1	20
	HB-08	8	2	2	12
	HB-07	18	2	1	21
Q. Uchumayo	HB-10	10	8	0	18
Río Chili	HB-06	20	3	1	24
Total		47	10	7	64



Respecto a la abundancia de perifiton (microalgas) se registró un total de 822880 organismos/cm² del acumulado total. El phylum Bacillariophyta registró la mayor abundancia acumulada con 767600 organismos/cm², correspondiendo al 93 % de la abundancia acumulada total.

Los resultados de la abundancia de organismos/cm² por phylum se presentan en la Tabla 6-3, se observó que en el río Chili el punto HB-04 registró la mayor abundancia total, mientras que el punto HB-08 registró la menor abundancia.

Tabla 6-3. Abundancia de organismos/cm² de la comunidad de perifiton (microalgas) por phylum en el río Chili y tributarios

Río/Quebrada	Punto de muestreo	Bacillariophyta	Cyanobacteria	Chlorophyta	Abundancia (N)
Río Chili	HB-17	106000	1200	800	108000
	HB-16	50800	0	0	50800
	HB-05	126400	1200	1000	128600
Río Mollebaya	HB-09	60000	1600	3280	64880
Río Chili	HB-02	98800	2000	0	100800
	HB-04	145200	800	120	146120
	HB-08	10400	1200	23520	35120
	HB-07	68400	2000	480	70880
Q. Uchumayo	HB-10	24400	11600	0	36000
Río Chili	HB-06	77200	4000	480	81680
Total		767600	25600	29680	822880

b) Diversidad alfa

En la Tabla 6-4 se presentan los resultados de los índices de diversidad alfa: riqueza de especies, número de especies abundantes (Hill N1), número de especies muy abundantes (Hill N2), riqueza de Margalef (d), diversidad de Shannon-Wiener (H'), equidad de Pielou (J') y dominancia de Simpson (λ), por punto de muestreo en el río Chili y tributarios.

Se observó que el punto HB-17 (río Chili) registró el mayor valor de riqueza con 27 especies, además de registrar los mayores valores de riqueza de Margalef (2,24), diversidad de Shannon-Wiener (4,15), especies abundantes (17,78 especies efectivas) y especies muy abundantes (12,70 especies efectivas), los cuales se vieron reflejados en un alto valor de equidad (0,873) y un bajo valor de dominancia (0,079), que indican una distribución homogénea de la abundancia de individuos por especie.

Por otro lado, el punto HB-08 (río Chili) registró los menores valores de riqueza (12 especies), riqueza de Margalef (1,05), diversidad de Shannon-Wiener (2,01), especies abundantes (4,04 especies efectivas) y especies muy abundantes (2,22 especies efectivas), además de presentar el valor más bajo de equidad (0,561).

Tabla 6-4. Índices de diversidad alfa de la comunidad de perifiton (microalgas) en el río Chili y tributarios

Río/Quebrada	Punto de muestreo	Riqueza (S)	Abundancia (N)	Riqueza de Margalef (d)	Shannon-Wiener (H')	Hill N1	Hill N2	Equidad (J')	Dominancia (λ)
Río Chili	HB-17	27	108000	2,24	4,15	17,78	12,70	0,873	0,079
	HB-16	21	50800	1,85	3,94	15,34	12,14	0,897	0,082
	HB-05	19	128600	1,53	3,43	10,77	8,54	0,807	0,117
Río Mollebaya	HB-09	21	64880	1,81	3,73	13,30	9,65	0,850	0,104
Río Chili	HB-02	24	100800	2,00	3,97	15,62	11,74	0,865	0,085
	HB-04	20	146120	1,60	3,57	11,89	9,34	0,827	0,107
	HB-08	12	35120	1,05	2,01	4,04	2,22	0,561	0,451



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Río/Quebrada	Punto de muestreo	Riqueza (S)	Abundancia (N)	Riqueza de Margalef (d)	Shannon-Wiener (H')	Hill N1	Hill N2	Equidad (J')	Dominancia (λ)
	HB-07	21	70880	1,79	3,79	13,80	10,85	0,862	0,092
Q. Uchumayo	HB-10	18	36000	1,62	3,48	11,12	7,26	0,833	0,138
Río Chili	HB-06	24	81680	2,03	3,93	15,24	11,39	0,857	0,088

c) Diversidad beta

El análisis de diversidad beta fue realizado mediante el índice de similitud de Bray-Curtis (Figura 6-12), el cual formó dos grandes conglomerados con una similitud mayor al 30% conformado el primero por los puntos HB-08, HB-17, HB-16, HB-07, HB-06, HB-02, HB-05 y HB-04 todos ellos en el río Chili; y el segundo grupo conformado por los puntos HB-09 y HB-10 localizados en el río Mollebaya y quebrada Uchumayo respectivamente, ambos tributarios del río Chili.

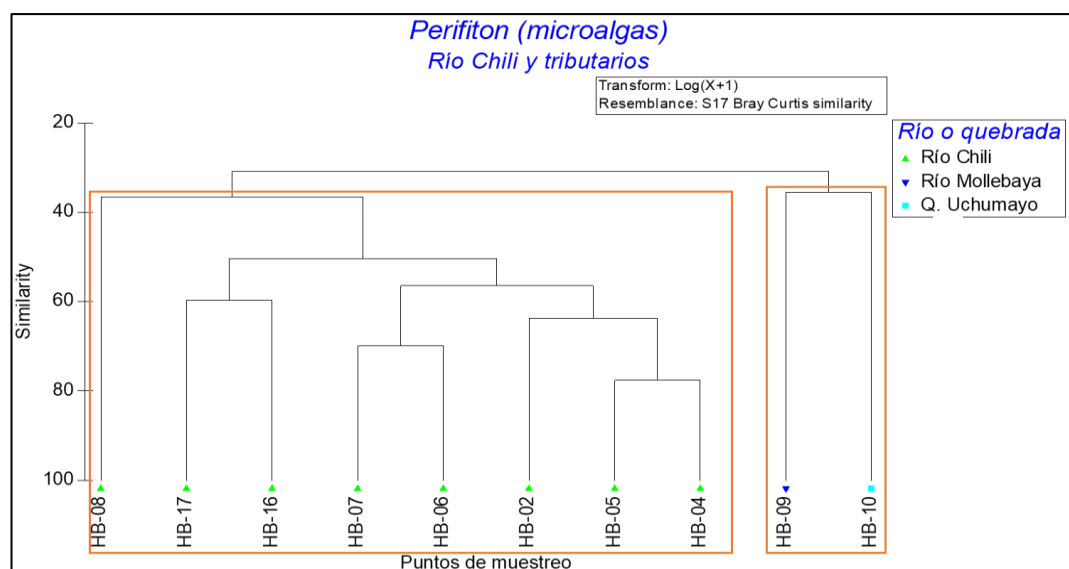


Figura 6-12. Análisis de diversidad beta (similitud de Bray-Curtis) de la comunidad del perifiton (microalgas) en el río Chili y tributarios

- Análisis de similitud

La Figura 6-13 muestra el ordenamiento de los puntos de muestreo del río Chili y tributarios, observándose un grupo conformado por los puntos HB-02, HB-04, HB-05, HB-06, HB-07, HB-16 y HB-17 (ubicados en el río Chili), con una similitud del 35 % y un valor de estrés de 0,1. Asimismo, la composición de la comunidad de microalgas según el análisis de similitud (ANOSIM), mostró diferencias significativas entre los puntos de muestreo ($R = 0,836$ y $p = 2,2 \%$).



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

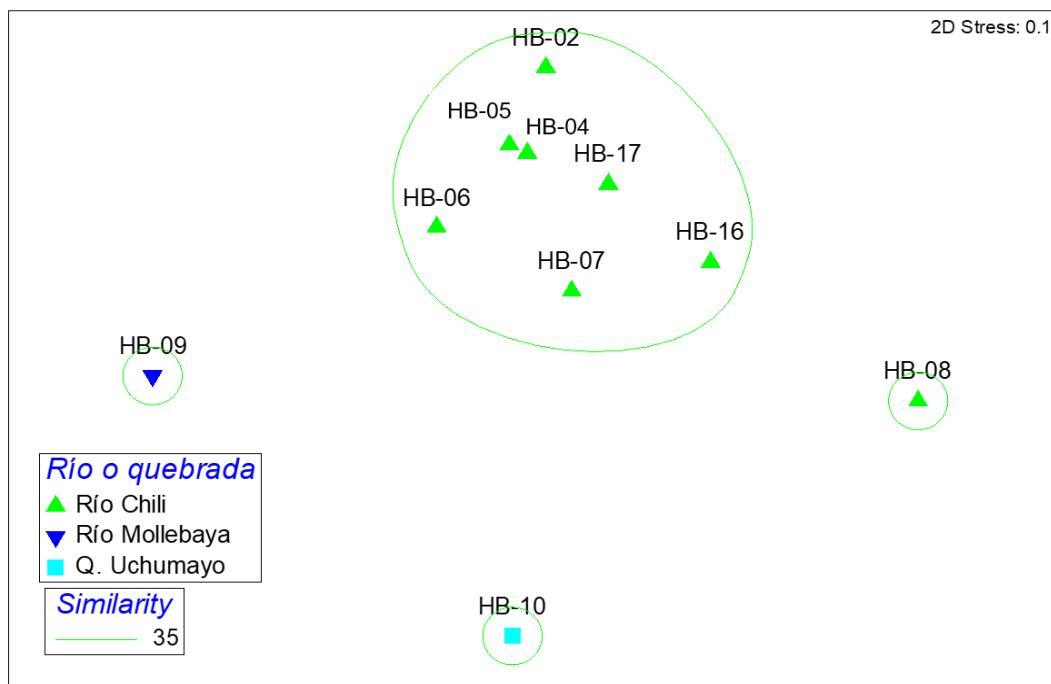


Figura 6-13. Análisis de similitud de la comunidad de perifiton (microalgas) a partir del ordenamiento multidimensional no paramétrico (NMSD).

II. Macroinvertebrados bentónicos

a) Composición, riqueza y abundancia de especies

La comunidad de macroinvertebrados bentónicos estuvo representada por 44 especies, agrupadas en 4 phyla, 5 clases, 10 órdenes y 27 familias; observándose la mayor riqueza dentro del orden Díptera que registró 23 especies (Anexo 3).

En la Tabla 6-5 se presentan los resultados de la riqueza de especies. Se observó que el río Chili en el punto HB-02 registró la mayor riqueza con 20 especies; mientras que el punto HB-08 registró la menor riqueza con 6 especies.

Tabla 6-5. Riqueza de especies de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por orden en el río Chili y tributarios

Orden	Río Chili			Río Mollebaya	Río Chili				Q. Uchumayo	Río Chili	Total
	HB-17	HB-16	HB-05	HB-09	HB-02	HB-04	HB-08	HB-07	HB-10	HB-06	
ND (Annelida)	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
Ephemeroptera	1	1	1	1	2	1	2	2	0	1	3
Coleoptera	1	1	0	2	1	0	0	3	3	0	5
Trichoptera	2	2	2	1	1	2	0	1	2	1	3
Diptera	7	9	8	12	14	9	3	10	4	9	23
Hemiptera	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
Odonata	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3
Amphipoda	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
Basommatophora	0	1	1	2	0	1	0	1	3	1	3
Tricladida	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1
Riqueza (S)	12	15	14	19	20	15	6	19	18	14	44



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Respecto a la abundancia de macroinvertebrados bentónicos se registró un total de 8181 individuos. El orden Díptera registró la mayor abundancia con 3403 individuos, mientras que la menor abundancia la tuvo el orden Hemíptera con sólo 3 individuos.

En la Tabla 6-6 se presenta los resultados de abundancia de individuos por punto de muestreo, se observó que los puntos HB-17 y HB-06, ambos en el río Chili, registraron las mayores abundancias con 2337 y 1629 individuos, respectivamente; mientras que el punto HB-08 (río Chili) registró la menor abundancia con 21 individuos.

Tabla 6-6. Abundancia de individuos de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por orden en el río Chili y tributarios

Orden	Río Chili			Río Mollebaya	Río Chili				Q. Uchumayo	Río Chili	Total
	HB-17	HB-16	HB-05	HB-09	HB-02	HB-04	HB-08	HB-07	HB-10	HB-06	
ND (Annelida)	375	93	155	52	85	659	4	150	0	586	2159
Ephemeroptera	413	1	5	1	6	2	2	2	0	2	434
Coleoptera	2	2	0	14	1	0	0	4	38	0	61
Trichoptera	1313	131	31	23	170	55	0	5	67	9	1804
Díptera	234	385	256	251	406	136	15	631	59	1030	3403
Hemíptera	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	3
Odonata	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	13
Amphipoda	0	0	0	0	0	1	0	1	65	1	68
Basommatophora	0	4	3	112	0	8	0	2	79	1	209
Tricladida	0	0	0	0	1	0	0	0	26	0	27
Abundancia (N)	2337	616	451	453	669	861	21	795	349	1629	8181

b) Diversidad alfa

En la Tabla 6-7 se presenta los resultados de los índices de diversidad alfa: riqueza de especies, número de especies abundantes (Hill N1), número de especies muy abundantes (Hill N2), riqueza de Margalef (d), diversidad de Shannon-Wiener (H'), equidad de Pielou (J') y dominancia de Simpson (λ), por punto de muestreo en el río Chili y tributarios.

Se observó que el punto HB-02 (río Chili) registró el mayor valor de riqueza con 20 especies; asimismo, el punto HB-09 presentó la mayor riqueza de Margalef (2,94) mientras que el punto HB-10 (quebrada Uchumayo) registró la mayor diversidad Shannon-Wiener (3,42) además de los mayores valores de especies abundantes (10,69 especies efectivas) y especies muy abundantes (8,65 especies efectivas), viéndose reflejado con un alto valor de equidad (0,82) y un bajo valor de dominancia (0,12), que indican una distribución homogénea de la abundancia de individuos por especie.

Por otro lado, el punto HB-08 (río Chili) registró el menor valor de riqueza con 6 especies; mientras que el punto HB-06 (río Chili) registró los menores valores de especies abundantes (2,38 especies efectivas) y especies muy abundantes (2,02 especies efectivas), asimismo, se registró los valores más bajos de equidad en los puntos HB-07 (0,27), HB-04 (0,33) y HB-06 (0,33) los cuales se vieron reflejados en altos valores de dominancia, indicando la presencia de pocas especies dominantes.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Tabla 6-7. Índices de diversidad alfa de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en el río Chili y tributarios

Índices	Río Chili			Río Mollebaya	Río Chili				Q. Uchumayo	Río Chili
	HB-17	HB-16	HB-05	HB-09	HB-02	HB-04	HB-08	HB-07	HB-10	HB-06
Riqueza (S)	12	15	14	19	20	15	6	19	18	14
Abundancia (N)	2337	616	451	453	669	861	21	795	349	1629
Hill N1	3,89	4,41	3,88	8,51	5,19	2,43	4,31	2,18	10,69	2,38
Hill N2	2,82	3,30	2,79	6,54	3,52	1,65	3,37	1,61	8,65	2,02
Riqueza de Margalef (d)	1,42	2,18	2,13	2,94	2,92	2,07	1,64	2,70	2,90	1,76
Shannon-Wiener (H')	1,96	2,14	1,96	3,09	2,38	1,28	2,11	1,13	3,42	1,25
Equidad (J')	0,55	0,55	0,51	0,73	0,55	0,33	0,82	0,27	0,82	0,33
Dominancia (λ)	0,35	0,30	0,36	0,15	0,28	0,61	0,30	0,62	0,12	0,49

c) Diversidad beta

La Figura 6-14 muestra el análisis de diversidad beta mediante el índice de similitud de Bray-Curtis, el cual formó un conglomerado con una similitud mayor al 28 % conformado por los puntos HB-17, HB-04, HB-05, HB-16, HB-02, HB-07 y HB-06 todos ellos en el río Chili. Mientras que los puntos HB-09 y HB-10, en el río Mollebaya y quebrada Uchumayo, respectivamente, parecen ser más disímiles respecto a los puntos ubicados en el río Chili.

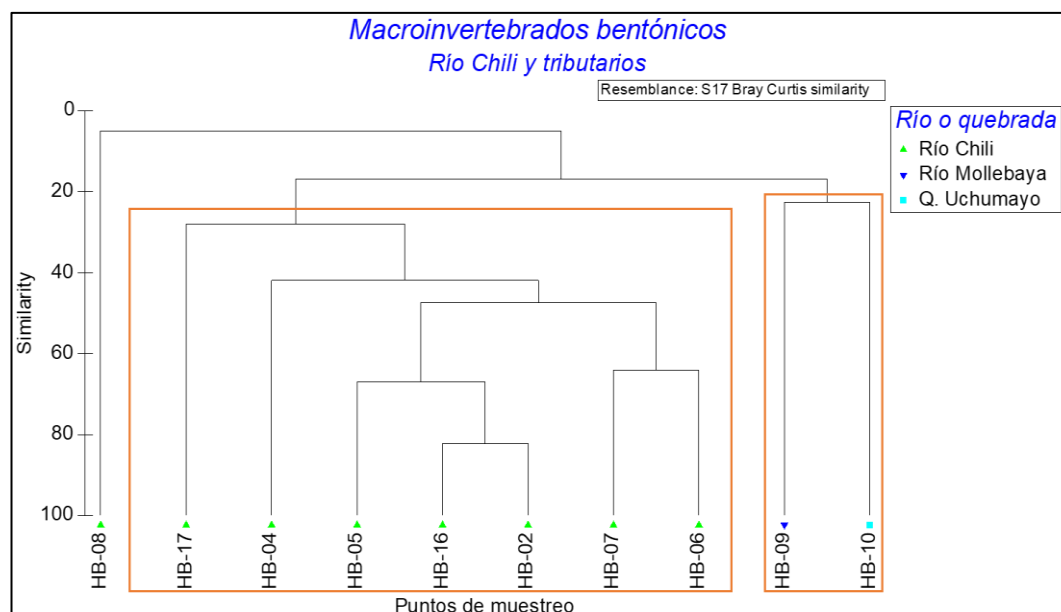


Figura 6-14. Análisis de diversidad beta (similitud de Bray-Curtis) de la comunidad macroinvertebrados bentónicos en el río Chili y tributarios

- Análisis de similitud

La Figura 6-15 muestra el ordenamiento de los puntos de muestreo en el río Chili y tributarios, observándose un grupo conformado por los puntos HB-02, HB-04, HB-05, HB-06, HB-07 y HB-16 todos en el río Chili, con una similitud del 40 % y un valor de estrés significativo de 0,05. Sin embargo, la composición de la comunidad de



macroinvertebrados bentónicos según el análisis de similitud (ANOSIM), no mostró diferencias significativas entre los puntos de muestreo en el río Chili y tributarios ($R = 0,504$ y $p = 8,9 \%$).

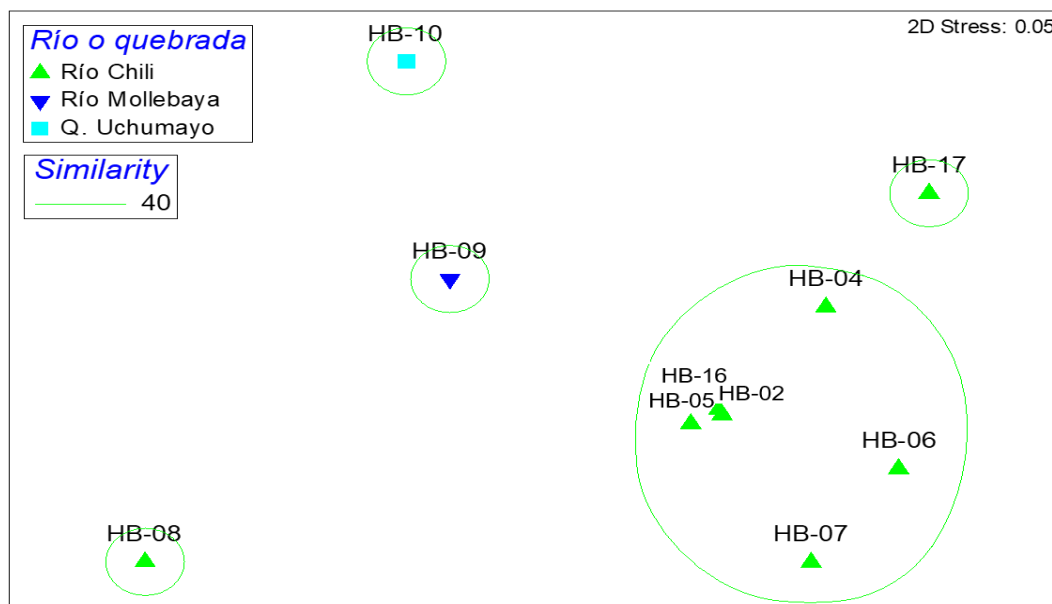


Figura 6-15. Análisis de similitud de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos, a partir del ordenamiento multidimensional no paramétrico (NMDS).

✓ Análisis de componentes principales (ACP)

Para el análisis de componentes principales (ACP) determinado en el río Chili y sus tributarios se consideró los parámetros de campo, tomados *in situ*, tales como pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica. También, se consideraron algunos de los metales incluidos en el ECA para agua categoría 3: «Riego Vegetales y bebida de animales», tales como: aluminio, calcio, cobre, magnesio y manganeso; además de los cloruros y fluoruros. Asimismo, se consideró algunos metales incluidos en la guía canadiense (ISQG y PEL) y los relacionados a actividades mineras; tales como cromo y zinc.

La varianza total explicada a partir de 2 componentes fue de 96,9 %, donde el primer componente aportó un 92 % y el segundo 4,9 %. Respecto a la varianza total explicada por cada variable, donde el mayor valor lo obtuvo la materia orgánica con 0,678.

En la Tabla 6-8 se muestran los 2 componentes obtenidos en el ACP, así como su relación con las variables analizadas. El primer componente, muestra una relación directa entre la conductividad eléctrica, cloruros y algunos metales como el calcio, magnesio y sodio.

El segundo componente presentó una relación positiva entre la materia orgánica y el cromo en sedimento y los cloruros en agua superficial.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Tabla 6-8. Análisis de componentes principales (ACP) para las variables consideradas en el río Chili y tributarios (río Mollebaya y quebrada Uchumayo)

Variable	Componentes rotados	
	PC1	PC2
pH en sedimento	-0,008	-0,019
Materia orgánica	0,135	0,678
Calcio (Ca) en sedimento (mg/kg)	-0,230	-0,251
Cromo (Cr) en sedimento (mg/kg)	0,076	0,439
Cobre (Cu) en sedimento (mg/kg)	-0,064	-0,129
Zinc (Zn) en sedimento (mg/kg)	-0,057	0,111
Temperatura en agua superficial	0,012	0,051
OD en agua superficial	-0,025	-0,120
pH en agua superficial	0,005	-0,057
CE en agua superficial	-0,379	0,158
Cloruros en agua superficial	-0,474	0,324
Fluoruros en agua superficial	-0,091	-0,025
Aluminio (Al) en agua (mg/l)	0,029	-0,009
Arsénico (As) en agua (mg/l)	-0,002	-0,004
Boro (B) en agua (mg/l)	-0,296	-0,201
Calcio (Ca) en agua (mg/l)	-0,367	-0,082
Cobre (Cu) en agua (mg/l)	-0,001	0
Hierro (Fe) en agua (mg/l)	0,032	0,039
Magnesio (Mg) en agua (mg/l)	-0,385	-0,063
Manganeso (Mn) en agua (mg/l)	-0,001	0,003
Molibdeno (Mo) en agua (mg/l)	-0,001	-0,001
Sodio (Na) en agua (mg/l)	-0,407	0,226
% explicación por componente	92	4,9
% explicación acumulado	92	96,9

✓ Análisis de correspondencia canónica (ACC)

Para determinar la relación entre la composición de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos y los factores abióticos se aplicó el análisis de correspondencia canónica (ACC), considerando los taxones de mayor frecuencia y abundancia relativa de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos, así como las variables ambientales extraídas en el primer componente del ACP.

En la Tabla 6-9 se observa que la varianza acumulada en la correlación de las especies y las variables ambientales, explicada por los 2 ejes seleccionados fue de 78,05 %, donde el primer eje explicó el 55,31 % de la varianza, mientras que el segundo eje explicó el 22,74 %. Los demás ejes explicaron el 21,9 % de la varianza restante, por tanto la interpretación de los resultados se basó en los 2 primeros ejes.

Tabla 6-9. Análisis de correspondencia canónica (ACC) entre la comunidad de macroinvertebrados bentónicos y los factores abióticos

Análisis de variables		Eje 1	Eje 2
Valor propio (<i>eigenvalue</i>)		0,48	0,2
Varianzas	Varianza explicada (%)	55,31	22,74
	Varianza acumulada explicada (%)	55,31	78,05
Variables ambientales	Materia orgánica	-0,13	-0,68
	Cromo (Cr) en sedimento (mg/kg)	-0,08	-0,54
	CE en agua superficial	-0,18	0,97
	Cloruros en agua superficial	-0,16	0,98
	Calcio (Ca) en agua (mg/L)	-0,14	0,98
	Magnesio (Mg) en agua (mg/L)	-0,16	0,98
	Sodio (Na) en agua (mg/L)	-0,18	0,97
	Annelida	-0,44	0,28
Variables biológicas (Macroinvertebrados bentónicos)	<i>Andesiops sp.</i>	1,90	-0,15
	<i>Austrelmis sp.</i>	-1,05	-1,15
	<i>Microcylloepus sp.</i>	0,45	2,35
	<i>Metrichia sp.</i>	1,41	-0,05
	<i>Cricotopus sp.</i>	-0,82	-0,36



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Análisis de variables		Eje 1	Eje 2
	<i>Chelífera sp.</i>	0,62	-0,54
	Psychodidae	-0,24	0,72
	<i>Simuliun sp.</i>	0,20	-0,77
	Tipulidae	-1,03	4,57
	Gastropoda	-0,50	12,53

En la Figura 6-16, se describe gráficamente la relación entre los taxa de macroinvertebrados bentónicos y los factores abióticos relacionados con los 2 ejes seleccionados.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

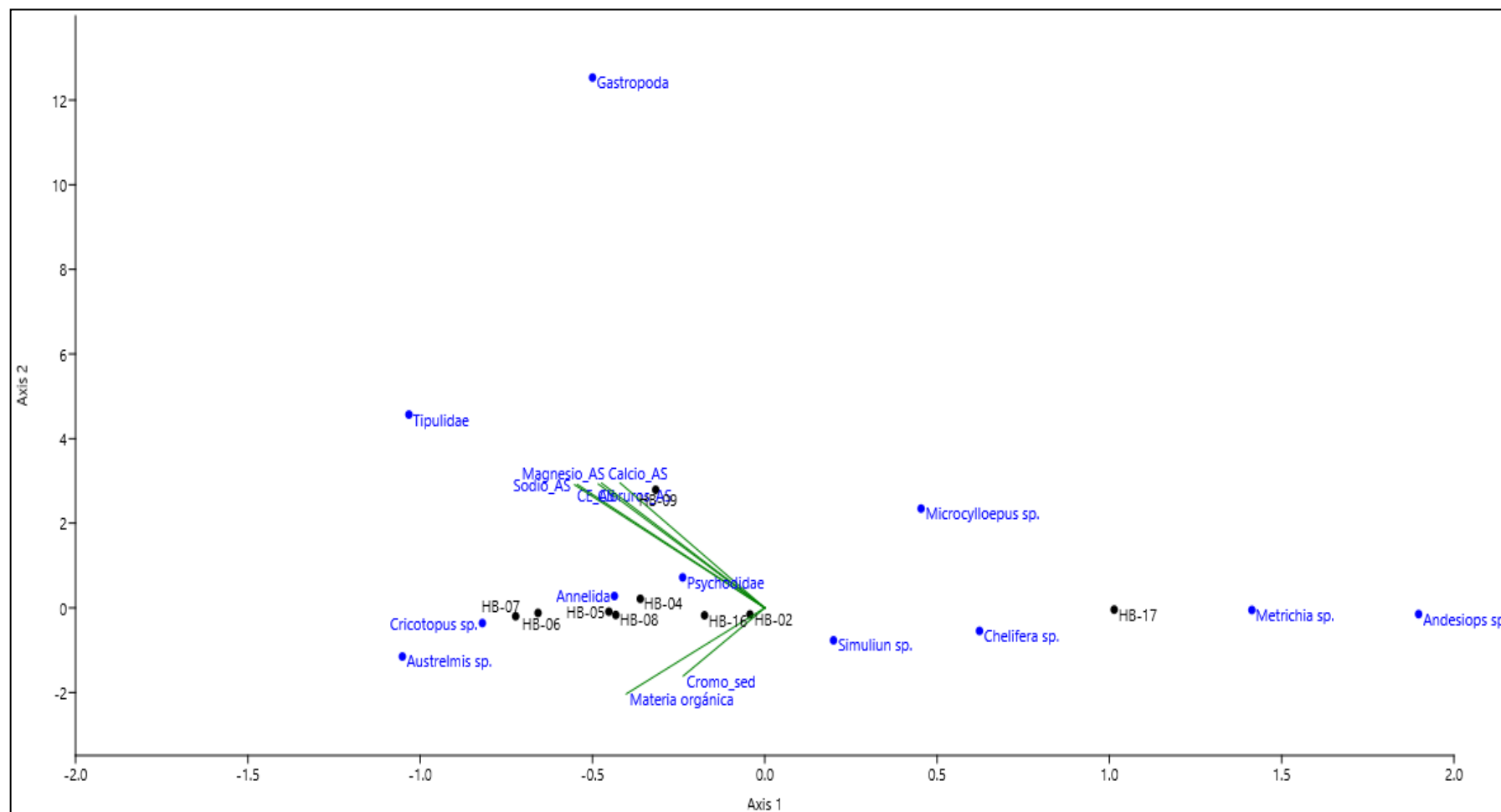


Figura 6-16. Análisis de correspondencia canónica (ACC) entre la comunidad de macroinvertebrados bentónicos y los factores abióticos



De acuerdo a la Tabla 6-9 y Figura 6-16, en el primer eje se observa que mientras se incrementa la abundancia de los taxones Annelida y *Cricotopus sp.* disminuyen las especies como *Microcylloepus sp.* y *Chelifera sp.* En el segundo eje se observa que a medida que se incrementan algunos metales y los cloruros en el agua, la conductividad eléctrica también se incrementa. Asimismo, se observa una relación directa entre la materia orgánica y algunas especies como *Cricotopus sp.*, *Chelifera sp.* y *Simulium sp.*

d) Calidad ecológica

✓ Índice ABI

En la Tabla 6-10 se presentan los resultados de la calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios, determinada referencialmente a partir del índice biótico andino (ABI), se observó que el punto HB-10 (quebrada Uchumayo) registró el mayor valor para el índice ABI con 67 puntos, que corresponde a una buena calidad ecológica del agua; mientras que, el punto HB-08 (río Chili) registró el menor valor con 15 puntos, que corresponde a una mala calidad ecológica del agua. En la Figura 6-17 se observa la calidad ecológica en el río Chili y tributarios de acuerdo a su escala de colores.

Tabla 6-10. Calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios, a partir del índice biótico andino (ABI)

Río/Quebrada	Punto de muestreo	Índice ABI
Río Chili	HB-17	29
	HB-16	35
	HB-05	28
Río Mollebaya	HB-09	43
Río Chili	HB-02	47
	HB-04	27
	HB-08	15
	HB-07	47
Quebrada Uchumayo	HB-10	67
Río Chili	HB-06	34

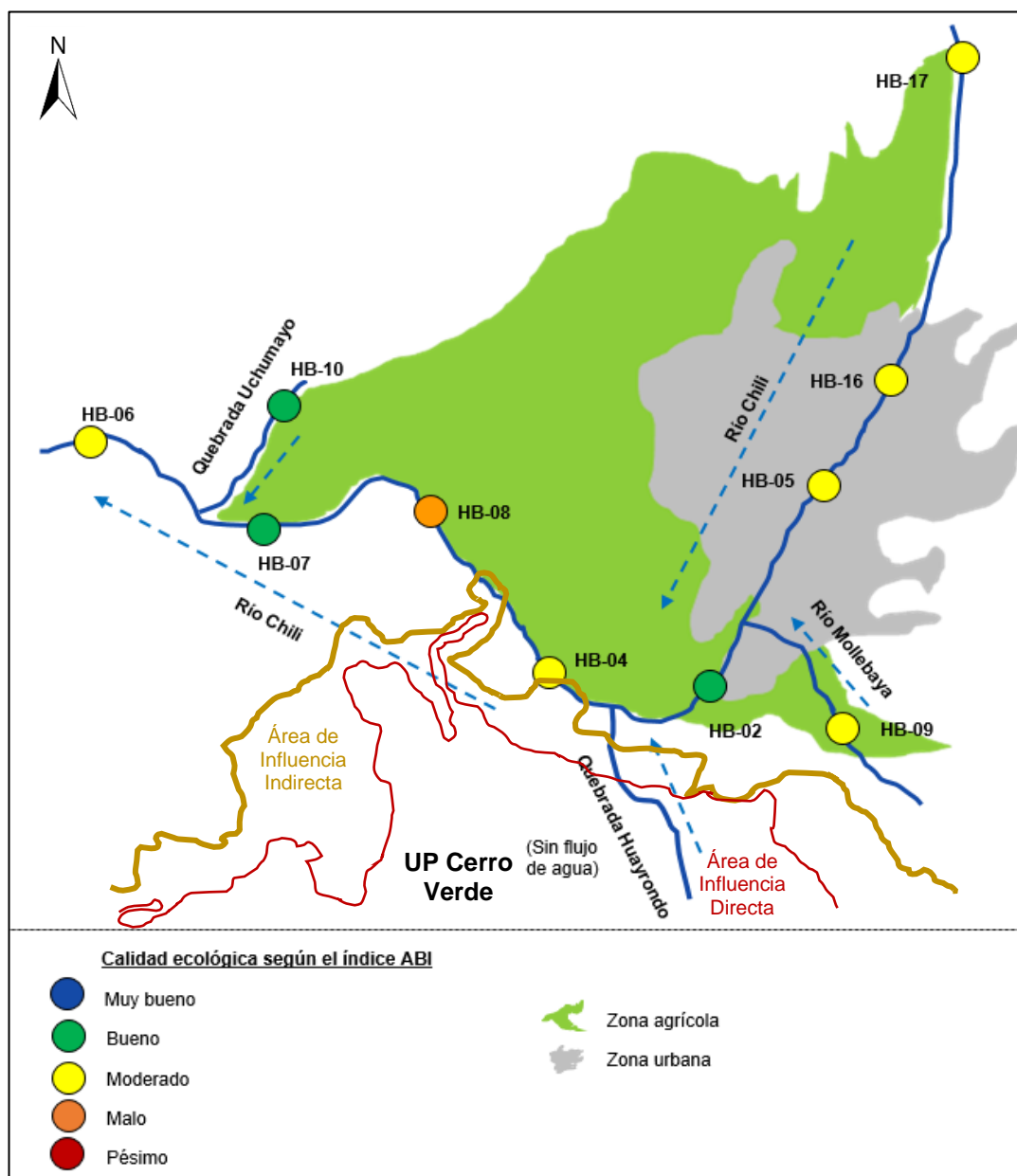


Figura 6-17. Calidad ecológica según el índice ABI en el río Chili y sus tributarios

La Figura 6-18 describe el comportamiento de las especies bioindicadoras, clasificadas referencialmente a partir del índice ABI, se observó la presencia de especies facultativas y tolerantes a lo largo del río Chili y en el río Molebaya (HB-09); además, en el punto HB-10, ubicado en la quebrada Uchumayo, se registró especies sensibles de la familia Gomphidae.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

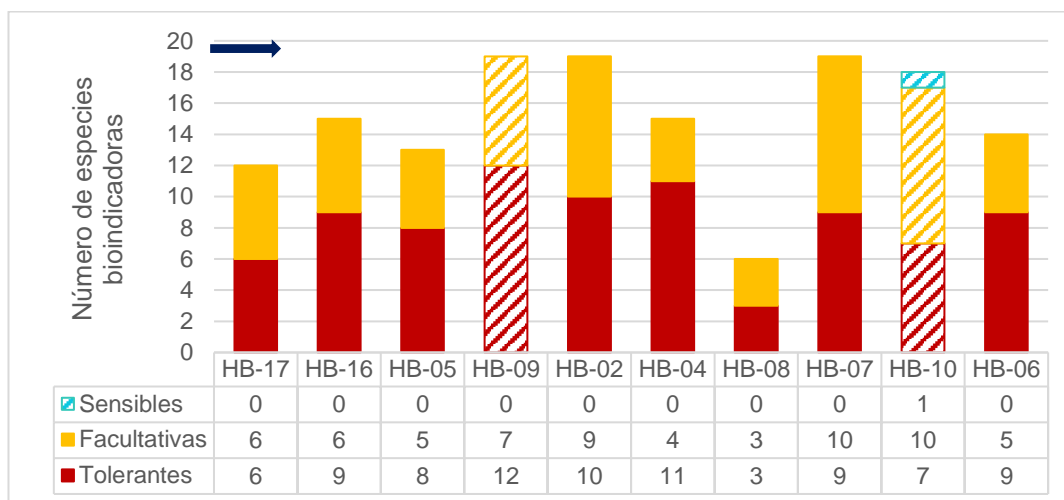


Figura 6-18. Número de especies de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por grupos bioindicadores, definidos referencialmente a partir del índice ABI

() Tributarios del río Chili ➔ Dirección del flujo de agua

Respecto a la composición porcentual de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por grupos bioindicadores, definidos referencialmente a partir del índice ABI (Figura 6-19) se observó que todos los puntos en el río Chili, presentan más especies tolerantes, como Annelida y Chironomidae; y un menor porcentaje de especies facultativas; a excepción de los puntos HB-07 y HB-10, donde se observan más especies facultativas que tolerantes.

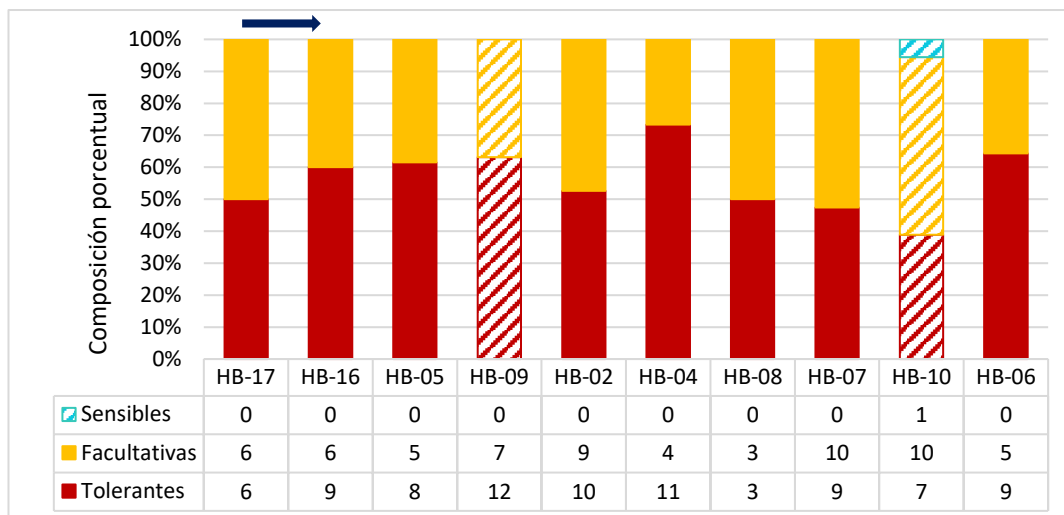


Figura 6-19. Composición porcentual de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos por grupos bioindicadores, definidos referencialmente a partir del índice ABI

() Tributarios del río Chili ➔ Dirección del flujo de agua

✓ CERA-S

En la Tabla 6-11 se presenta la calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios, determinada a partir del índice CERA-S. Los resultados se realizaron en base a los datos obtenidos en campo siguiendo el protocolo de evaluación de la calidad ecológica de ríos andinos (CERA-S). Todos los puntos evaluados obtuvieron una calidad ecológica «moderada» a excepción del punto HB-08, localizado en el río Chili, que presentó una calidad ecológica «mala».

**Tabla 6-11.** Calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios a partir del protocolo CERA-S

Río/Quebrada	Punto de muestreo	Calidad hidromorfológica	Calidad biológica	Calidad ecológica
Río Chili	HB-17	Moderada	Moderada	Moderada
	HB-16	Moderada	Moderada	Moderada
	HB-05	Mala	Moderada	Moderada
Río Mollebaya	HB-09	Moderada	Moderada	Moderada
Río Chili	HB-02	Moderada	Buena	Moderada
	HB-04	Moderada	Moderada	Moderada
	HB-08	Moderada	Mala	Mala
	HB-07	Moderada	Buena	Moderada
Q. Uchumayo	HB-10	Mala	Buena	Moderada
Río Chili	HB-06	Moderada	Moderada	Moderada

✓ **Índice BMWP/Col**

En la Tabla 6-12 se presentan los resultados de la calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios, determinada referencialmente a partir del índice BMWP/Col, se observó que el punto HB-10 (quebrada Uchumayo) registró el mayor valor para el índice BMWP/Col con 82 puntos, que corresponde a una aceptable calidad ecológica del agua lo cual significa aguas ligeramente contaminadas. Asimismo, los puntos HB-17, HB-16, HB-05, HB-09, HB-02 y HB-07 presentaron una dudosa calidad ecológica del agua significando aguas moderadamente contaminadas; en tanto que los puntos HB-04 y HB-08 mostraron una crítica calidad ecológica que significa aguas muy contaminadas.

Tabla 6-12. Calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios, a partir del índice BMWP/Col

Río/Quebrada	Punto de muestreo	Índice BMWP/Col	Calidad ecológica
Río Chili	HB-17	36	Dudosa
	HB-16	44	Dudosa
	HB-05	43	Dudosa
Río Mollebaya	HB-09	55	Dudosa
Río Chili	HB-02	48	Dudosa
	HB-04	35	Crítica
	HB-08	24	Crítica
	HB-07	57	Dudosa
Q. Uchumayo	HB-10	82	Aceptable
Río Chili	HB-06	45	Dudosa

✓ **Índice EPT %**

En la Tabla 6-13 se presenta los resultados de la calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios, determinada referencialmente a partir del índice EPT (Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera); donde se determinó que el punto HB-17, en el río Chili, aguas arriba de la ciudad de Arequipa, presentó una buena calidad ecológica del agua. Los demás puntos a lo largo del río Chili presentaron una mala calidad ecológica del agua excepto el punto HB-02 que registró una regular calidad ecológica.

Tabla 6-13. Calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios a partir del índice EPT%

Río/Quebrada	Punto de muestreo	EPT %	Calidad ecológica
Río Chili	HB-17	73,86	Buena
	HB-16	21,43	Mala
	HB-05	7,98	Mala
Río Mollebaya	HB-09	5,30	Mala
Río Chili	HB-02	26,31	Regular
	HB-04	6,62	Mala
	HB-08	9,52	Mala
	HB-07	0,88	Mala

**PERÚ**Ministerio
del AmbienteOrganismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Río/Quebrada	Punto de muestreo	EPT %	Calidad ecológica
Q. Uchumayo	HB-10	19,20	Mala
Río Chili	HB-06	0,68	Mala

✓ Índice CA %

En la Tabla 6-14 se presentan los resultados de la calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios, determinada referencialmente a partir del índice CA (Chironomidae y Annelida), registrándose que los puntos HB-17 y HB-10 presentaron aguas no contaminadas; en tanto que en los demás puntos se presentaron aguas contaminadas.

Tabla 6-14. Calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios, a partir del índice CA%

Río/Quebrada	Punto de muestreo	CA%	Calidad ecológica
Río Chili	HB-17	24,86	Aguas no contaminadas
	HB-16	75,49	Aguas contaminadas
	HB-05	84,70	Aguas contaminadas
Río Mollebaya	HB-09	62,25	Aguas contaminadas
Río Chili	HB-02	60,24	Aguas contaminadas
	HB-04	91,52	Aguas contaminadas
	HB-08	66,67	Aguas contaminadas
	HB-07	96,48	Aguas contaminadas
Q. Uchumayo	HB-10	6,88	Aguas no contaminadas
Río Chili	HB-06	98,77	Aguas contaminadas

✓ Índice EPT/CA %

En la Tabla 6-15 se presentan los resultados de la calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios, determinada referencialmente a partir del índice EPT/CA; determinándose que los puntos HB-17 y HB-10 presentan aguas de buena calidad, es decir, el ambiente se encuentra en buen estado; mientras que, los demás puntos a lo largo del río Chili presentan aguas de mala calidad con aguas con contaminación orgánica.

Tabla 6-15. Calidad ecológica del agua en el río Chili y tributarios a partir del índice EPT/CA %

Río/Quebrada	Punto de muestreo	EPT/CA	Calidad ecológica
Río Chili	HB-17	2,97	Aguas de buena calidad
	HB-16	0,28	Aguas de mala calidad
	HB-05	0,09	Aguas de mala calidad
Río Mollebaya	HB-09	0,09	Aguas de mala calidad
Río Chili	HB-02	0,44	Aguas de mala calidad
	HB-04	0,07	Aguas de mala calidad
	HB-08	0,14	Aguas de mala calidad
	HB-07	0,01	Aguas de mala calidad
Q. Uchumayo	HB-10	2,79	Aguas de buena calidad
Río Chili	HB-06	0,01	Aguas de mala calidad

III. Necton (peces)

a) Composición, riqueza y abundancia de especies

El río Chili y tributario (río Mollebaya) estuvo representado por 2 órdenes y 2 familias, la especie *Trichomycterus punctulatus* registró la mayor abundancia con 13 individuos en total, mientras que la especie *Poecilia reticulata* presentó la menor abundancia con 2 individuos (Tabla 6-16).

**PERÚ**Ministerio
del AmbienteOrganismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Tabla 6-16. Riqueza de especies de la comunidad del necton en el río Chili y tributarios

Río/Quebrada	Río Chili		Río Mollebaya	Río Chili			Total
Especie	HB-04	HB-02	HB-09	HB-05	HB-16	HB-17	
<i>Trichomycterus punctulatus</i>	1	2	0	1	4	5	13
<i>Poecilia reticulata</i>	0	0	2	0	0	0	2
Riqueza (S)	1	1	1	1	0	1	2
Abundancia (N)	1	2	2	1	4	5	15

6.1.4 Hidroquímica

A continuación se detallan los resultados de la caracterización hidroquímica de las aguas del río Chili y tributarios (río Mollebaya y quebrada Uchumayo).

a. Parámetros de campo

La evaluación hidroquímica para agua superficial consideró un total de 11 muestras; 9 en el río Chili, 1 en el río Mollebaya y 1 en la quebrada Uchumayo.

Potencial de hidrógeno (pH)

Los valores de pH variaron entre 7,94 unidades de pH (AS-01) y 8,99 unidades de pH (AS-16) en el río Chili.

Temperatura

La temperatura varió entre 15 °C (AS-01) en el río Chili y 20,2 °C (AS-10) en la quebrada Uchumayo.

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica varió entre 248 µS/cm (AS-17) en el río Chili y 2840 µS/cm (AS-09) en el río Mollebaya.

b. Diagramas hidroquímicos

La información que proporcionaron los diagramas hidroquímicos se detalla a continuación:

✓ Diagrama de Stiff

Los diagramas de Stiff (Figura 6-20) muestran que las concentraciones de iones mayoritarios (Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) en las muestras de agua superficial evaluados fueron desde 0 hasta 16 meq/L y se dividieron en 3 rangos:

- De 0 a 3,5 meq/L (9 muestras en el río Chili)
- De 0 a 7 meq/L (1 muestra en la quebrada Uchumayo)
- De 0 a 16 meq/L (1 muestra en el río Mollebaya)



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

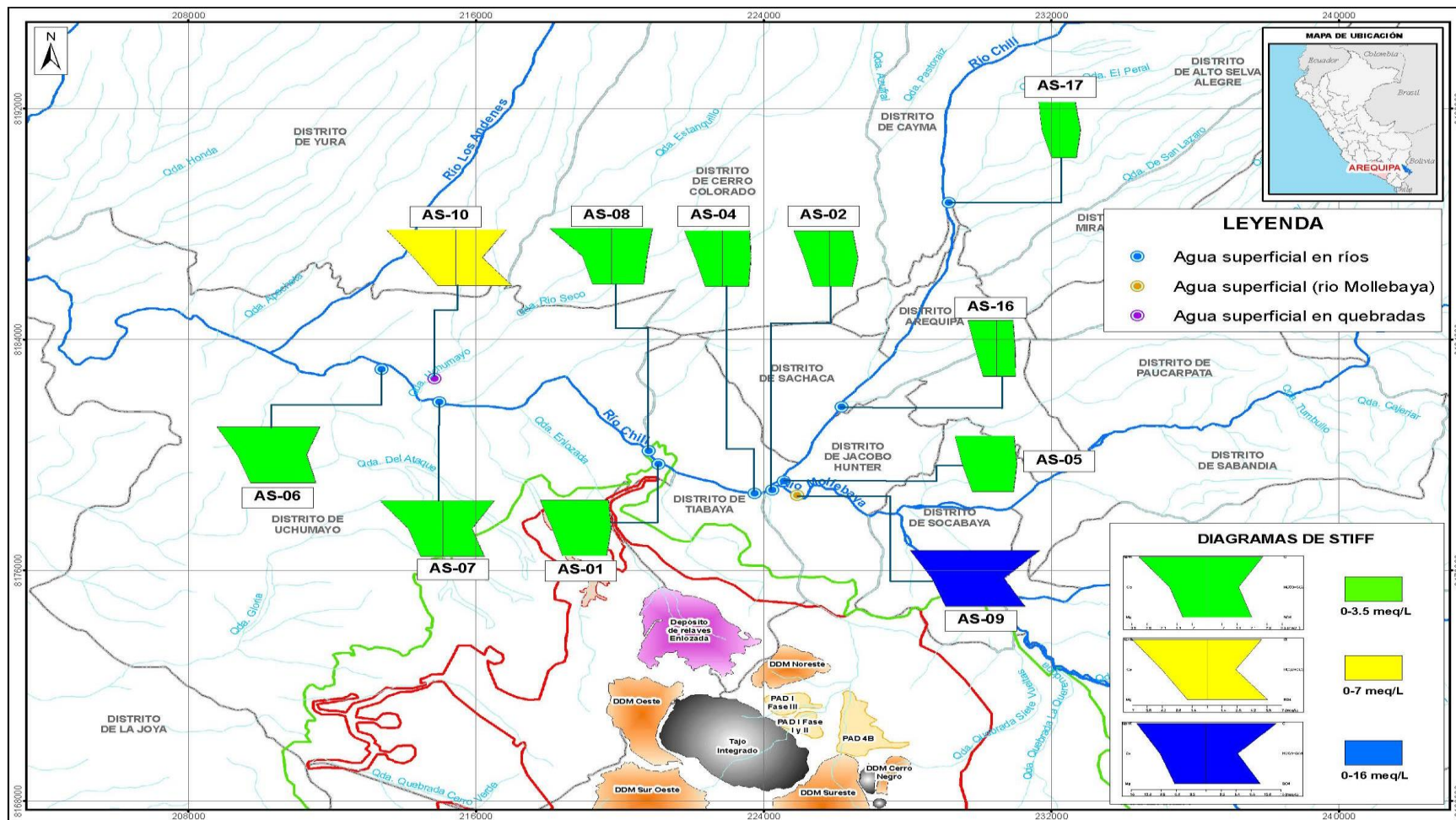


Figura 6-20. Diagramas de Stiff de los puntos de agua superficial evaluados en el río Chili y tributarios



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

✓ Diagrama de Piper

El diagrama de Piper indica que las muestras de agua superficial se agruparon en 2 facies hidroquímicas (Figura 6-21).

La primera facies agrupó 6 puntos del río Chili (AS-01, AS-02, AS-04, AS-05, AS-16 y AS-17) y fue de tipo bicarbonatada sódica potásica y la segunda facies agrupó 3 puntos del río Chili (AS-06, AS-07 y AS-08), 1 punto del río Mollebaya (AS-09) y 1 punto de la quebrada Uchumayo (AS-10) y fue de tipo clorurada sódica potásica.

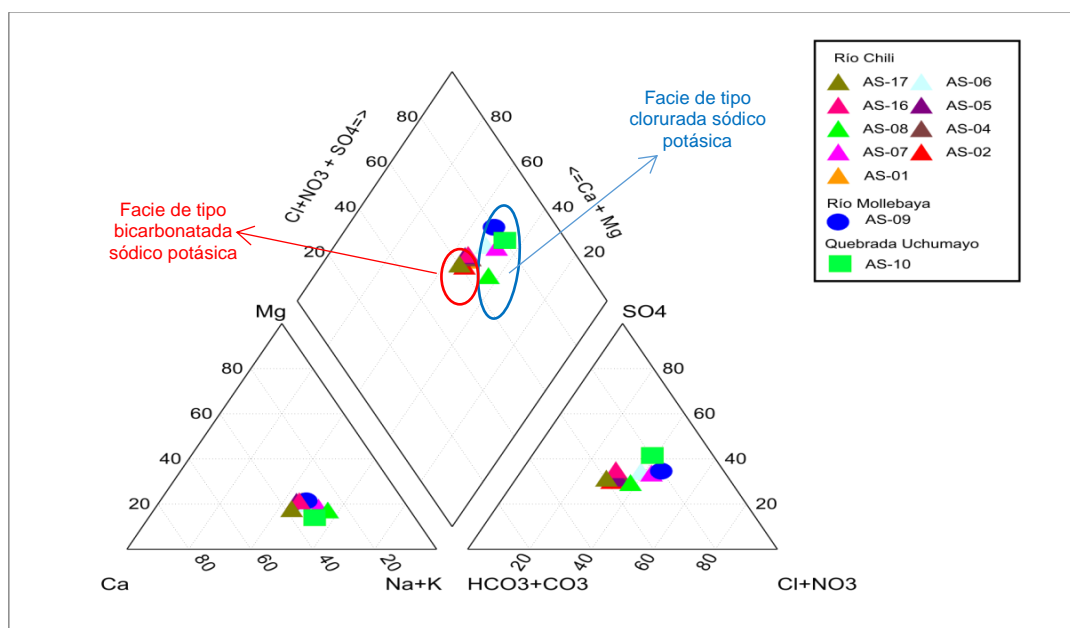


Figura 6-21. Diagrama de Piper de los puntos de agua superficial en el río Chili y tributarios

6.2 Calidad de aire

La evaluación de calidad de aire, consideró 3 estaciones de monitoreo operacionales CA-09 (quebrada San José), CA-07 (Chancador Mirador) y CA-02 (Banco Minero) y 3 estaciones de monitoreo no operacionales CA-06 (Alto Huayrondo), CA-04 (Socabaya) y CA-08 (PPJJ Cerro Verde).

6.2.1 Análisis de parámetros meteorológicos

En la Tabla 6-17 se presenta un resumen de los valores registrados durante el periodo de evaluación en las 6 estaciones de monitoreo.

Las características de la zona de estudio nos muestran una amplitud térmica con días cálidos y noches frías. Asimismo, los mayores valores de temperatura se registraron en el intervalo de las 7:00 y 17:00 horas, mientras que los menores valores se registraron en el intervalo 18:00 y 6:00 horas, los registros de precipitación indican que no se presentó precipitación alguna, la humedad relativa registró los valores mayores durante la noche y los menores valores en el día. De acuerdo con los registros de presión atmosférica presentó mayores valores promedio en las estaciones ubicadas en Banco Minero, I.E. Corazón de Jesús y PPJJ Cerro Verde la presión se eleva a consecuencia de la disminución del nivel topográfico, la velocidad del viento registró valores promedio mayores en el día y menores en la noche.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Tabla 6-17. Registro meteorológicos en cada estación de monitoreo

Punto de monitoreo	Parámetro meteorológico	Promedio diurno (7:00 h – 19:00 h)	Promedio nocturno (19:00 h – 7:00 h)
CA-09	Presión (mbar)	543,7	543,2
	Temperatura(°C)	15,6	11,7
	Humedad (%)	27,1	30,1
	Velocidad(m/s)	3,6	1,9
CA-7	Presión (mbar)	553,5	553,5
	Temperatura(°C)	16,5	11,7
	Humedad (%)	31,1	43,5
	Velocidad(m/s)	3,7	0,6
CA-06	Presión (mbar)	554,3	554,2
	Temperatura(°C)	18,7	11,4
	Humedad (%)	19,3	32,1
	Velocidad(m/s)	3,1	1,0
CA-04	Presión (mbar)	578,47	578,87
	Temperatura(°C)	19,9	10,6
	Humedad (%)	21,3	35,8
	Velocidad(m/s)	3,1	0,8
CA-02	Presión (mbar)	567,5	567,7
	Temperatura(°C)	14,3	6,5
	Humedad (%)	31,7	49,8
	Velocidad(m/s)	3,0	1,4
CA-08	Presión (mbar)	591,9	592,3
	Temperatura(°C)	20,5	10,8
	Humedad (%)	19,7	40,3
	Velocidad(m/s)	1,9	0,3

En la Figura 6-20 se presentan las rosas de viento correspondientes a la dirección y velocidad del viento registrados durante el periodo de monitoreo realizado del 5 al 19 de setiembre de 2018.

De acuerdo con los resultados de las estaciones CA-09 y CA-07 muestran que los flujos de vientos en estos puntos de monitoreo son homogéneas; donde, durante el periodo diurno (7:00 h – 19:00 h) predominaron los vientos (brisa suave y brisa moderada) de dirección oeste (W), suroeste (SW) y sur suroeste (SSW); mientras que durante el periodo nocturno (19:00 h – 7:00 h) predominaron los vientos (brisa ligera y brisa suave) de dirección noreste (NE), nor noreste (NNE) y este (E).

En la estación ubicada en el Batolito de la Caldera (CA-06) los flujos de viento cambiaron respecto a las estaciones ubicadas dentro de la UP Cerro Verde, en este punto para el periodo diurno los vientos (Brisa moderada) provienen del oeste (W) y noroeste (NW), influenciados principalmente por los vientos provenientes de la cuenca



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

atmosférica de Arequipa³⁴ y durante el periodo nocturno los vientos (brisa ligera) provienen del suroeste (SW).

Las estaciones ubicadas en el Banco Minero (CA-02) y la I.E. Corazón de Jesús (CA-04) los flujos de vientos fueron similares, donde los vientos (brisa suave) en periodo diurno provienen del noroeste (NW) y del norte (N), mientras que en el periodo nocturno los vientos (ventolina) provienen del sureste (SE), de acuerdo a los flujos de viento de la cuenca atmosférica de Arequipa.

La estación de monitoreo ubicado en el Pueblo Joven Cerro Verde los flujos de viento (brisa ligera) en periodo diurno provienen del sur (S), sureste (SE) y este (E), mientras que en el periodo nocturno (ventolina) provienen del norte (N), nor noroeste (NNW) y en menor frecuencia del oeste (W).

³⁴

Consejo Nacional del Ambiente. 2005. Gesta Zonal del Aire Arequipa. Plan a Limpiar el Aire: Arequipa.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

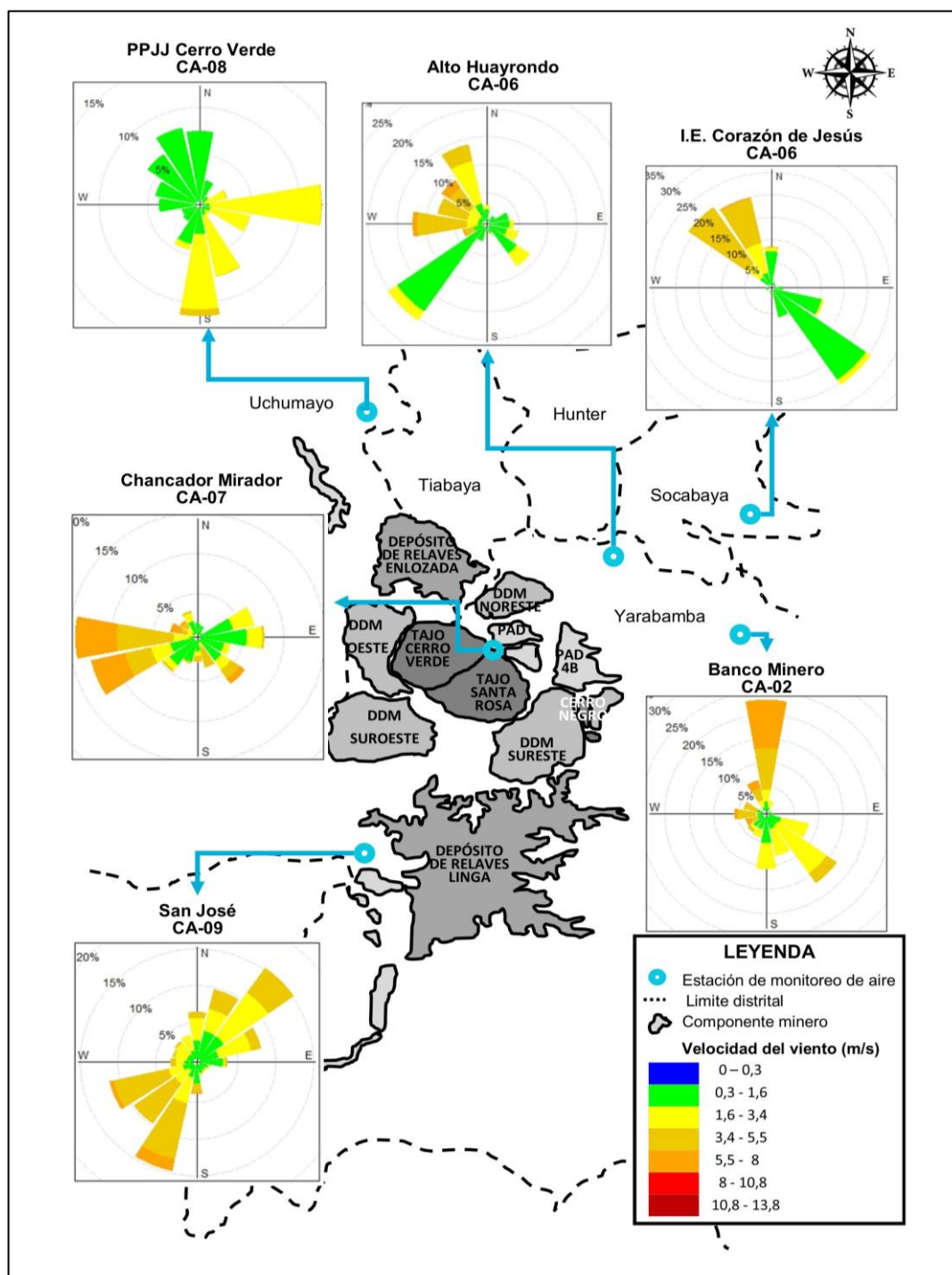


Figura 6-22. Rosa de vientos de las estaciones de monitoreo registradas del 05 al 19 de setiembre de 2018

6.2.2 Resultados comparados con normas aprobadas en los IGA del administrado

a) Material particulado menor a 2,5 y 10 micras ($PM_{2,5}$ y PM_{10})

Las concentraciones de material particulado con diámetro menor a 2,5 micras en las estaciones de monitoreo no operacionales (CA-06, CA-08 y CA-04) fueron comparados con el D.S. N.º 003-2008-MINAM ($25 \mu g/m^3$) y las concentraciones del material



particulado con diámetro menor a 10 micras fueron comparados con el Decreto Supremo N.° 074-2001-PCM ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Respecto a los resultados obtenidos en las estaciones de monitoreo operacionales (CA-09, CA-07 y CA-02), las concentraciones de material particulado con diámetro menor a 10 micras y arsénico fueron comparados de manera referencial con los niveles máximos permitidos según R.M. N.° 315-96-EM/VMM ($350 \mu\text{g}/\text{m}^3$), tal como indica el IGA³⁵ del administrado; mientras que las concentraciones de material particulado con diámetro menor a 2,5 no se encuentran comprometidos con ningún estándar nacional.

En la Tabla 6-18 se muestra un resumen estadístico de las concentraciones de material particulado, donde se puede ver que en todas las estaciones de monitoreo los rangos de concentraciones y la desviación estándar fueron similares, a excepción de la estación de monitoreo CA-07, ubicado en el área de operaciones de la UP Cerro Verde; presentó un rango de concentraciones y desviación estándar mayor en comparación con las demás estaciones de monitoreo. Asimismo, se observa que de los resultados de concentración de material particulado promedio obtenidos en todas las estaciones de monitoreo, la estación CA-09 presentó el menor valor de concentración para $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10} .

Tabla 6-18. Resumen estadístico de concentraciones de material particulado

Punto de monitoreo	Parámetro ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	N	Promedio	Mediana	Desviación estándar	Rango	Mínimo	Máximo
CA-02	PM_{10}	14	52,94	56,02	12,29	45,16	22,88	68,04
	$\text{PM}_{2,5}$	14	10,41	10,45	1,49	6,21	7,53	13,74
CA-04	PM_{10}	14	86,22	86,4	12,58	41,74	65,41	107,15
	$\text{PM}_{2,5}$	14	23,06	23,26	3,06	10,96	18,71	29,67
CA-06	PM_{10}	14	58,6	58,91	9,81	30,87	43,49	74,36
	$\text{PM}_{2,5}$	14	15,15	15,75	2,64	11,32	9,5	20,82
CA-07	PM_{10}	14	279,82	285,78	82,06	282,05	160,07	442,12
	$\text{PM}_{2,5}$	14	46,46	49,56	8,51	28,6	27,58	56,18
CA-08	PM_{10}	14	71,35	70,93	11,86	37,98	50,71	88,69
	$\text{PM}_{2,5}$	14	18,9	18,51	2,95	12,11	11,94	24,05
CA-09	PM_{10}	14	39,96	39,5	15,89	51,69	12,86	64,55
	$\text{PM}_{2,5}$	14	9,92	10,25	1,92	5,26	7,35	12,61

N: Número de mediciones

Las concentraciones diarias de material particulado PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$ obtenidos durante el monitoreo en las estaciones operacionales y no operacionales se presenta en las Figuras 6-23 y 6-24.

De los resultados obtenidos en las estaciones de monitoreo operacionales, solo la estación CA-07 superó el nivel máximo permisible ($350 \mu\text{g}/\text{m}^3$) durante 3 días (Figura 6-23).

Respecto a los resultados obtenidos en las estaciones de monitoreo no operacionales, ninguno superó el valor de los ECA para aire, para PM_{10} establecido según D.S. N.° 074-2001-PCM, mientras que los valores de $\text{PM}_{2,5}$ solo el punto CA-04 superó durante 4 días el valor de los ECA para aire, establecido según D.S. N.° 003-2008-MINAM (Figuras 6-23 y 6-24).

³⁵ Estudio de Impacto Ambiental del proyecto "Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde" aprobado mediante Resolución Directoral N.° 403-2012-MEM-AAM.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Los resultados de concentración de material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ muestran que los valores obtenidos en las estaciones CA-06, CA-02, CA-04 y CA-08 fueron superiores en comparación con los valores obtenidos en la estación CA-09; incrementándose la concentración de $PM_{2,5}$ y PM_{10} en 70,2% y 68,4% respectivamente.

En cuanto a las concentraciones de plomo³⁶ y arsénico en el material particulado (PM_{10}), no superaron los valores establecidos en el D.S. N.º 069-2003-PCM ($0,5 \mu g/m^3$) y la R.M. N.º 315-96-EM/VMM ($6 \mu g/m^3$), respectivamente (Figuras 6-25 y 6-26).

³⁶ Las concentraciones de plomo para promedio de 24 horas son comparadas de manera referencial D.S. N.º 069-2003-PCM, ya que este considera un promedio aritmético mensual.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

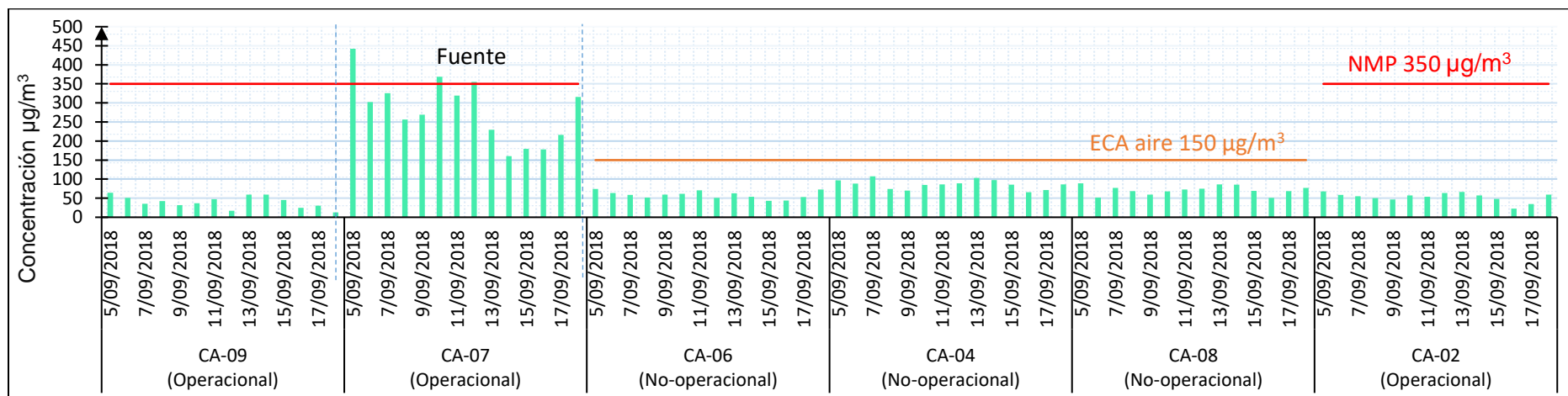


Figura 6-23. Concentración de material particulado con diámetro menor a 10 micras

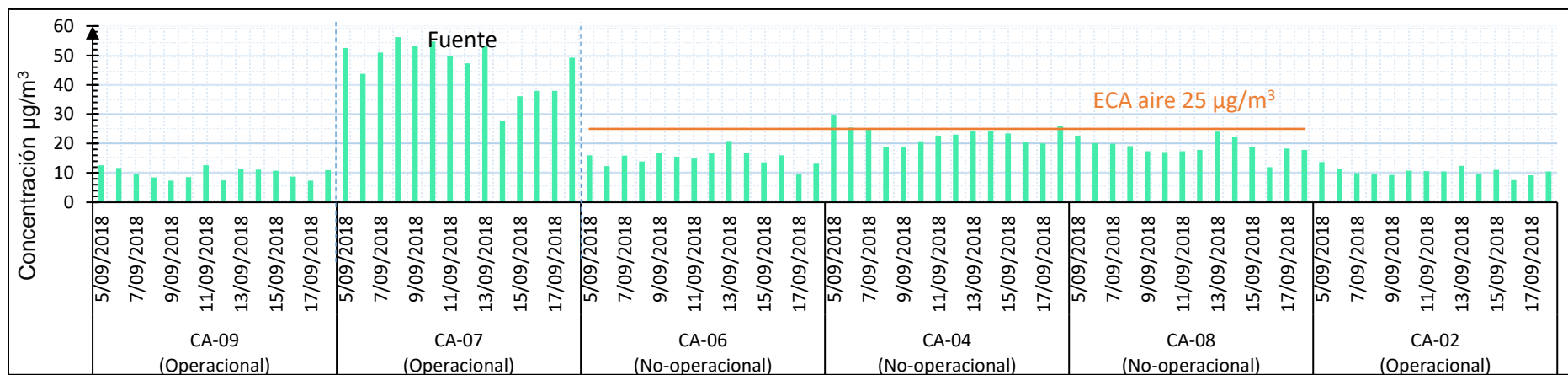


Figura 6-24. Concentración de material particulado con diámetro menor a 2,5 micras

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

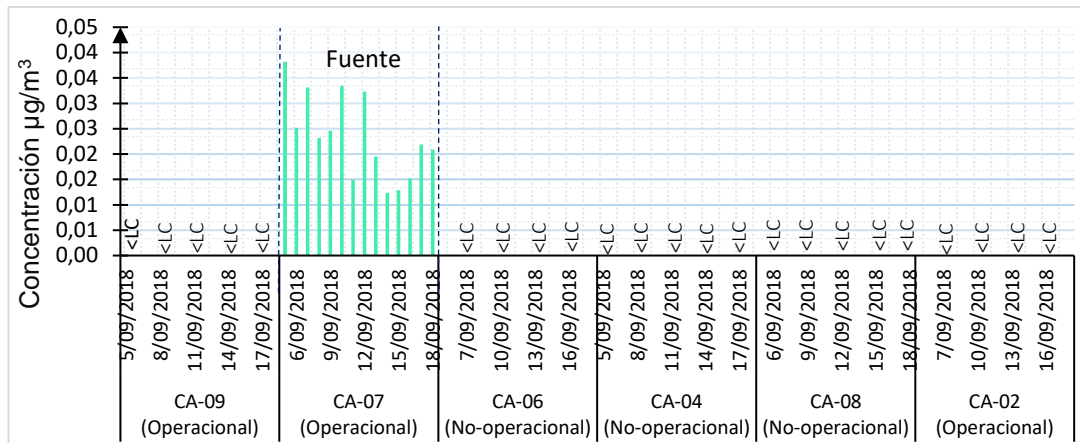


Figura 6-25. Concentración de arsénico en PM₁₀ registrados en las estaciones de monitoreo
 <LC: Concentración menor al límite de cuantificación del método del laboratorio

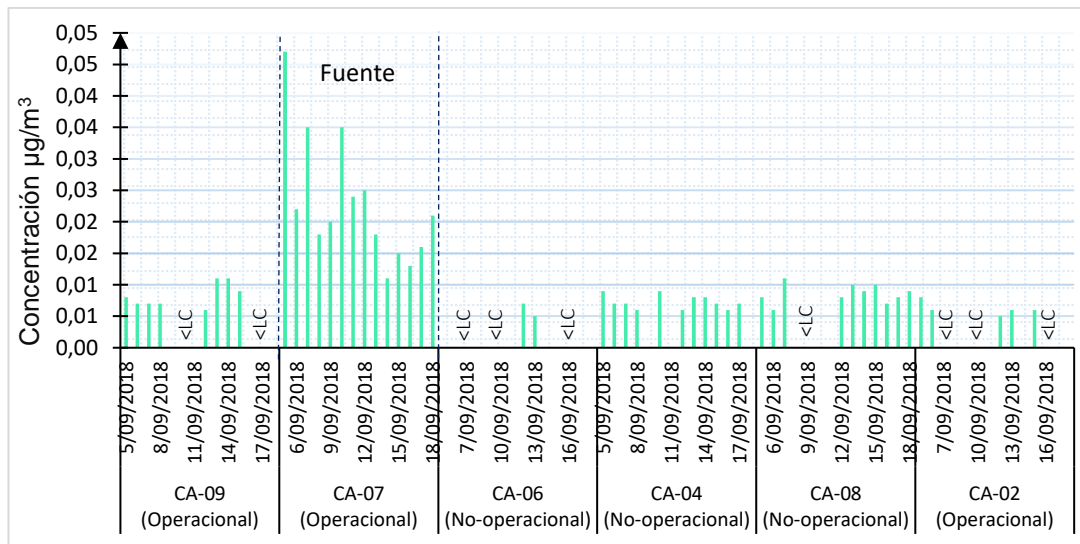


Figura 6-26. Concentración de plomo en PM₁₀ registrados en las estaciones de monitoreo
 <LC: Concentración menor al límite de cuantificación del método del laboratorio

6.2.3 Resultados comparados con estándares vigentes

a) Material particulado menor a 2,5 y 10 micras (PM_{2,5} y PM₁₀)

Las concentraciones de material particulado con diámetro menor a 2,5 y 10 micras en todas las estaciones de monitoreo fueron comparadas con el estándar vigente, establecido según D.S. N.º 003-2017-MINAM. El resumen estadístico de las concentraciones de material particulado (Tabla 6-18) y su descripción se presenta en la sección 6.2.2.

Las concentraciones diarias de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} obtenidos en las estaciones operacionales y no operacionales se resume en la Figuras 6-27 y 6-28.

De los resultados obtenidos en las estaciones de monitoreo operacional, solo la estación CA-07 superó el estándar PM_{10} ($100 \mu g/m^3$) durante todos los días (Figura 6-27), mientras que para los valores de $PM_{2,5}$ solo la estación CA-07 superó durante 6 días el valor de los ECA para aire, establecido según Decreto Supremo N.º 003-2017-MINAM (Figura 6-28).

Respecto a los resultados obtenidos en las estaciones de monitoreo no operacionales, solo la estación CA-04 superó el valor de los ECA para aire para PM_{10} establecido según



Decreto Supremo N.º 003-2017-MINAM durante 2 días, mientras que los valores de $PM_{2.5}$ ninguna estación superó el valor de los ECA para aire, establecido según Decreto Supremo N.º 003-2017-MINAM (Figuras 6-27 y 6-28).

b) Concentración de metales en material particulado con diámetro menor a 10 micras PM_{10}

Dado que, en el Perú no se cuenta con estándares de calidad ambiental que regulen las concentraciones diarias de los metales pesados en el aire, se tomó como referencia la norma «*Ontario's Ambient Air Quality Criteria*» (2012) del Ministerio del Ambiente de Ontario – Canadá, para periodos de 24 horas.

Los metales como antimonio, arsénico, berilio, boro, cadmio, cobalto, cromo, cobre, estaño, estroncio, hierro, manganeso, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio, titanio, uranio, vanadio y zinc evaluados en todas las estaciones durante el periodo de evaluación, no excedieron dicho estándar referencial.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

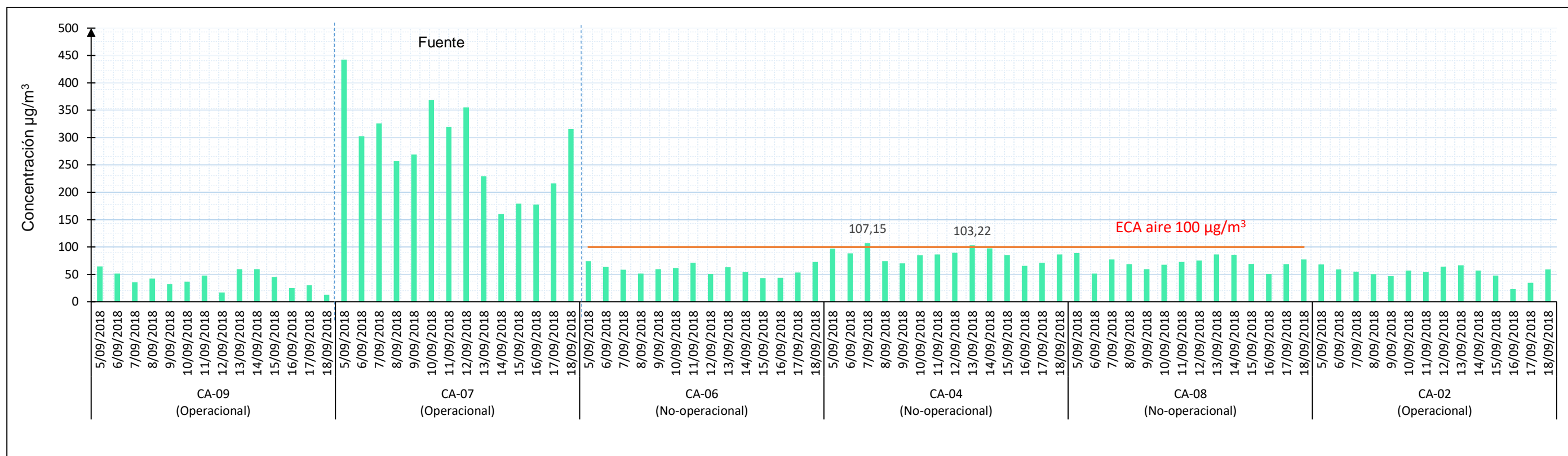


Figura 6-27. Concentración de material particulado con diámetro menor a 10 micras

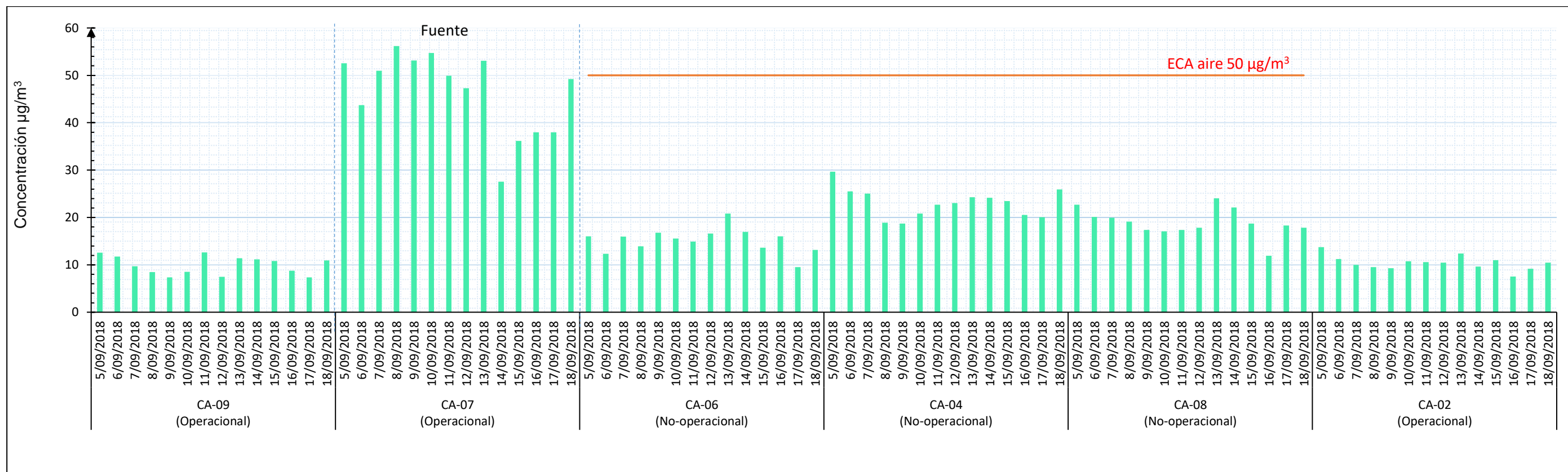


Figura 6-28. Concentración de material particulado con diámetro menor a 2,5 micras



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

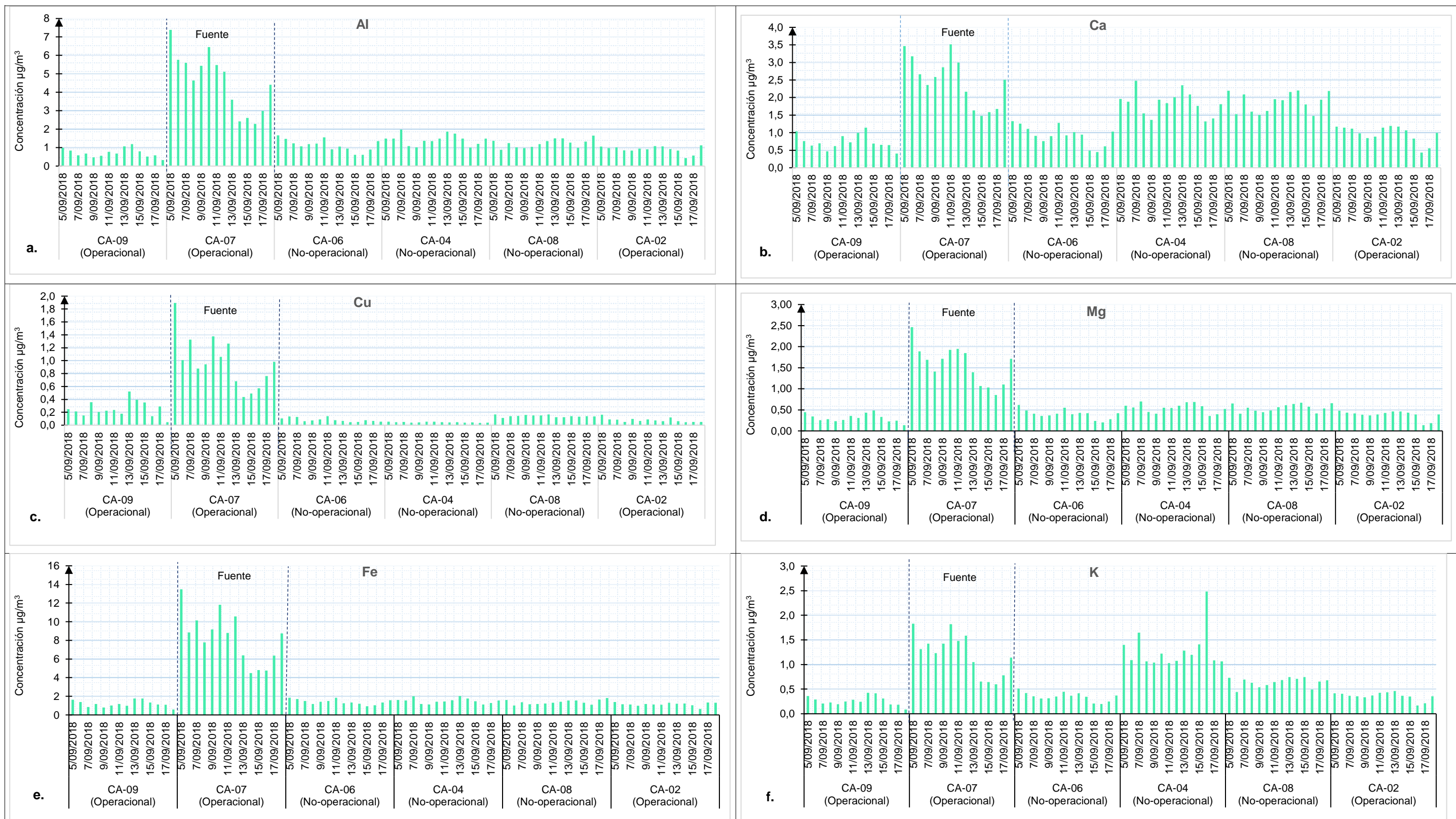


Figura 6-29. Concentración de metales en PM_{10} registrados en las estaciones de monitoreo: a. Aluminio (Al), b. Calcio (Ca), c. Cobre (Cu), d. Magnesio (Mg), e. Hierro (Fe) y f. Potasio (K) .

6.3 Estudios especializados

En esta sección se presenta los resultados de agua subterránea, caracterización geológica, roca y componentes mineros, prospección geofísica, hidroquímica, suelo y polvo sedimentado. Se detalla la distribución de zonas por cada componente, según corresponda (Figura 6-30).

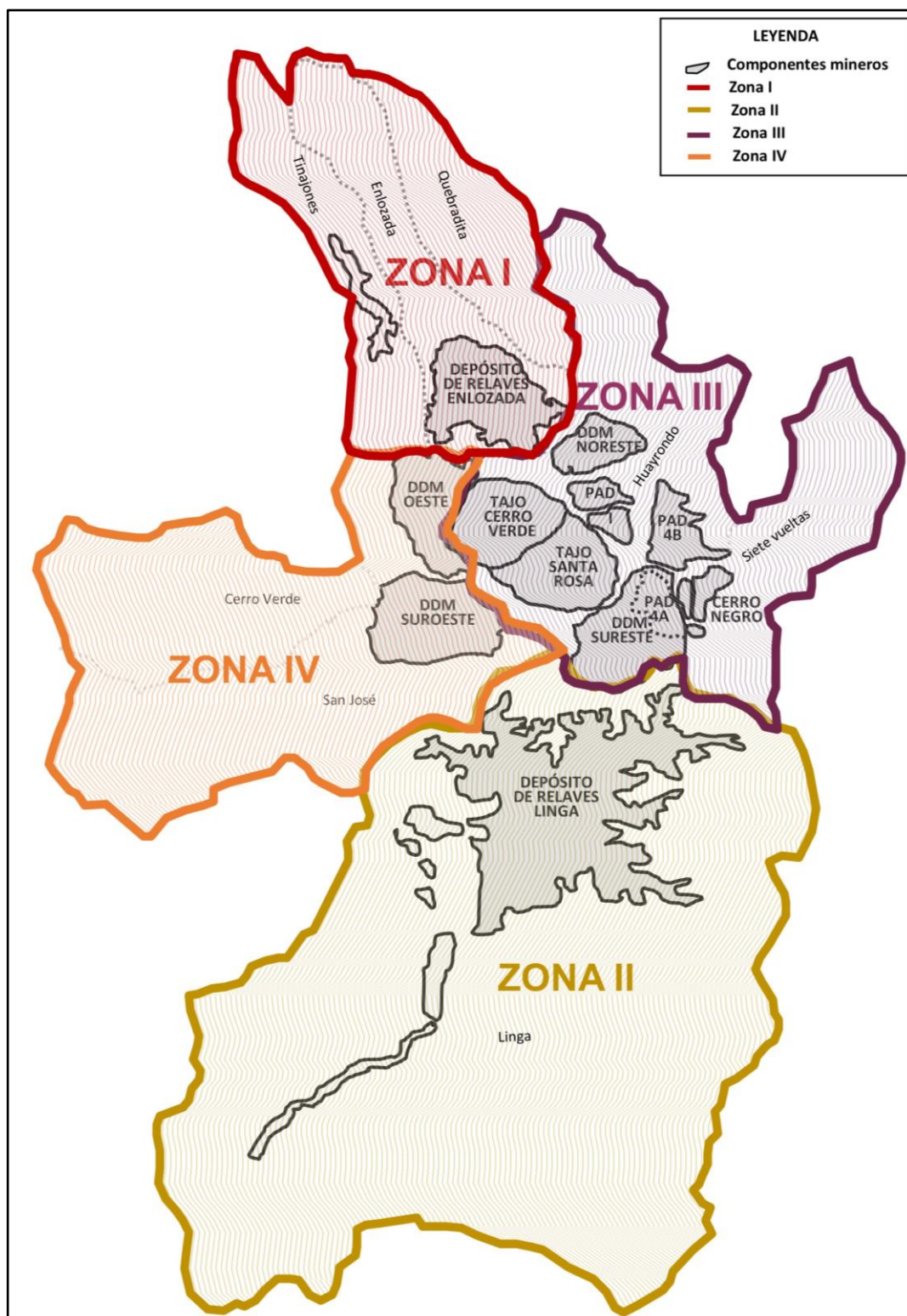


Figura 6-30. Esquema de la distribución de zonas evaluadas



6.3.1 Agua subterránea

Se presentan los valores máximos y mínimos registrados de los parámetros evaluados en abril, mayo y julio de 2018 en el agua subterránea del área de influencia de la UP Cerro Verde. El mayor detalle de los resultados de los parámetros evaluados se encuentran en el Anexo 3.

6.3.1.1 Zona I: Depósito de relaves Enlozada

Esta zona comprende las microcuencas Quebradita, Enlozada y Tinajones donde se evaluó el agua subterránea mediante 37 piezómetros.

En la Tabla 6-19 se presenta los valores máximos y mínimos obtenidos en los parámetros evaluados en las aguas subterráneas de los piezómetros de la zona I. Asimismo, en la Figura 6-31 se presenta en forma esquemática la ubicación de los piezómetros que presentaron las aguas subterráneas con los valores máximos.

Tabla 6-19. Valores máximos y mínimos obtenidos en los piezómetros evaluados en la zona I

Parámetro	Unidad	Valor	Código	Mayo 2018	Código	Julio 2018
pH	unidad de pH	Mínimo	ASB-08	7,09	ASB-83	6,98
		Máximo	ASB-101	9,56	ASB-90	8,01
Conductividad eléctrica	µS/cm	Mínimo	ASB-110	620	ASB-90	804
		Máximo	ASB-03	7630	ASB-03	7570
Cloruros	mg/l	Mínimo	ASB-106	17,1	ASB-26	94,68
		Máximo	ASB-03	1154	ASB-83	1152
Sulfatos		Mínimo	ASB-106	56,84	ASB-90	134,4
		Máximo	ASB-03	3061	ASB-03	2404
Aluminio		Mínimo	ASB-103	0,025	ASB-08	0,011
		Máximo	ASB-85	6,788	ASB-85	5,147
Arsénico		Mínimo	ASB-102	0,00203	ASB-83	0,00192
		Máximo	ASB-112	0,06565	ASB-85	0,04726
Boro		Mínimo	ASB-110	0,261	ASB-90	0,474
		Máximo	ASB-03	9,644	ASB-03	8,78
Bario		Mínimo	ASB-103	0,0096	ASB-26	0,0037
		Máximo	ASB-108	0,1044	ASB-108	0,0649
Calcio		Mínimo	ASB-101	23,71	ASB-90	43,65
		Máximo	ASB-05	695,5	ASB-94	717,5
Molibdeno		Mínimo	ASB-91	0,00375	ASB-83	0,00106
		Máximo	ASB-101	0,5933	ASB-108	0,06857
Cobre		Mínimo	ASB-101	0,00079	ASB-117	0,00097
		Máximo	ASB-108	0,06096	ASB-83	0,06436
Hierro		Mínimo	ASB-08	0,0059	ASB-08	0,0085
		Máximo	ASB-85	6,163	ASB-98	7,39
Potasio		Mínimo	ASB-110	3,42	ASB-02	5,86
		Máximo	ASB-112	76,28	ASB-03	44,63
Magnesio		Mínimo	ASB-101	0,622	ASB-02	5,982
		Máximo	ASB-15	127,1	ASB-15	122,8
Manganeso		Mínimo	ASB-101	0,00275	ASB-117	0,00121
		Máximo	ASB-112	4,596	ASB-83	0,38335
Sodio		Mínimo	ASB-110	49,3	ASB-90	96,06
		Máximo	ASB-03	1125	ASB-03	1037
Plomo		Mínimo	ASB-08	0,0011	ASB-117	0,001
		Máximo	ASB-108	0,1233	ASB-108	0,0953
Selenio		Mínimo	ASB-82	0,0075	ASB-08 y ASB-14	0,0081
		Máximo	ASB-15	0,025	ASB-15	0,0248
Estroncio		Mínimo	ASB-101	0,2129	ASB-90	0,2529
		Máximo	ASB-03	9,518	ASB-03	7,3
Zinc		Mínimo	ASB-15	0,0127	ASB-26	0,0129
		Máximo	ASB-85	0,1424	ASB-85	0,1342

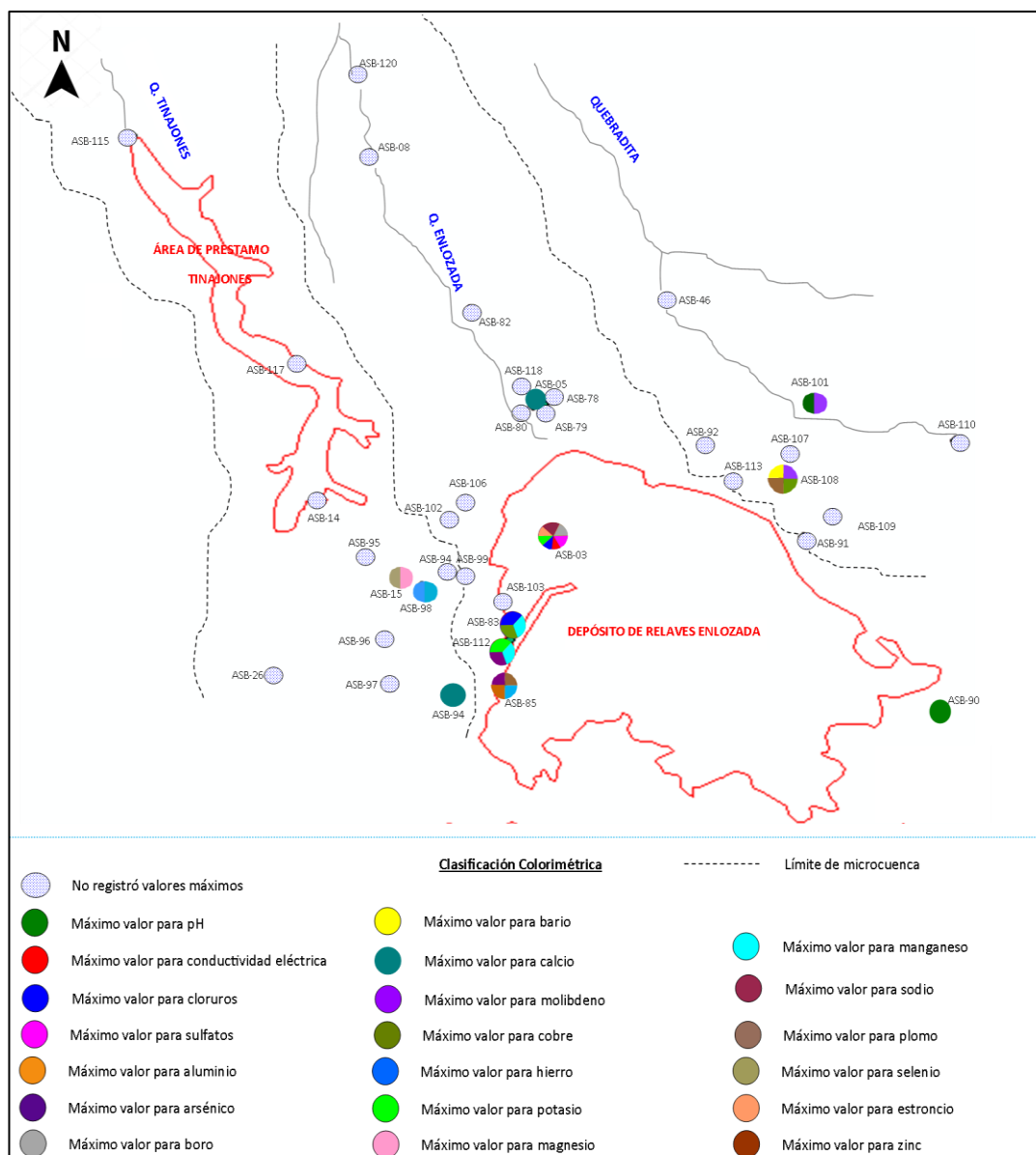


Figura 6-31. Piezómetros de la zona I que registraron valores máximos en los parámetros evaluados en agua subterránea en los meses de mayo y/o julio 2018.

En la microcuenca Quebradita, se evaluó el agua subterránea en 9 piezómetros, registrándose los máximos valores de pH en el agua subterránea del piezómetro ASB-101 (localizado aproximadamente a 1,2 km al noreste del dique del depósito de relaves Enlozada); bario, molibdeno y plomo en el agua subterránea del piezómetro ASB-108 (localizado aproximadamente a 500 m al noreste del dique del depósito de relaves Enlozada).

En la microcuenca Enlozada se evaluó el agua subterránea en 17 piezómetros, registrándose los máximos valores de cobre en el agua subterránea del punto ASB-83 (aproximadamente a 150 m al oeste del dique del depósito de relaves Enlozada); conductividad eléctrica, cloruros, sulfatos, boro, sodio y estroncio en el agua subterránea del punto ASB-03 (al pie del dique del depósito de relaves Enlozada); calcio en el agua subterránea del punto ASB-05 (aproximadamente a 170 m al noroeste del seepage Enlozada); aluminio, arsénico y zinc en el agua subterránea del punto ASB-85 (aproximadamente a 170 m al oeste del estribo izquierdo); y arsénico, potasio y manganeso en el agua subterránea en el punto ASB-112 (aproximadamente a 130 m al oeste del depósito de relaves Enlozada).



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

En la microcuenca Tinajones se evaluó el agua subterránea en 11 piezómetros, registrándose los máximos valores de magnesio y selenio en el agua subterránea del punto ASB-15 (aproximadamente a 900 m del dique de depósito de relaves Enlozada, estribo izquierdo); y hierro en el agua subterránea del punto ASB-98 (aproximadamente a 800 m al noroeste del dique del depósito de relaves Enlozada).

Los valores de cadmio, cromo, mercurio y plata estuvieron por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio en el agua subterránea en todos los puntos evaluados (piezómetros) de esta zona. A continuación, se presentan gráficas de los resultados obtenidos en esta zona (Figuras 6-32 a 6-51).



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

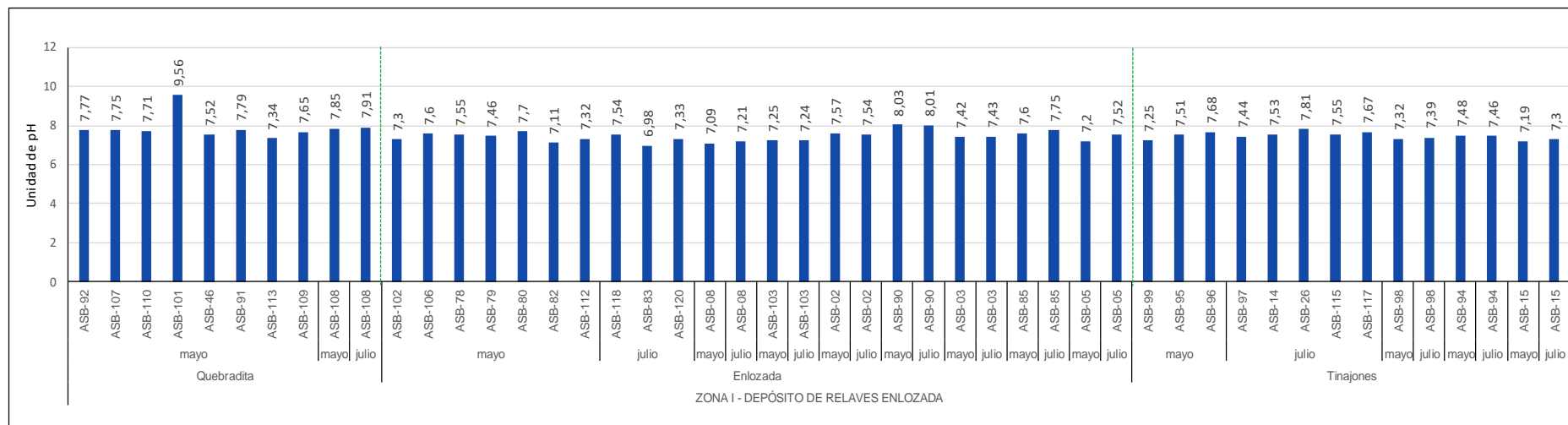


Figura 6-32. Potencial de hidrógeno en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I

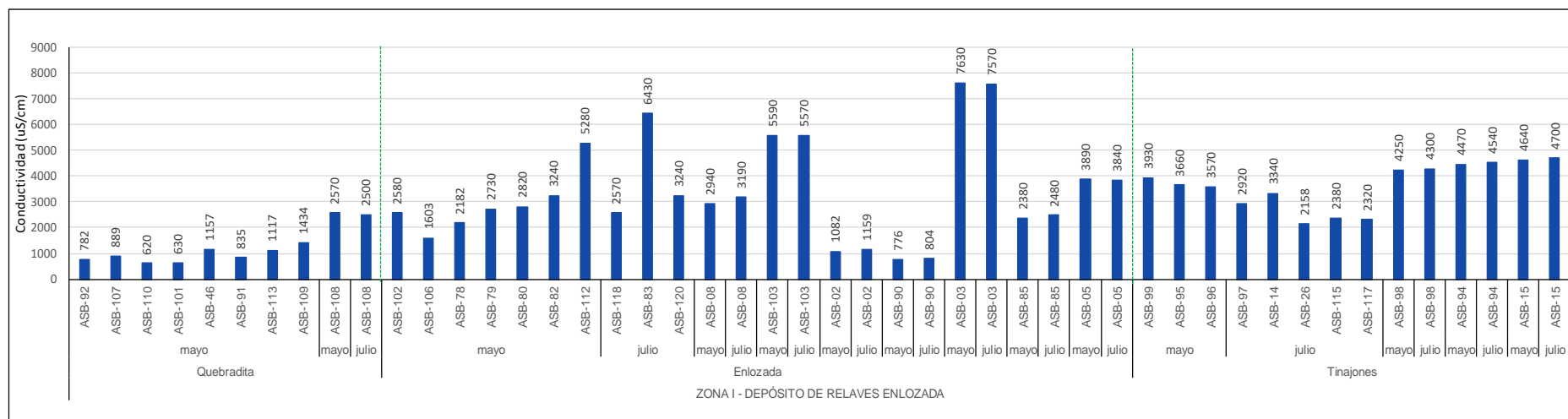


Figura 6-33. Conductividad eléctrica en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

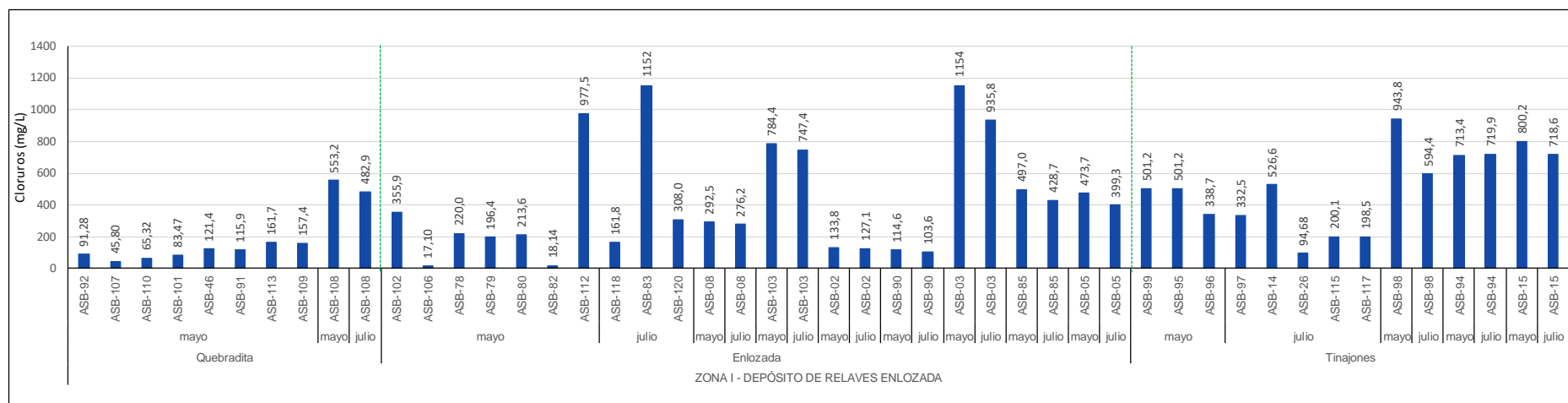


Figura 6-34. Cloruros en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I

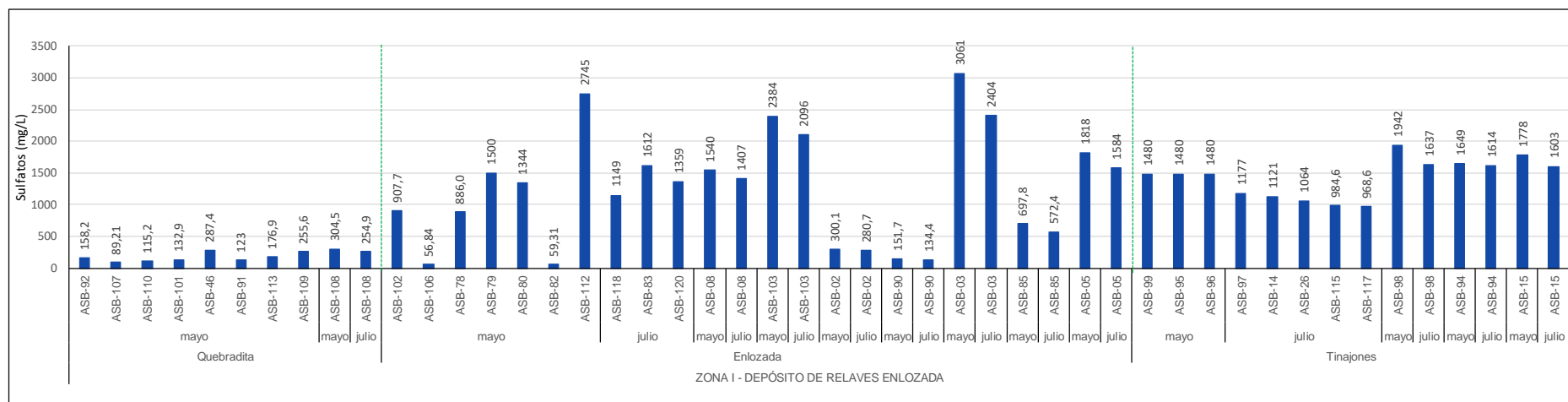


Figura 6-35. Sulfatos en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

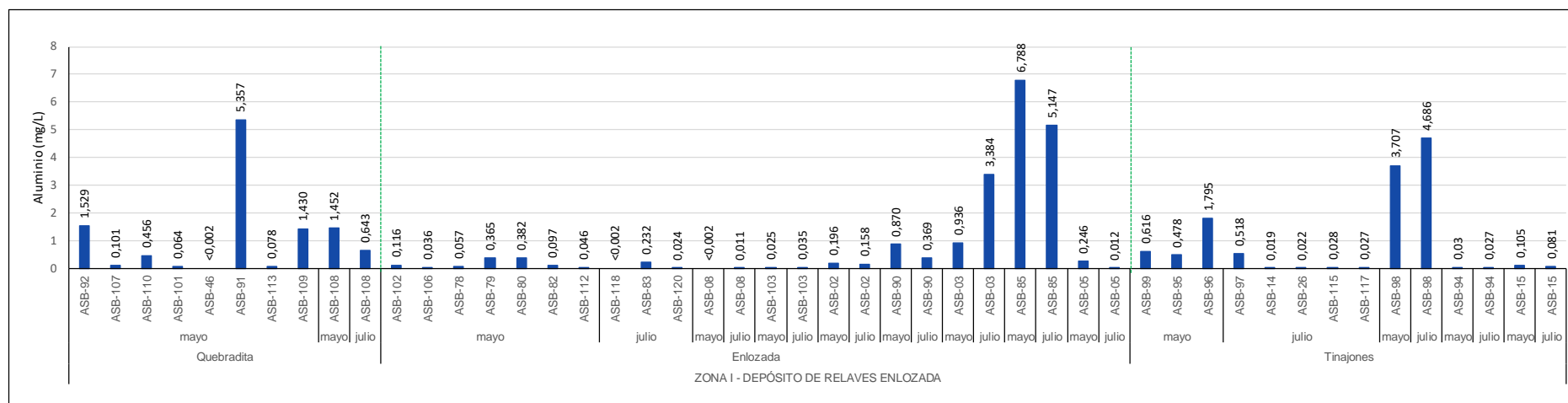


Figura 6-36. Aluminio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I

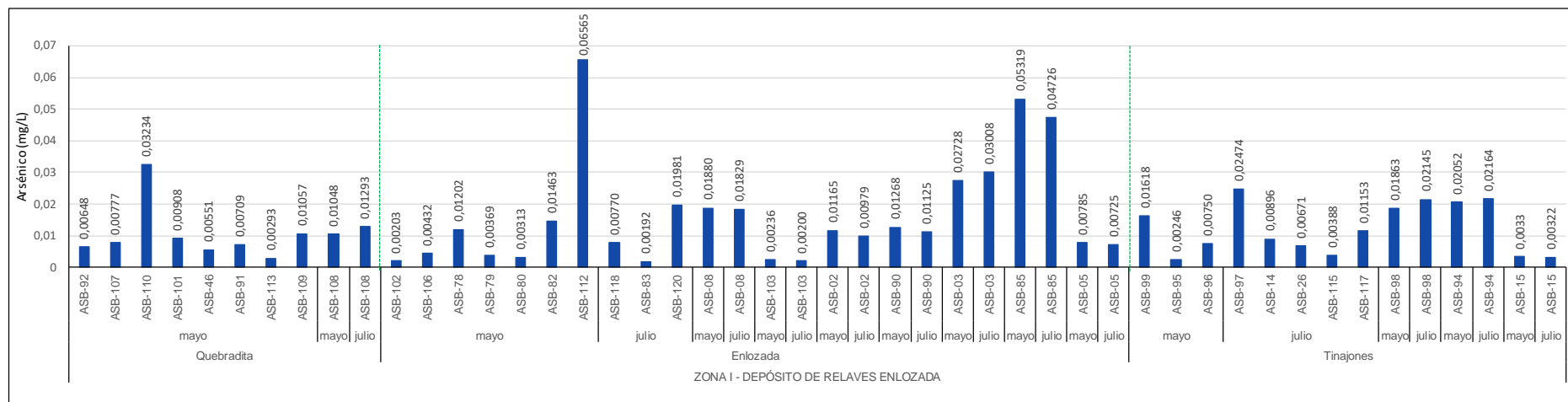


Figura 6-37. Arsénico en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

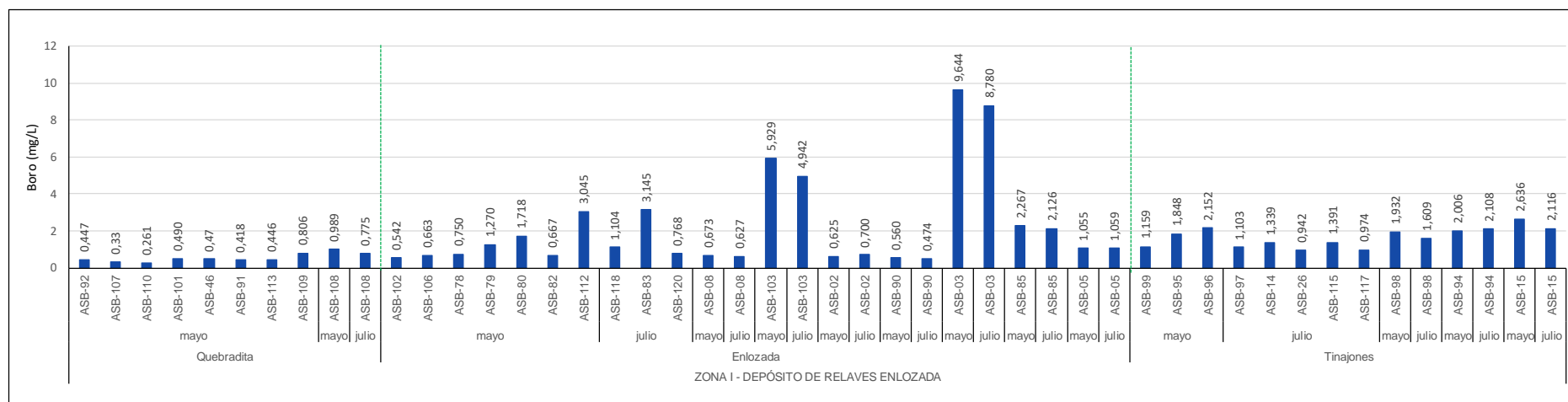


Figura 6-38. Boro en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I

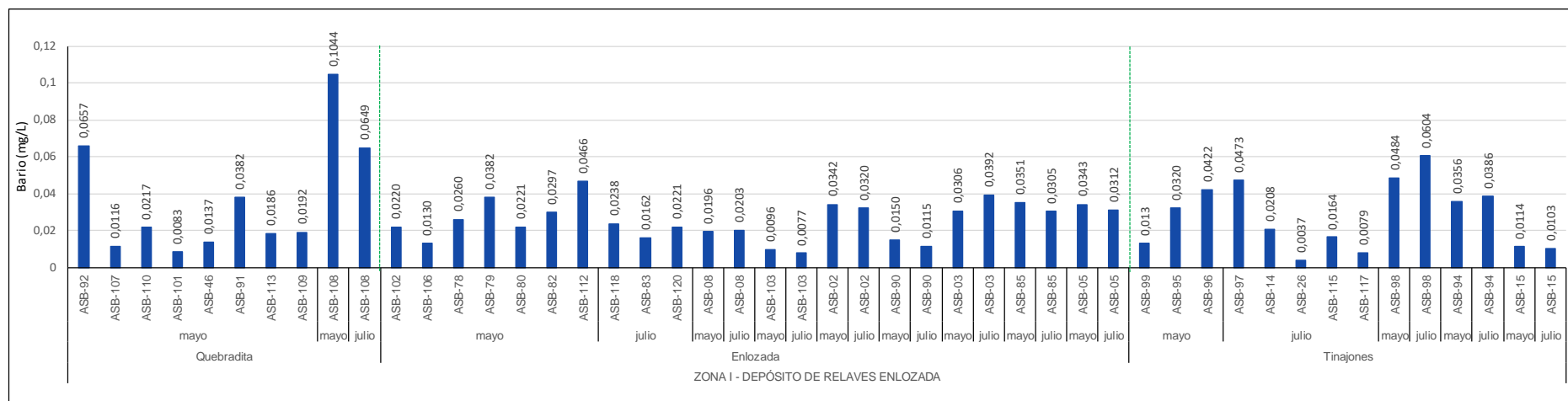


Figura 6-39. Bario en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

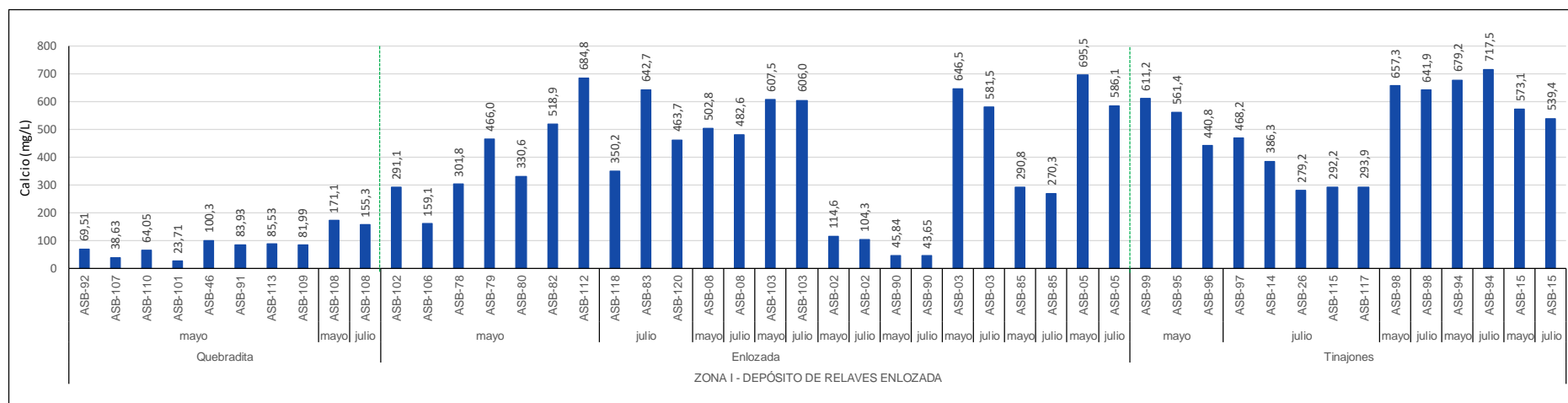


Figura 6-40. Calcio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I

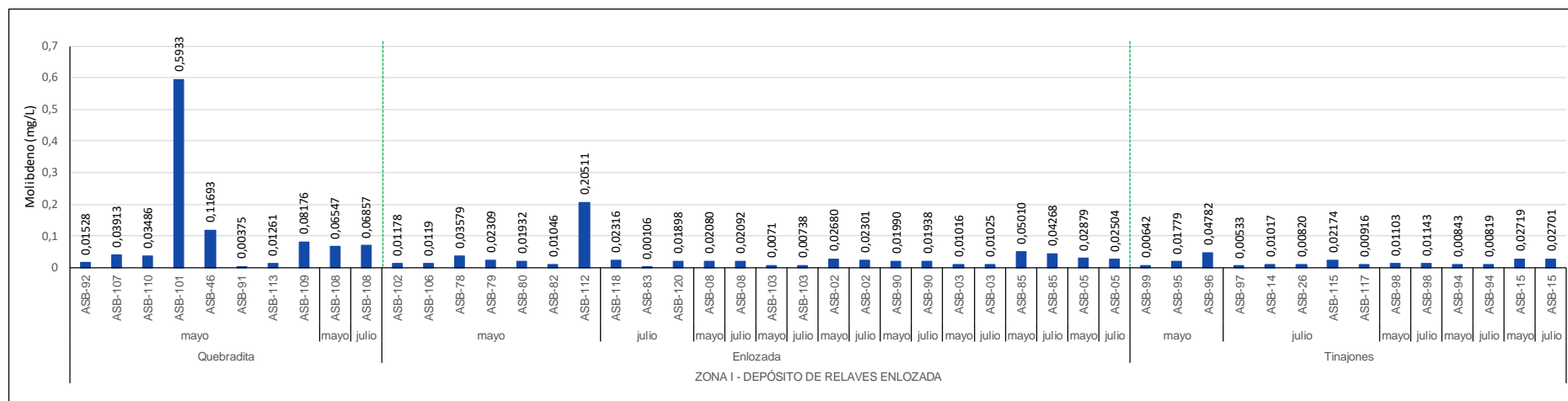


Figura 6-41. Molibdeno en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

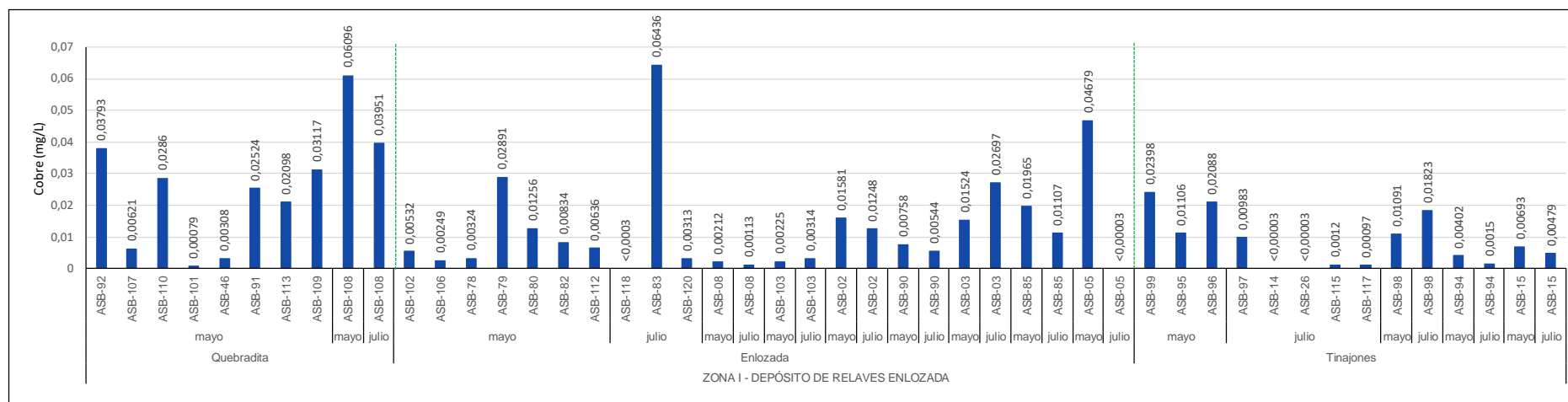


Figura 6-42. Cobre en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I

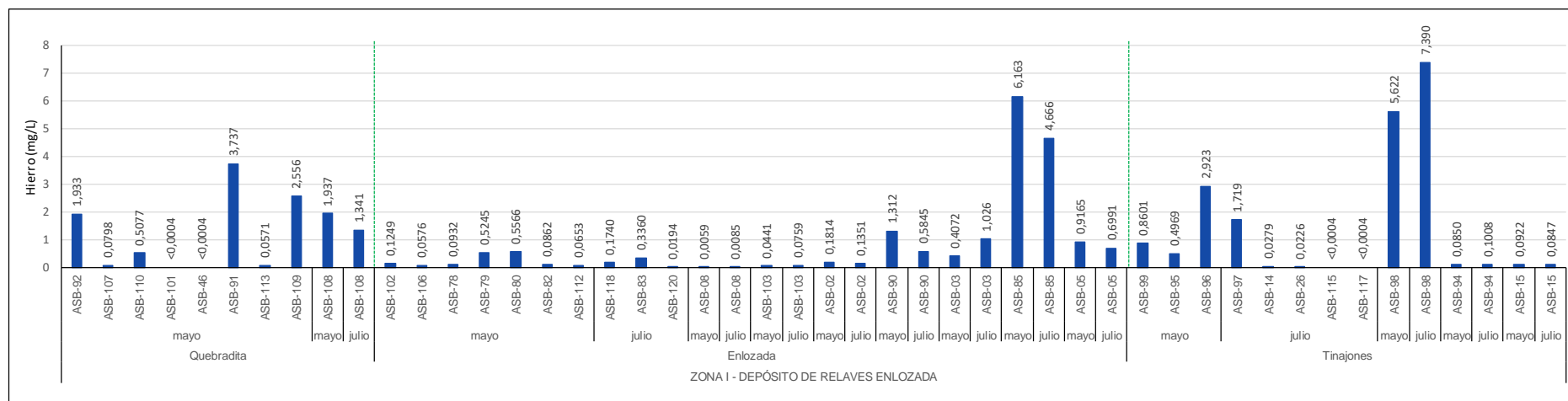


Figura 6-43. Hierro en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

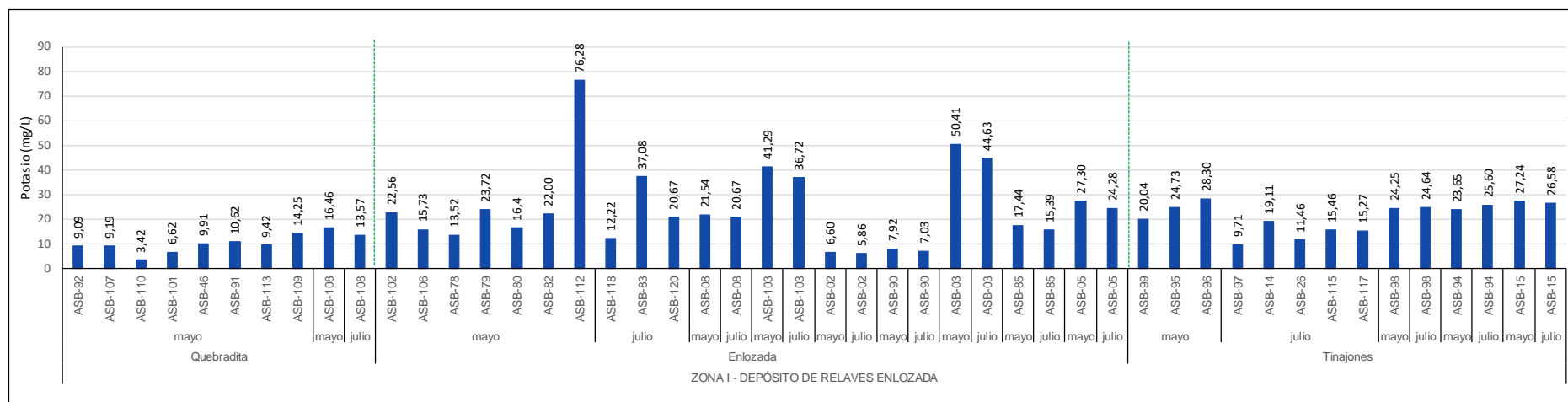


Figura 6-44. Potasio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I

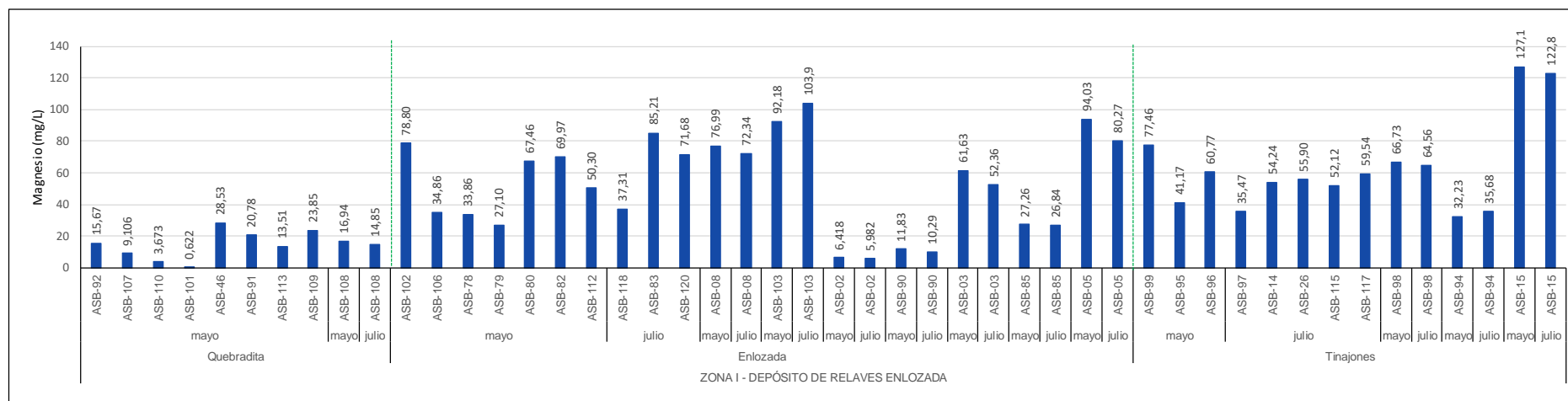


Figura 6-45. Magnesio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

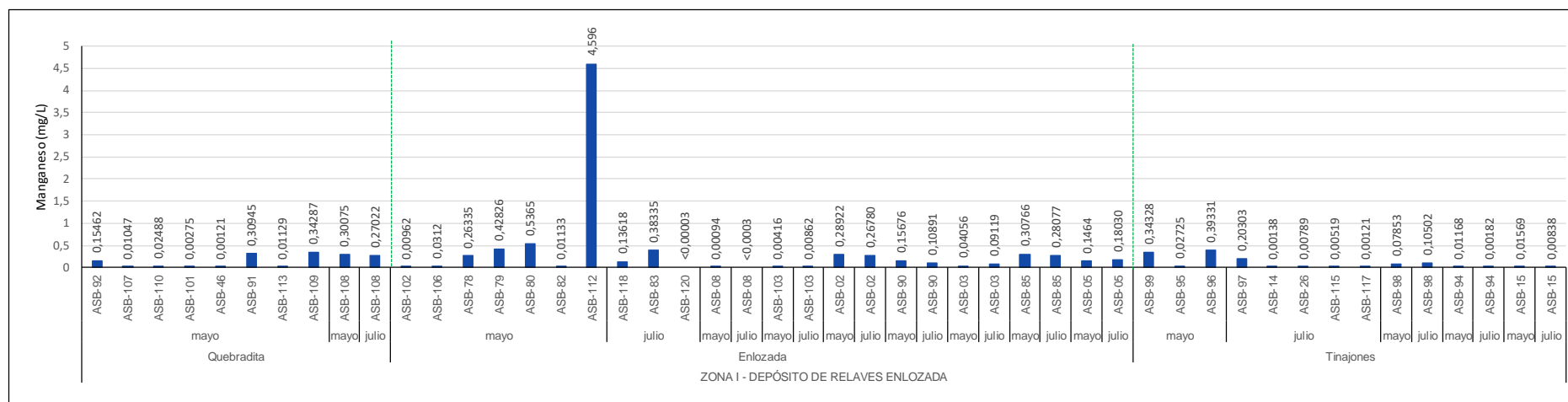


Figura 6-46. Manganeso en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I

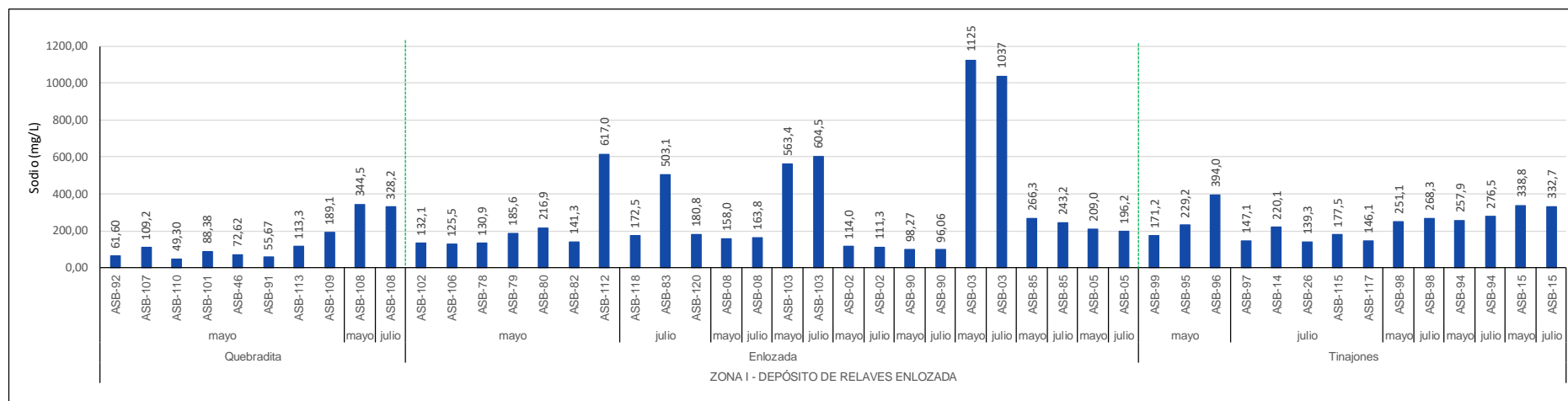


Figura 6-47. Sodio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

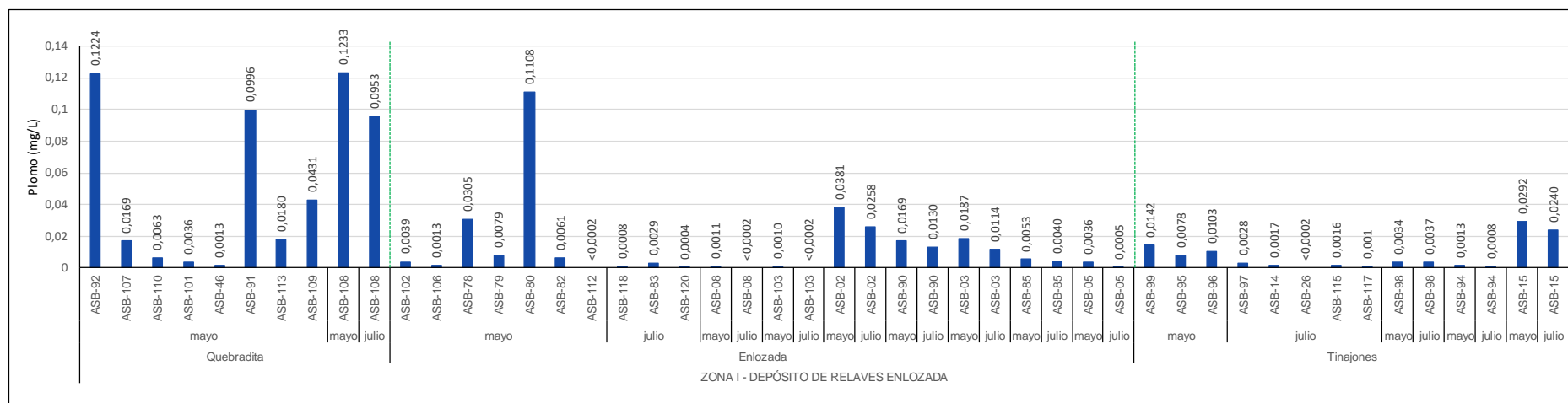


Figura 6-48. Plomo en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I

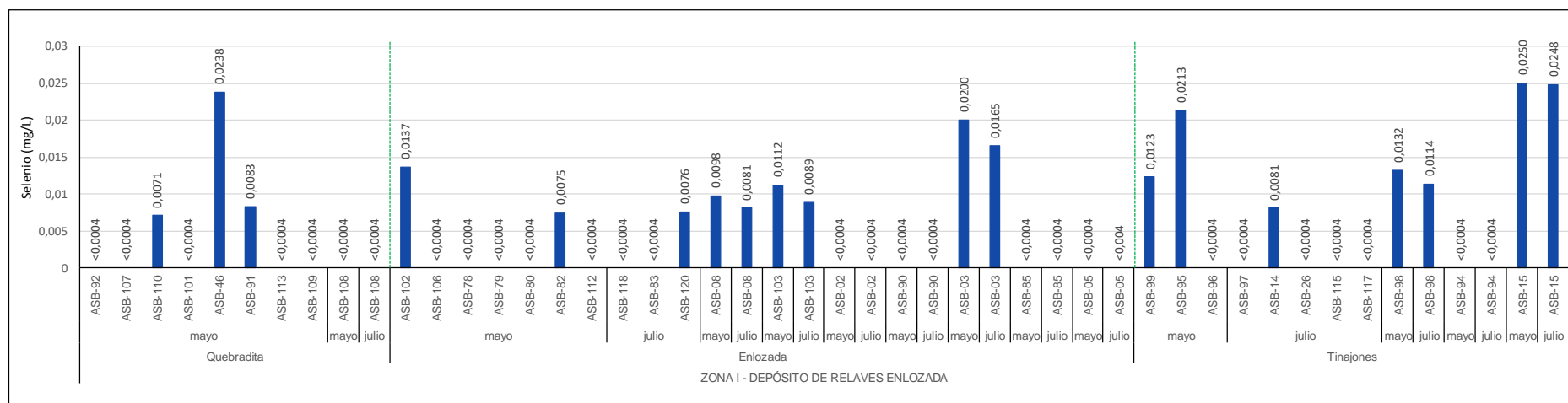


Figura 6-49. Selenio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

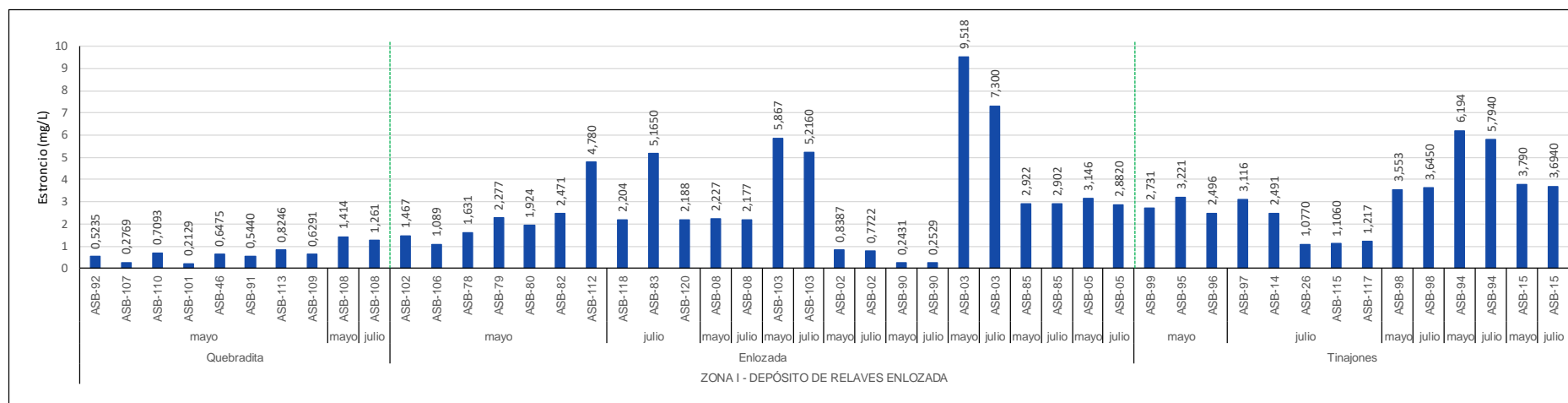


Figura 6-50. Estroncio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I

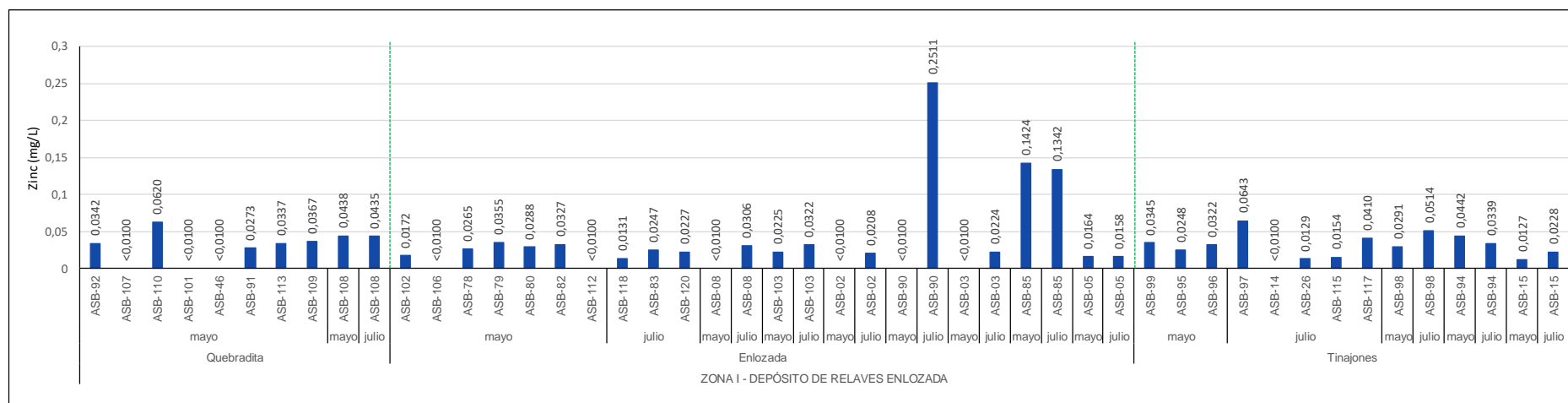


Figura 6-51. Zinc en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona I

**6.3.1.2 Zona II: Depósito de relaves Linga**

Esta zona comprende la microcuenca Linga donde se evaluó el agua subterránea de 13 piezómetros.

En la Tabla 6-20 se presentan los valores máximos y mínimos obtenidos en los parámetros evaluados en el agua subterránea de los piezómetros de la zona II. Asimismo, en la Figura 6-52 se muestra en forma esquemática la ubicación de los piezómetros que presentaron los valores máximos.

Tabla 6-20. Valores máximos y mínimos obtenidos en los piezómetros evaluados en la zona II

Parámetro	Unidad	Valor	código	abril	código	julio
pH	unidad de pH	Mínimo	ASB-53	6,83	ASB-48	6,99
		Máximo	ASB-50	8,05	ASB-116	9,20
Conductividad eléctrica	µS/cm	Mínimo	ASB-74	630	ASB-111	1183
		Máximo	ASB-40	50900	ASB-40	43400
Cloruros	mg/l	Mínimo	ASB-74	76,18	ASB-111	84,3
		Máximo	ASB-50	19530	ASB-40	16387
Sulfatos		Mínimo	ASB-74	161,3	ASB-116	229,1
		Máximo	ASB-48	1634	ASB-48	1471
Aluminio		Mínimo	ASB-53	0,016	ASB-53	0,016
		Máximo	ASB-74	1,855	ASB-119	4,936
Arsénico		Mínimo	ASB-55	0,00333	ASB-55	0,00171
		Máximo	ASB-40	6,461	ASB-40	2,775
Boro		Mínimo	ASB-74	0,355	ASB-116	0,345
		Máximo	ASB-40	16,79	ASB-40	8,469
Bario		Mínimo	ASB-54	0,0073	ASB-114	0,0115
		Máximo	ASB-40	0,2481	ASB-40	0,3358
Calcio		Mínimo	ASB-74	60,82	ASB-116	56,98
		Máximo	ASB-40	6682	ASB-40	4682
Molibdeno		Mínimo	ASB-54	0,02257	ASB-114	0,00784
		Máximo	ASB-48	0,14058	ASB-119	0,26819
Cobre		Mínimo	ASB-40	0,00142	ASB-55	0,00055
		Máximo	ASB-74	0,06358	ASB-119	0,05822
Hierro		Mínimo	ASB-51	0,0197	ASB-55	0,0121
		Máximo	ASB-74	10,42	ASB-119	50,07
Potasio		Mínimo	ASB-74	4,66	ASB-55	7,16
		Máximo	ASB-40	39,37	ASB-40	36,69
Magnesio		Mínimo	ASB-74	3,42	ASB-116	3,383
		Máximo	ASB-51	171,8	ASB-48	82,16
Manganeso		Mínimo	ASB-54	0,00748	ASB-116	0,02468
		Máximo	ASB-40	1,623	ASB-40	4,204
Sodio		Mínimo	ASB-74	63,32	ASB-111	76,42
		Máximo	ASB-40	6080	ASB-40	4491
Plomo		Mínimo	ASB-53	0,001	ASB-55	0,0005
		Máximo	ASB-74	1,724	ASB-119	0,5576
Selenio		Mínimo	ASB-74	0,004	ASB-55	0,0022
		Máximo	ASB-48	0,00722	ASB-48	0,0549
Estroncio		Mínimo	ASB-54	0,4139	ASB-111	0,358
		Máximo	ASB-40	100,8	ASB-40	71,13
Zinc		Mínimo	ASB-54	0,0155	ASB-48	0,019
		Máximo	ASB-74	0,1385	ASB-119	0,1335

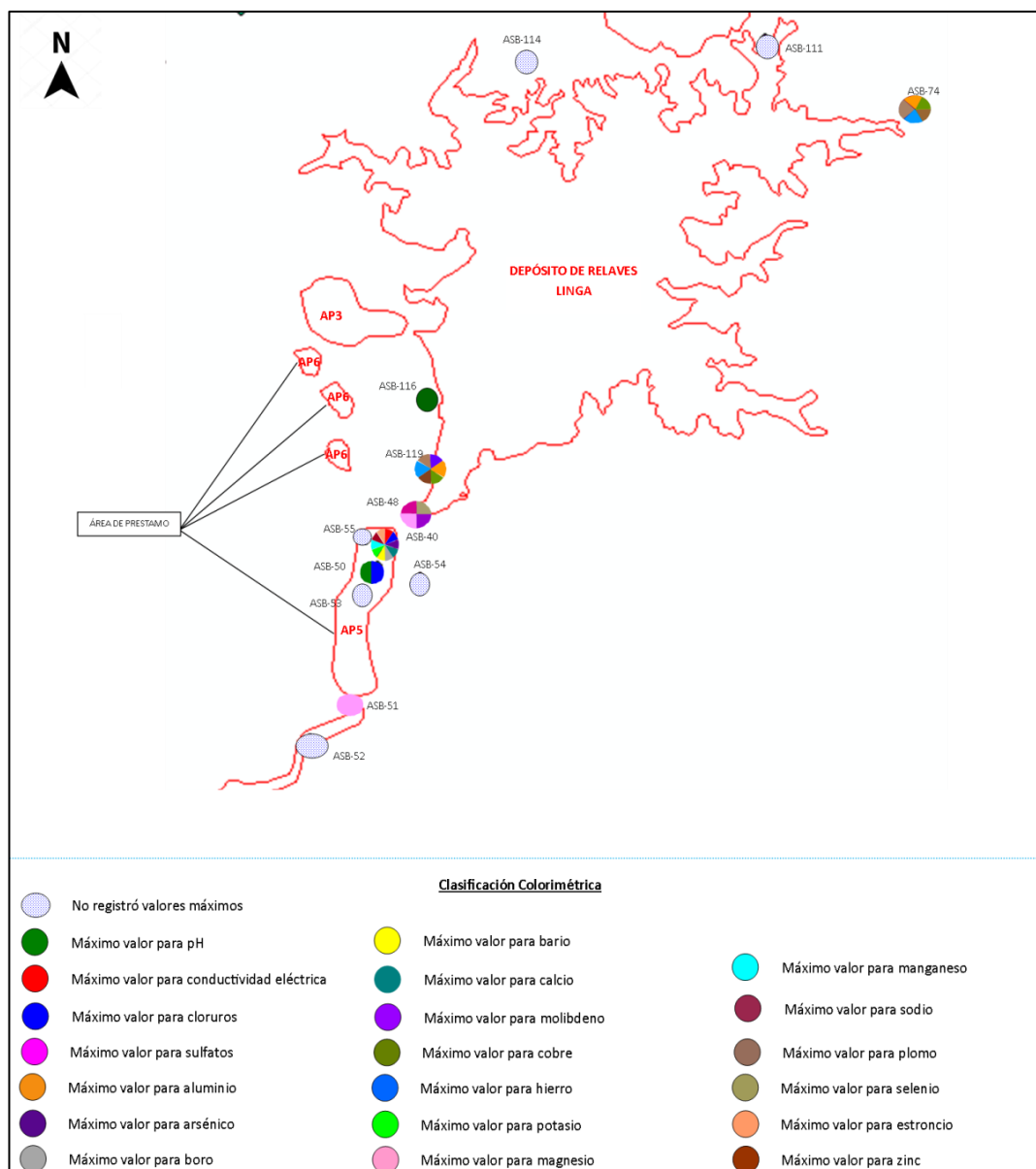


Figura 6-52. Piezómetros de la zona II que registraron valores máximos en los parámetros evaluados en agua subterránea en los meses de abril y/o julio 2018.

En la microcuenca Linga se registraron los máximos valores de cloruros en el agua subterránea del punto ASB-50 (aproximadamente a 400 m al suroeste del seepage Linga); conductividad eléctrica, arsénico, boro, bario, calcio, potasio, manganeso, sodio y estroncio en el agua subterránea del punto ASB-40 (aproximadamente a 200 m al sureste del seepage Linga).

También se registraron valores máximos de sulfatos y selenio en el agua subterránea del punto ASB-48 (aproximadamente a 1,5 km del dique del depósito de relaves Linga); cobre, plomo y zinc en el agua subterránea del punto ASB-74 (al noreste del depósito de relaves Linga); y magnesio en el agua subterránea del punto ASB-51 (aproximadamente a 2 km al suroeste del seepage Linga).

Los máximos valores de pH fueron reportados en el agua subterránea del punto ASB-116 (aproximadamente a 600 m al oeste del dique del depósito de relaves Linga estribo derecho); aluminio, molibdeno, hierro en el agua subterránea del punto ASB-119 (aproximadamente a 1,2 km al suroeste del dique del depósito de relaves Linga, y a 280 m al suroeste del afloramiento AFL-01).

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Los valores de cadmio, cromo, mercurio y plata estuvieron por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio en el agua subterránea de todos los piezómetros evaluados en esta zona. A continuación, se presentan gráficas de los resultados obtenidos en los piezómetros de esta zona (Figuras 6-53 a 6-72).

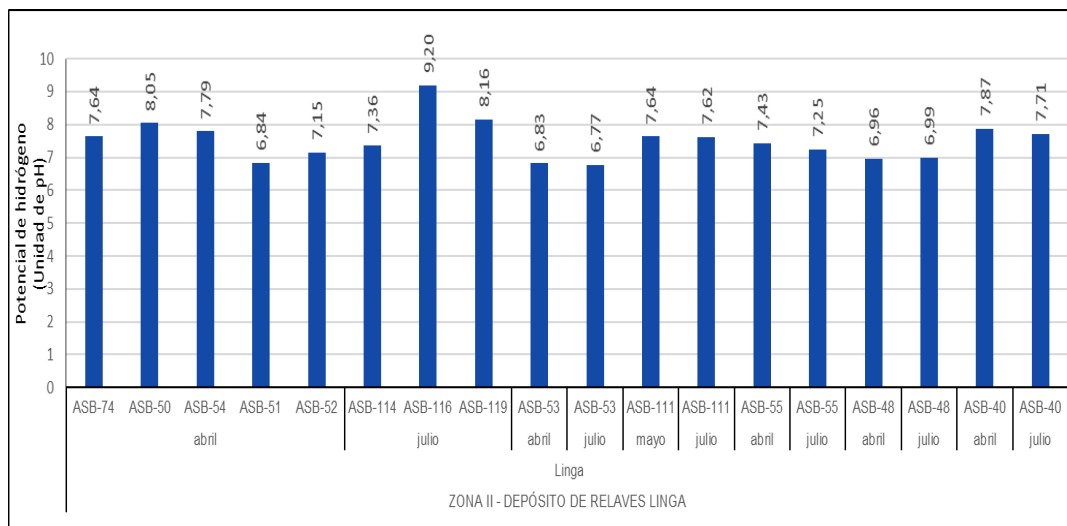


Figura 6-53. Potencial de hidrógeno en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

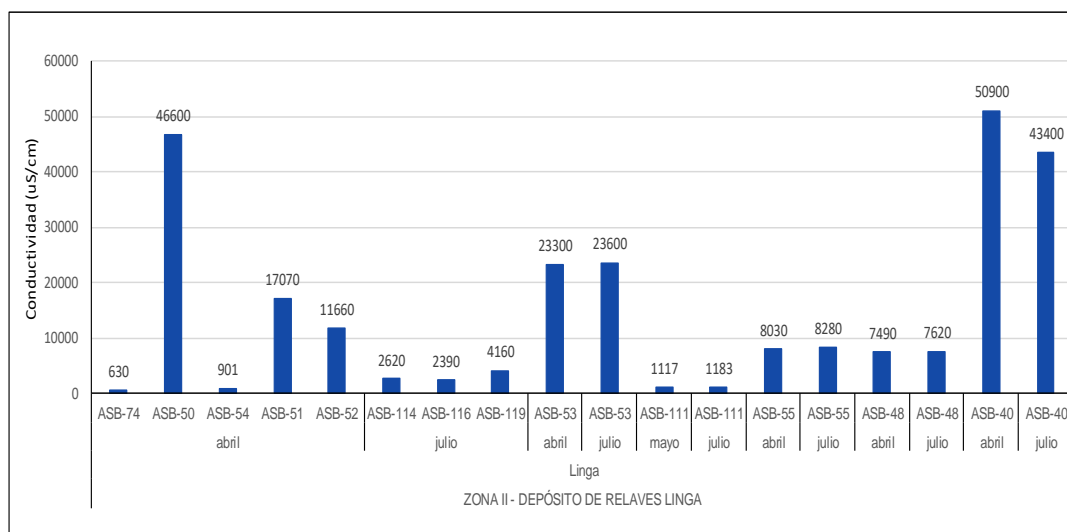


Figura 6-54. Conductividad eléctrica en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

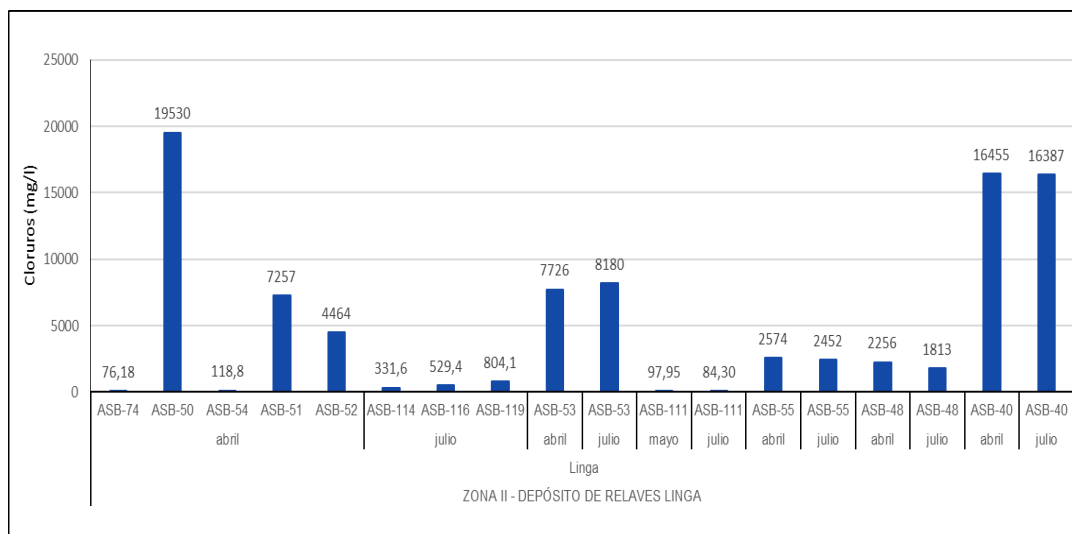


Figura 6-55. Cloruros en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

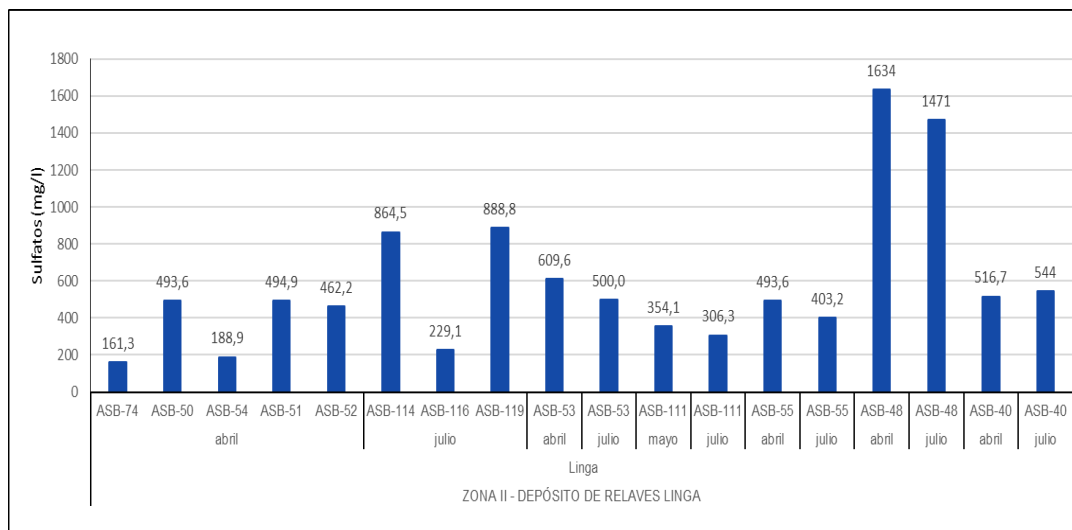


Figura 6-56. Sulfatos en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

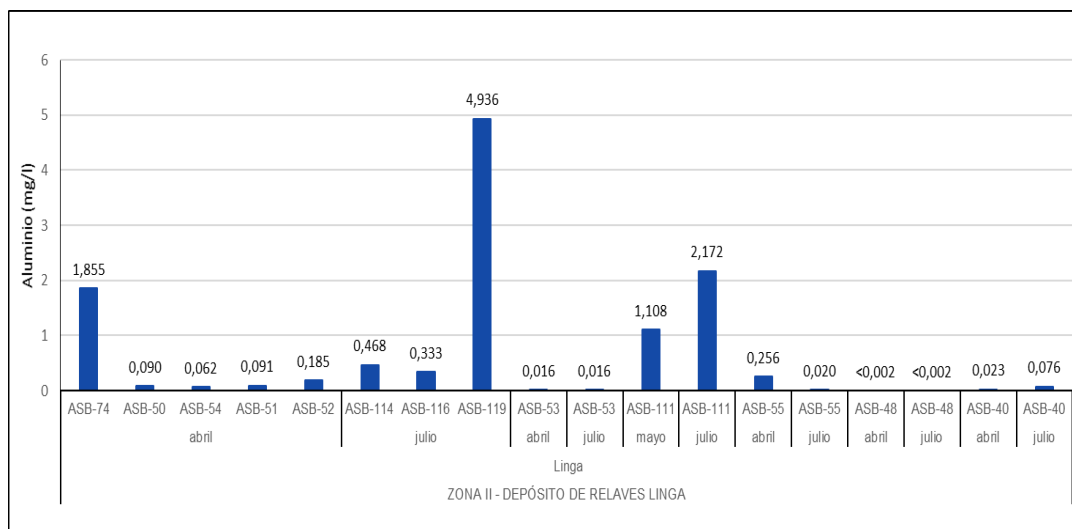


Figura 6-57. Aluminio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

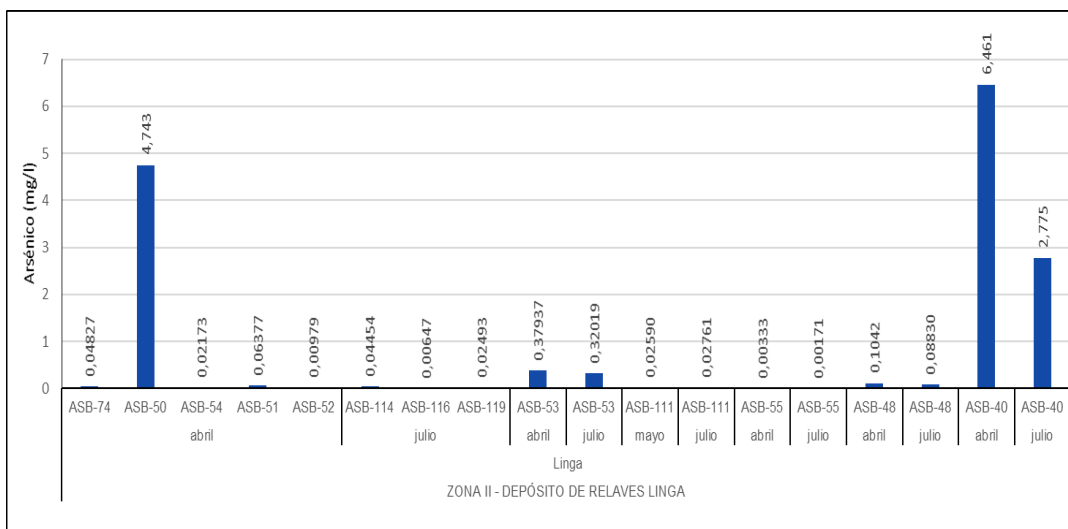


Figura 6-58. Arsénico en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

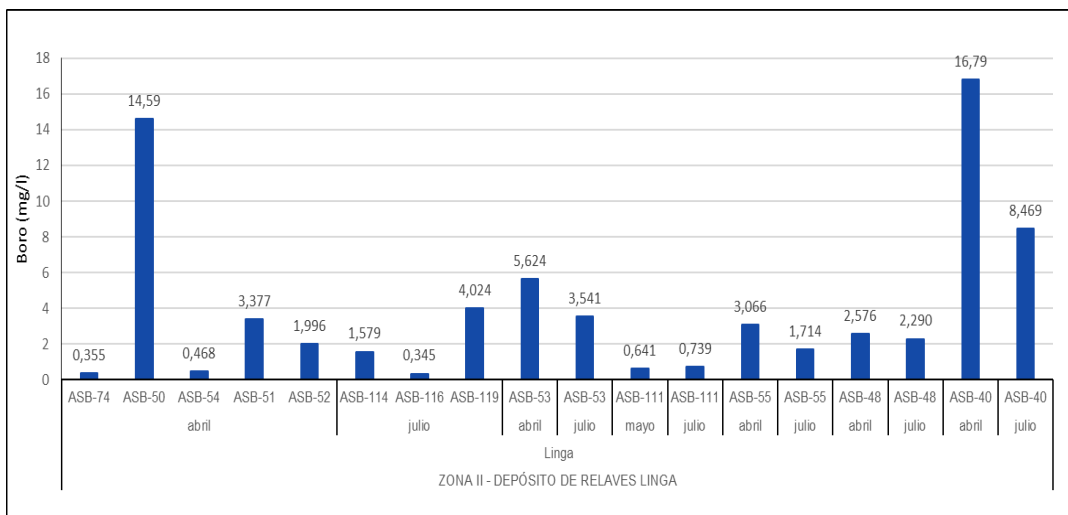


Figura 6-59. Boro en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

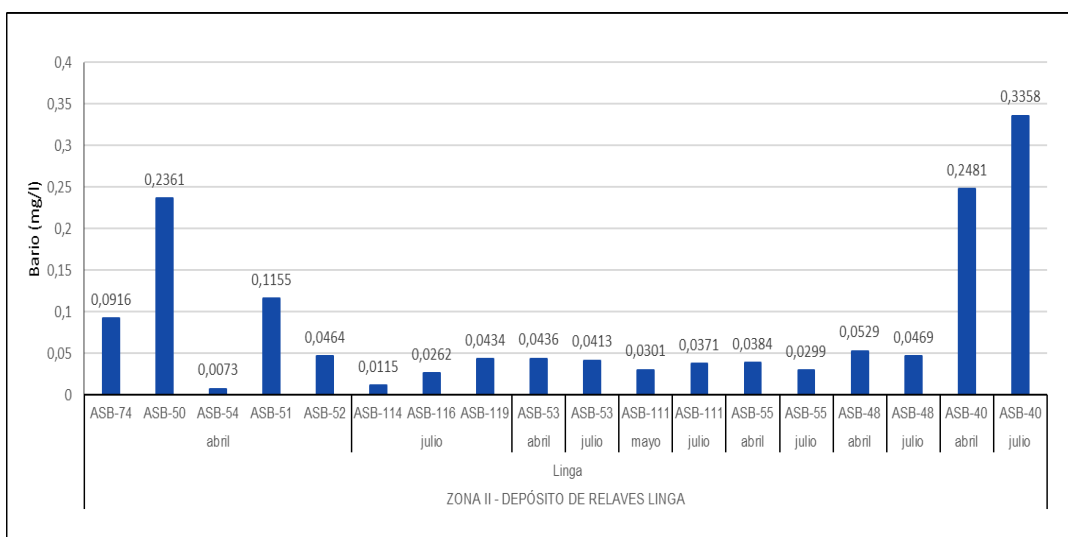


Figura 6-60. Bario en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

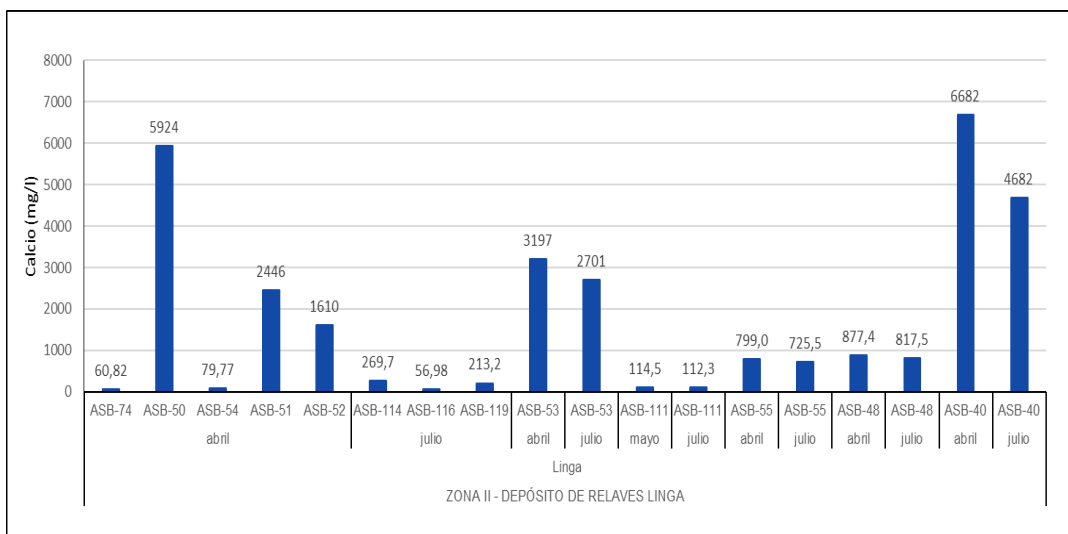


Figura 6-61. Calcio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

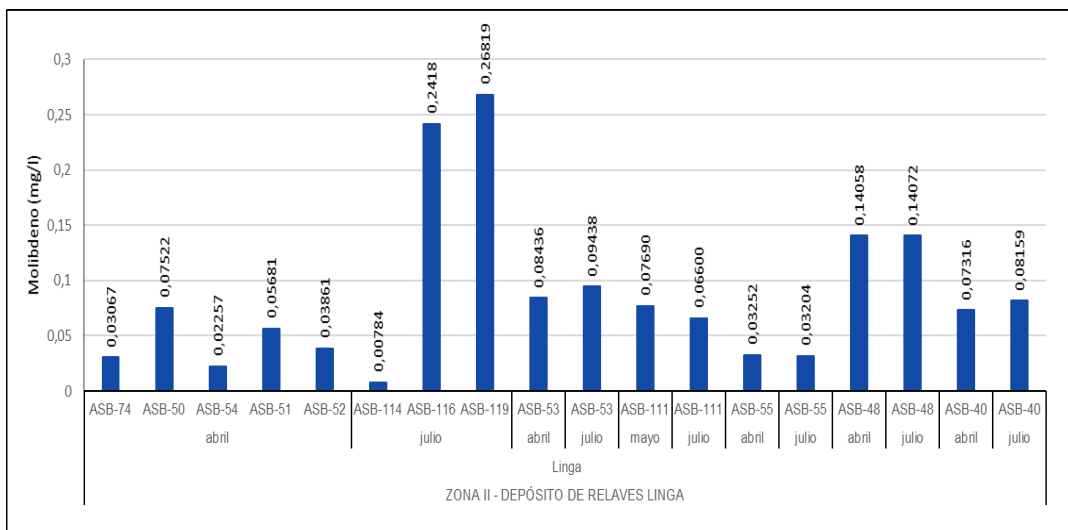


Figura 6-62. Molibdeno en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

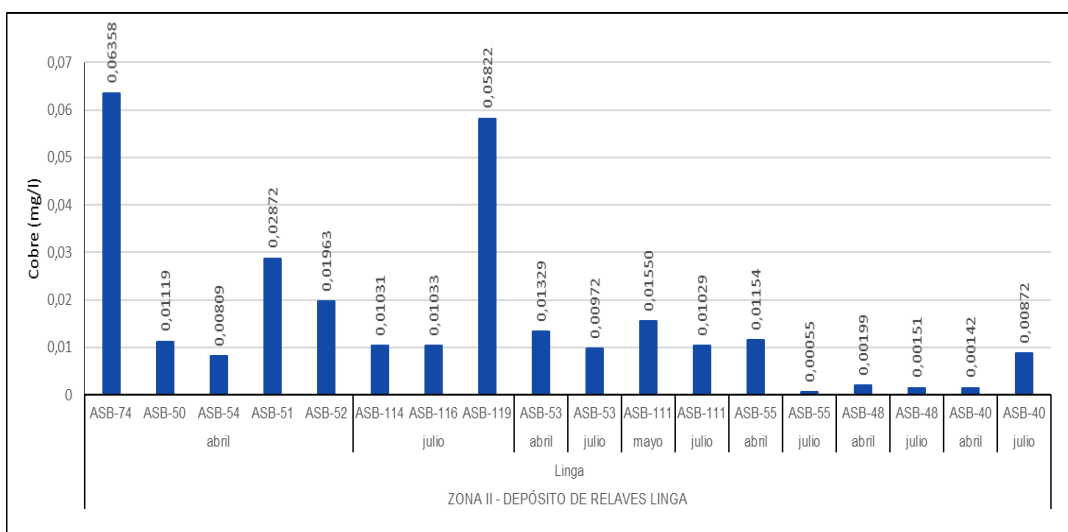


Figura 6-63. Cobre en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

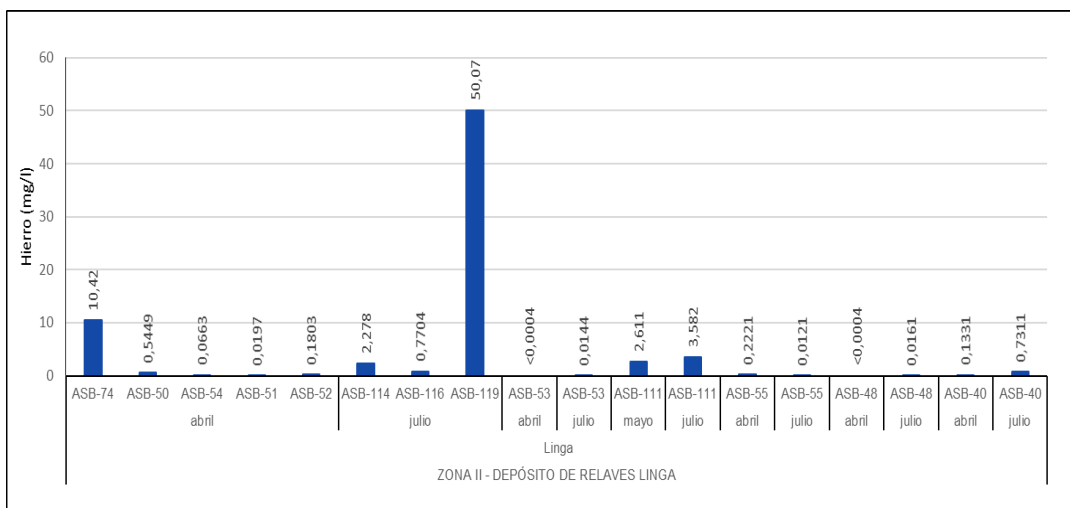


Figura 6-64. Hierro en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

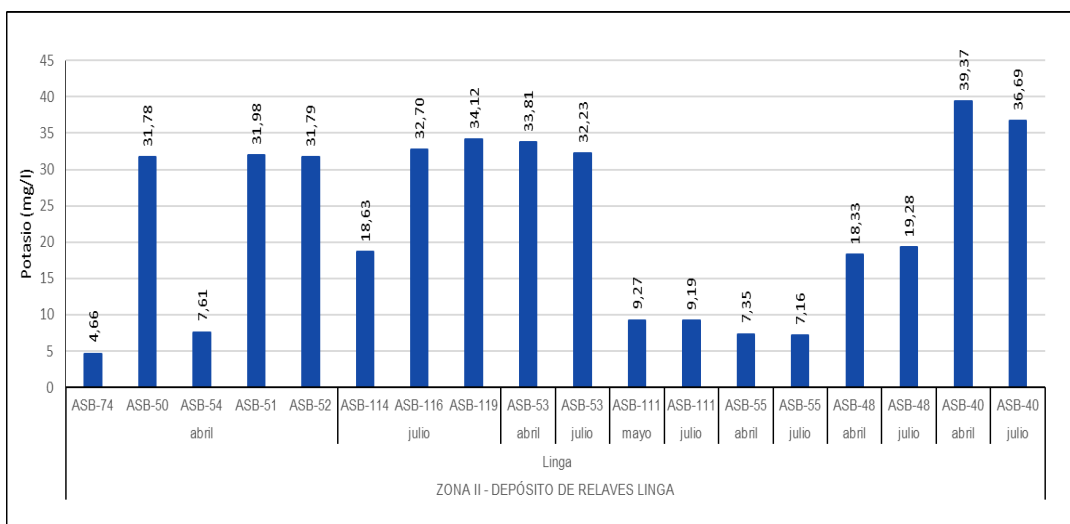


Figura 6-65. Potasio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

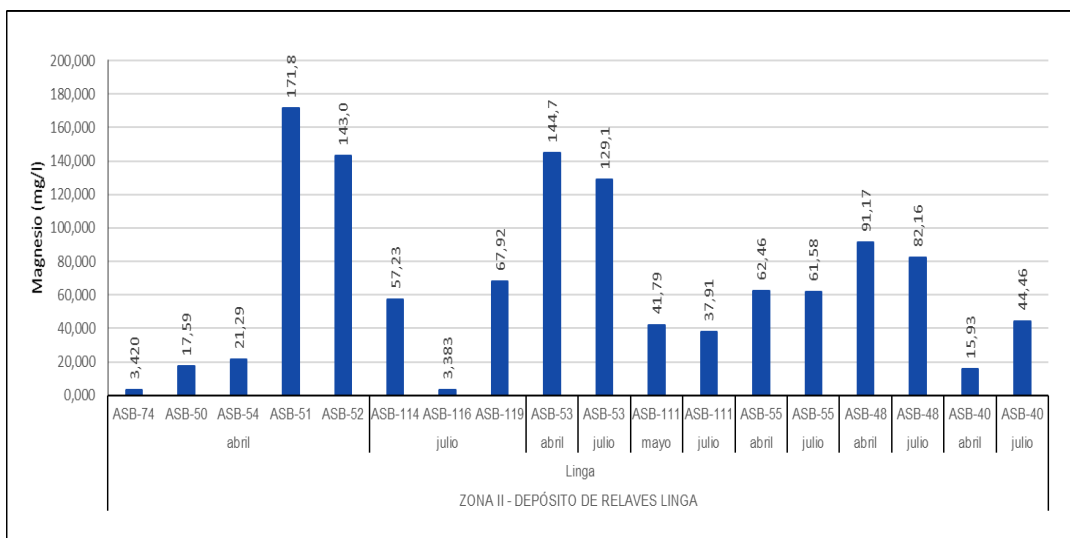


Figura 6-66. Magnesio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

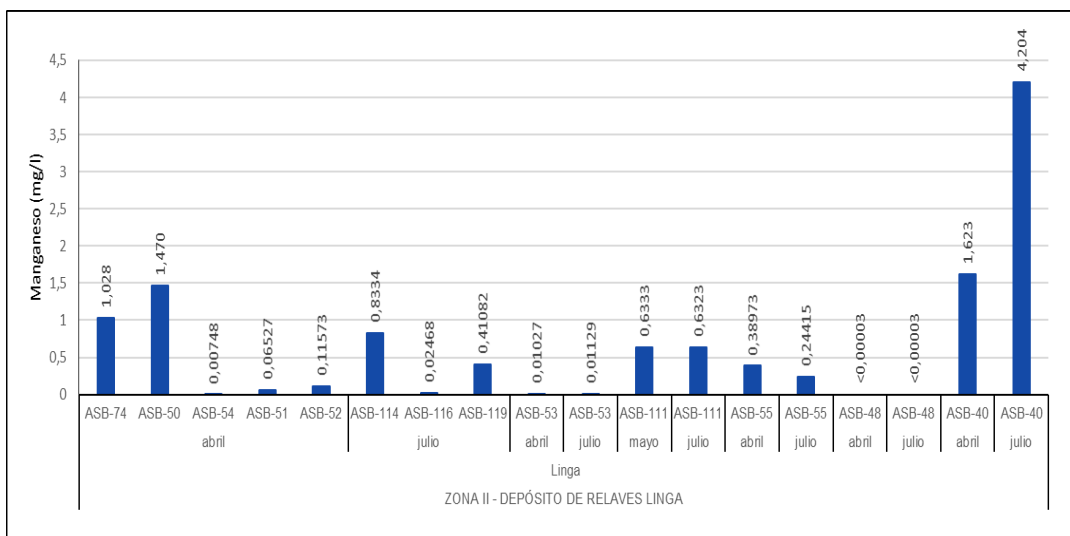


Figura 6-67. Manganeso en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

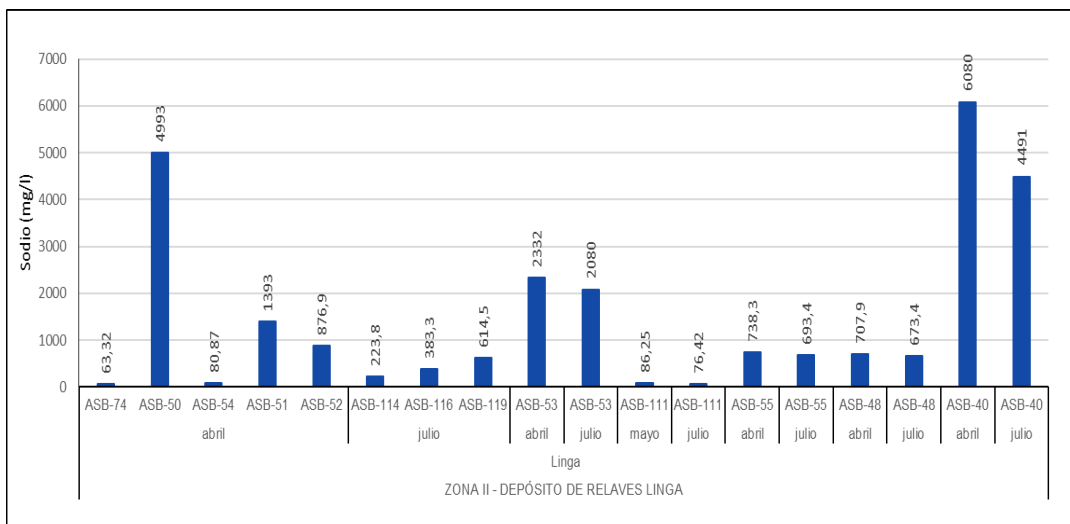


Figura 6-68. Sodio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

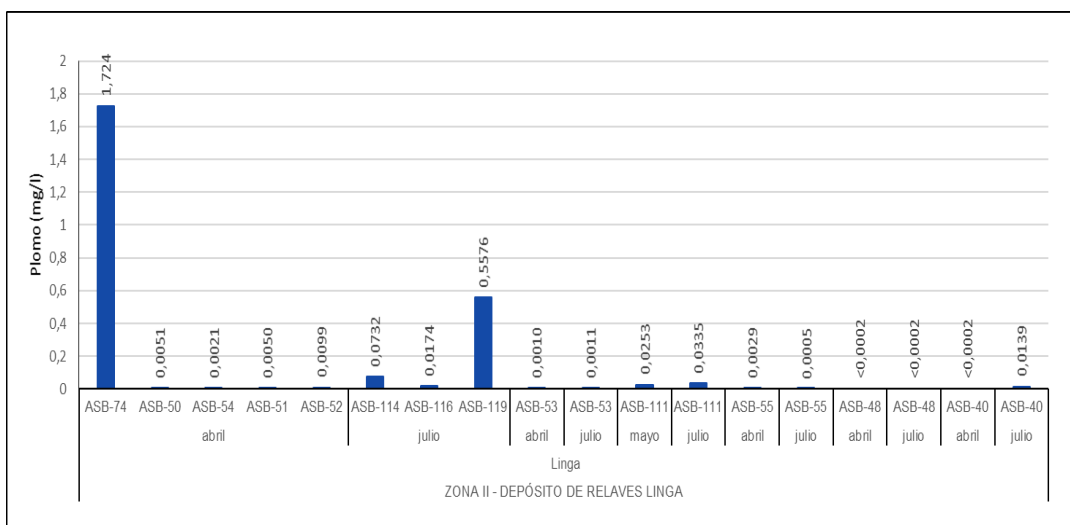


Figura 6-69. Plomo en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

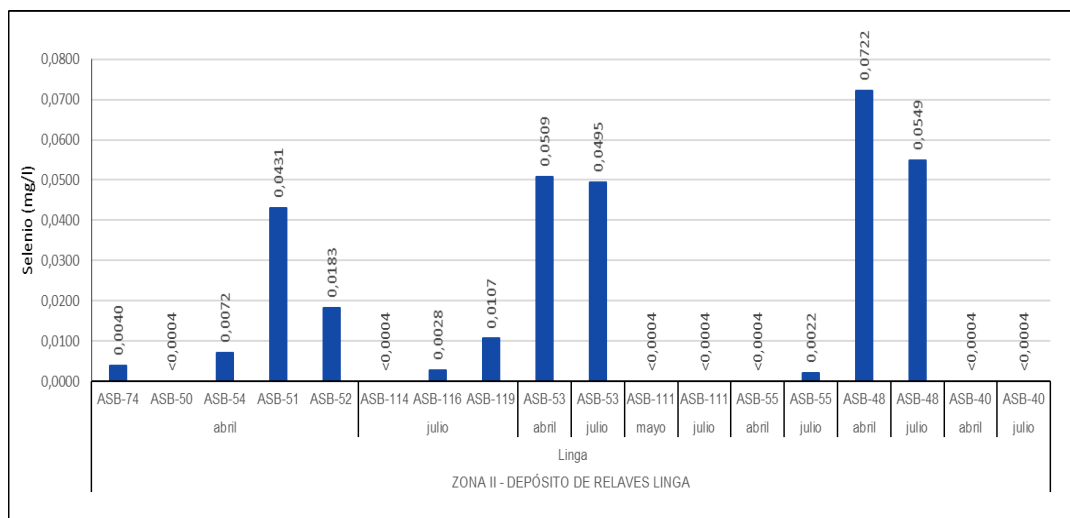


Figura 6-70. Selenio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

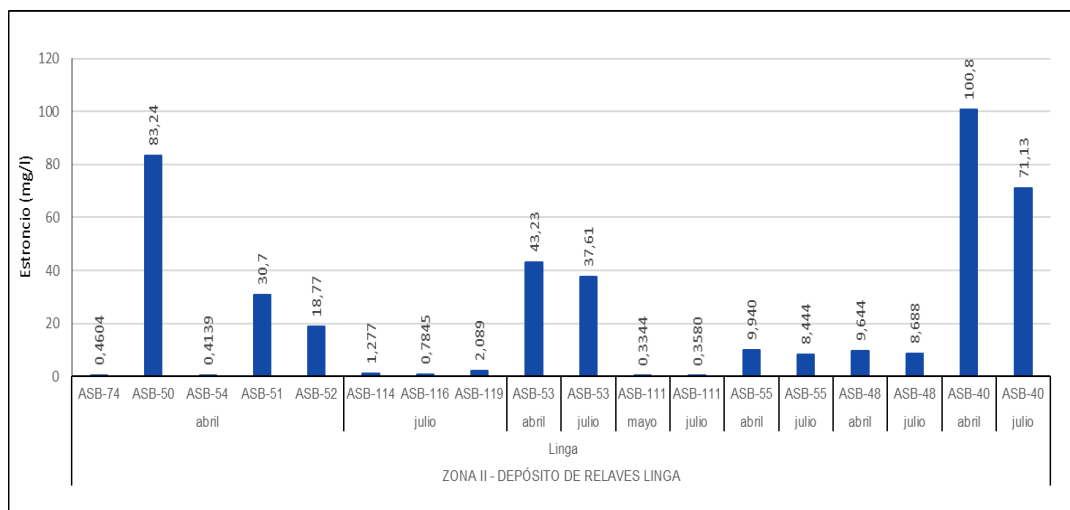


Figura 6-71. Estroncio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

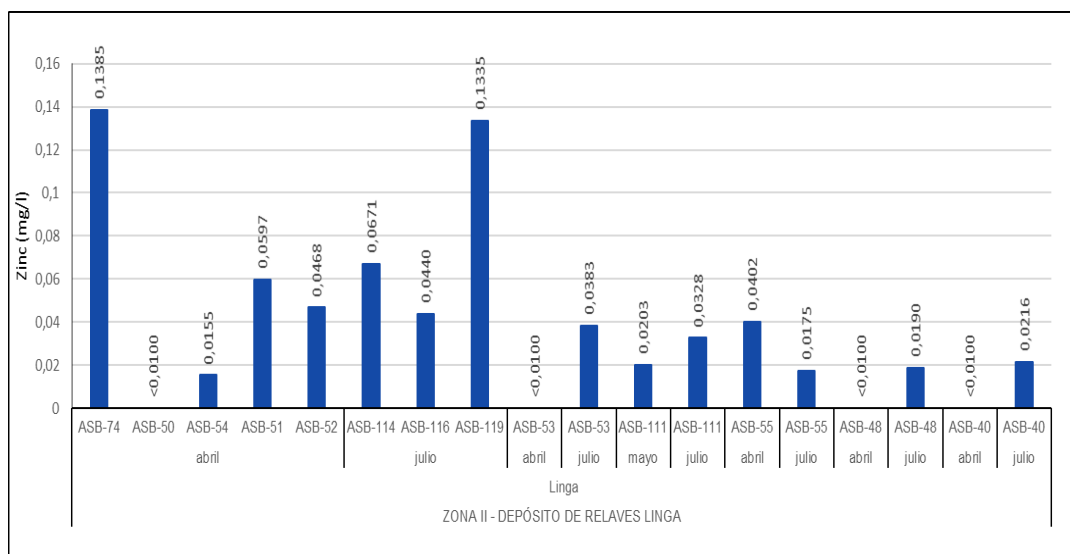


Figura 6-72. Zinc en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona II

**6.3.1.3 Zona III: PAD, presa Huayrondo, tajos y DDM**

Esta zona comprende la microcuenca Huayrondo donde se evaluó el agua subterránea en 17 piezómetros; abarcando los componentes Pad 4A, Pad 4B, Pad I, presa Huayrondo, Tajos Cerro Verde, Santa Rosa y Cerro negro; además, los DDM Noreste, Sureste y Cerro Negro.

En la Tabla 6-21 se presentan los valores máximos y mínimos obtenidos en los parámetros evaluados en las aguas subterráneas de los piezómetros de la zona III. Asimismo, en la Figura 6-73 se muestra en forma esquemática la ubicación de los piezómetros que presentaron agua subterránea con los valores máximos en los parámetros evaluados.

Tabla 6-21. Valores máximos y mínimos obtenidos en los piezómetros evaluados en la zona III

Parámetro	Unidad	Valor	Código	Abril-Mayo	Código	Julio
pH	unidad de pH	Mínimo	ASB-16	2,65	ASB-22	3,57
		Máximo	ASB-58	8,08	ASB-67	7,77
Conductividad eléctrica	µS/cm	Mínimo	ASB-67	1011	ASB-67	1066
		Máximo	ASB-16	30100	ASB-22	17980
Cloruros	mg/l	Mínimo	ASB-21	27,36	ASB-67	143,8
		Máximo	ASB-88	816,1	ASB-88	679,5
Sulfatos		Mínimo	ASB-21	72,25	ASB-67	180,4
		Máximo	ASB-16	75751	ASB-22	21049
Aluminio		Mínimo	ASB-68	0,037	ASB-17	0,031
		Máximo	ASB-16	5988	ASB-22	1019
Arsénico		Mínimo	ASB-60	0,00556	ASB-61	0,00703
		Máximo	ASB-16	4,59	ASB-22	0,03158
Boro		Mínimo	ASB-21	0,429	ASB-67	0,324
		Máximo	ASB-19	1,579	ASB-88	1,372
Bario		Mínimo	ASB-68	0,0081	ASB-60	0,0204
		Máximo	ASB-62	0,0392	ASB-88	0,0308
Calcio		Mínimo	ASB-21	50,17	ASB-67	73,77
		Máximo	ASB-19	544,4	ASB-60	503,2
Molibdeno		Mínimo	ASB-19	0,0042	ASB-22	0,00204
		Máximo	ASB-16	0,17671	ASB-17	0,1436
Cobre		Mínimo	ASB-68	0,00238	ASB-17	0,00596
		Máximo	ASB-16	1066	ASB-22	334,2
Hierro		Mínimo	ASB-68	0,0754	ASB-17	0,0647
		Máximo	ASB-16	4115	ASB-60	0,4701
Potasio		Mínimo	ASB-16	0,26	ASB-17	4,21
		Máximo	ASB-62	87,39	ASB-22	33,45
Magnesio		Mínimo	ASB-68	5,137	ASB-67	27,26
		Máximo	ASB-62	5610	ASB-22	3025
Manganeso		Mínimo	ASB-20	0,02688	ASB-17	0,02685
		Máximo	ASB-62	936,7	ASB-22	484,2
Sodio		Mínimo	ASB-16	30,82	ASB-67	83,76
		Máximo	ASB-88	529,1	ASB-88	471,8
Plomo		Mínimo	ASB-58	0,0014	ASB-61	0,0017
		Máximo	ASB-20	0,0422	ASB-88	0,044
Selenio		Mínimo	ASB-56	0,0232	ASB-60	0,0007
		Máximo	ASB-62	0,5735	ASB-22	0,2597
Estroncio		Mínimo	ASB-16	0,0195	ASB-67	0,6853
		Máximo	ASB-22	5,416	ASB-17	3,909
Zinc		Mínimo	ASB-68	0,0129	ASB-67	0,0249
		Máximo	ASB-16	157,8	ASB-22	48,75

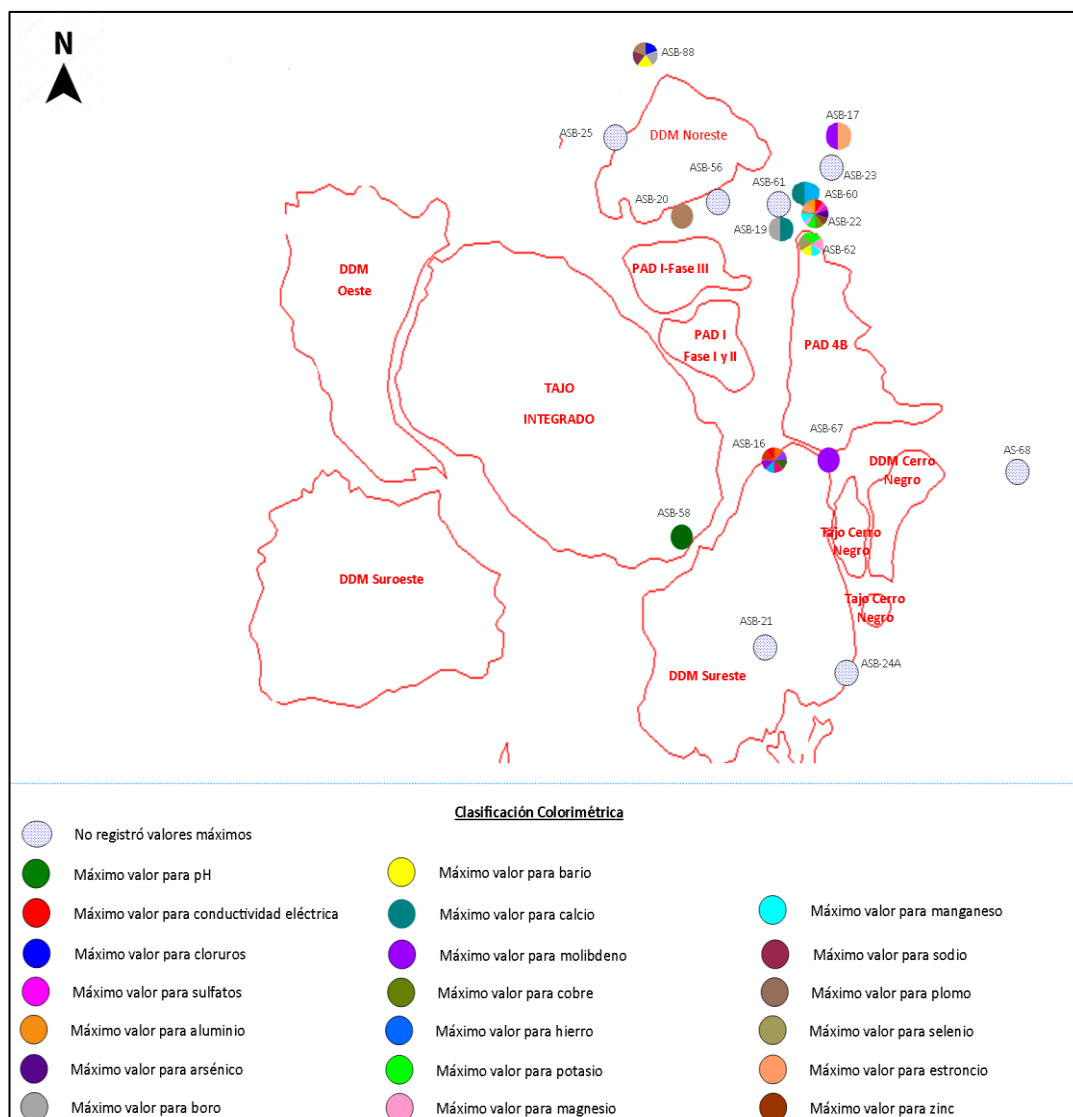


Figura 6-73. Piezómetros de la Zona III que registraron valores máximos en los parámetros evaluados en agua subterránea en los meses de abril, mayo y/o julio 2018

En esta zona el agua subterránea registró los máximos valores de pH en los puntos ASB-58 (aproximadamente a 400 m al norte del dique del DDM sureste) y ASB-67 (aproximadamente a 70 m al sur del Pad de lixiviación); conductividad eléctrica, sulfatos, aluminio, arsénico, molibdeno, cobre, hierro y zinc en el punto ASB-16 (aproximadamente a 50 m de las pozas PLS del Pad de lixiviación 4A).

Los máximos valores de cloruros, sodio y plomo fueron registrados en el agua subterránea del punto ASB-88 (aproximadamente a 600 m este del depósito de relaves Enlozada); y boro y calcio en el agua subterránea del punto ASB-19 (aproximadamente a 800 m al noreste del Pad de lixiviación 1X).

Se reportaron los máximos valores de bario, potasio, magnesio, manganeso, selenio en el agua subterránea del punto ASB-62 (aproximadamente a 100 m al pie de las pozas PLS del Pad de lixiviación 4B), estroncio en el agua subterránea del punto ASB-22 (a 80 m aguas arriba de la presa Huayrondo); y hierro en el agua subterránea del punto ASB-60 (a 180 m de la presa Huayrondo).

Los valores de cadmio, cromo, mercurio y plata estuvieron por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio en el agua subterránea de todos los

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

piezómetros evaluados en la zona III. A continuación, se presentan gráficas de los resultados obtenidos en el agua subterránea de los piezómetros evaluados (Figuras 6-74 a 6-93).

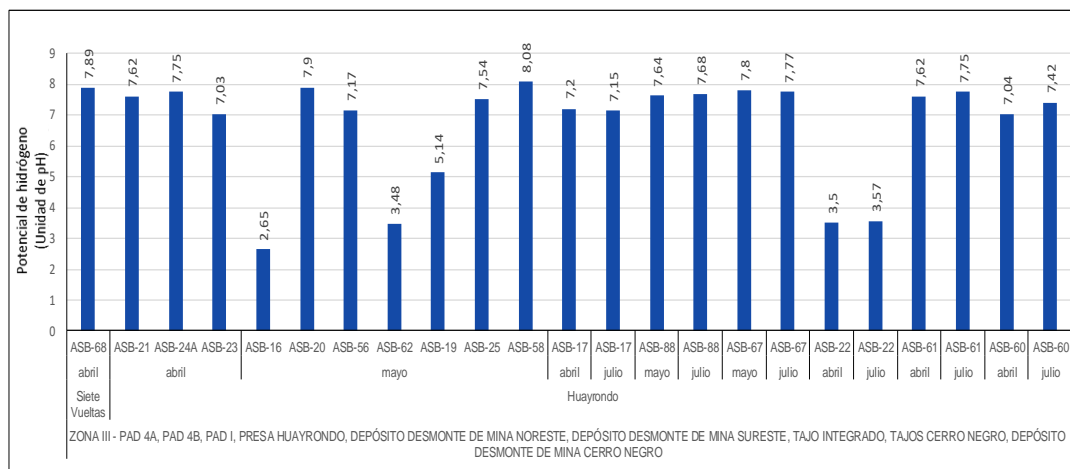


Figura 6-74. Potencial de hidrógeno en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III

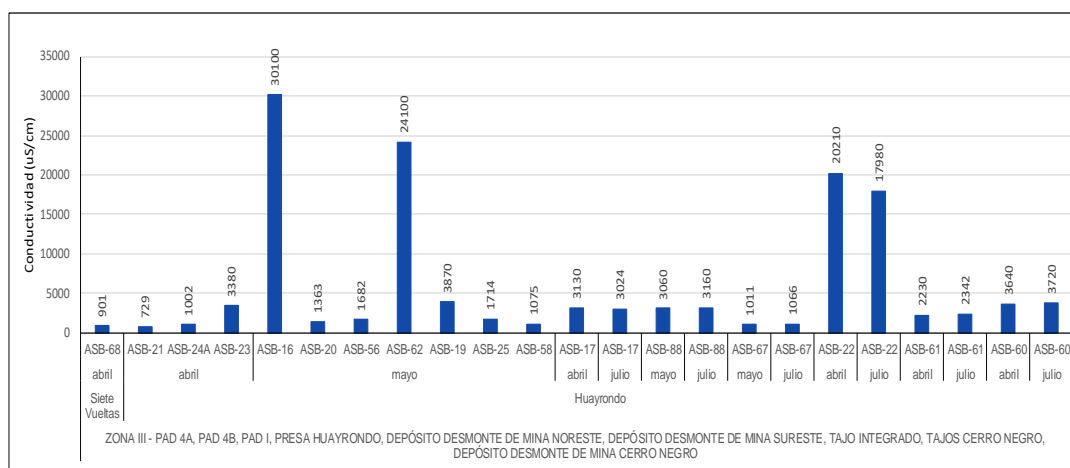


Figura 6-75. Conductividad eléctrica en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III

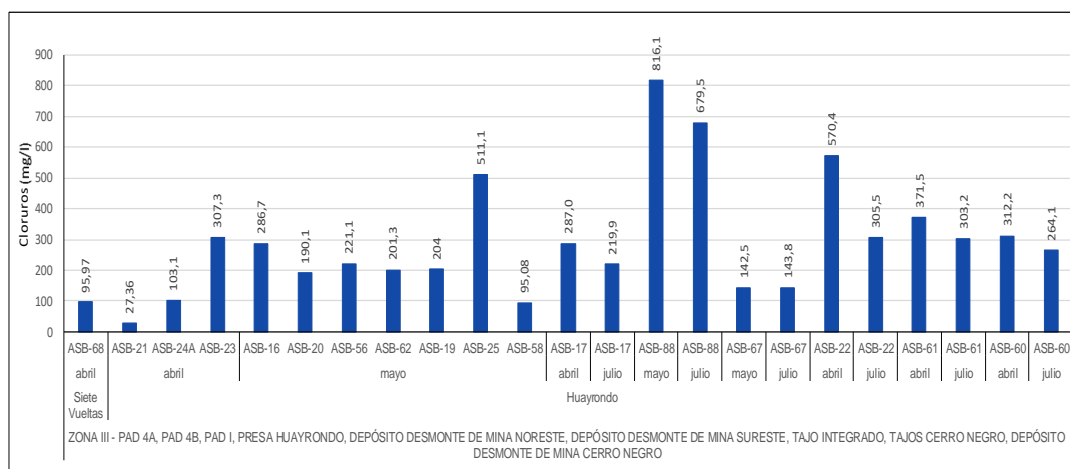


Figura 6-76. Cloruros en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

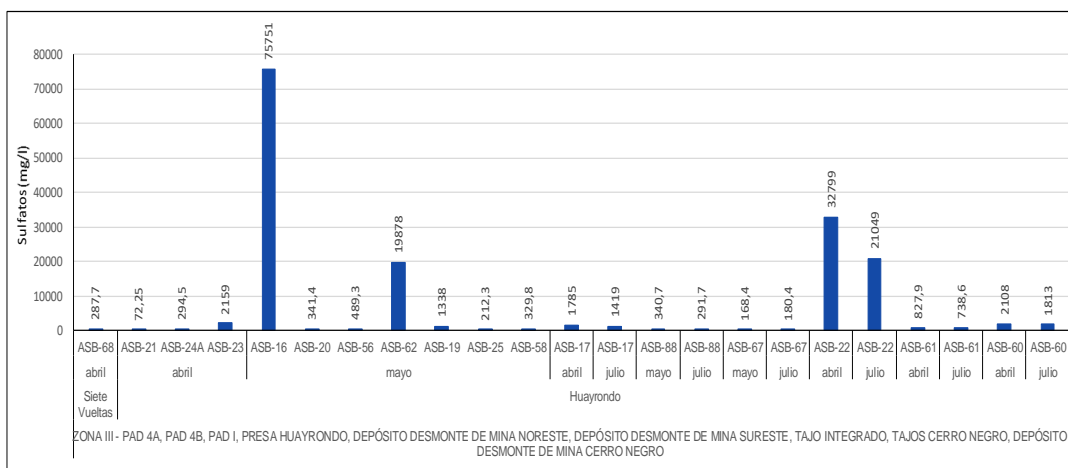


Figura 6-77. Sulfatos en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III

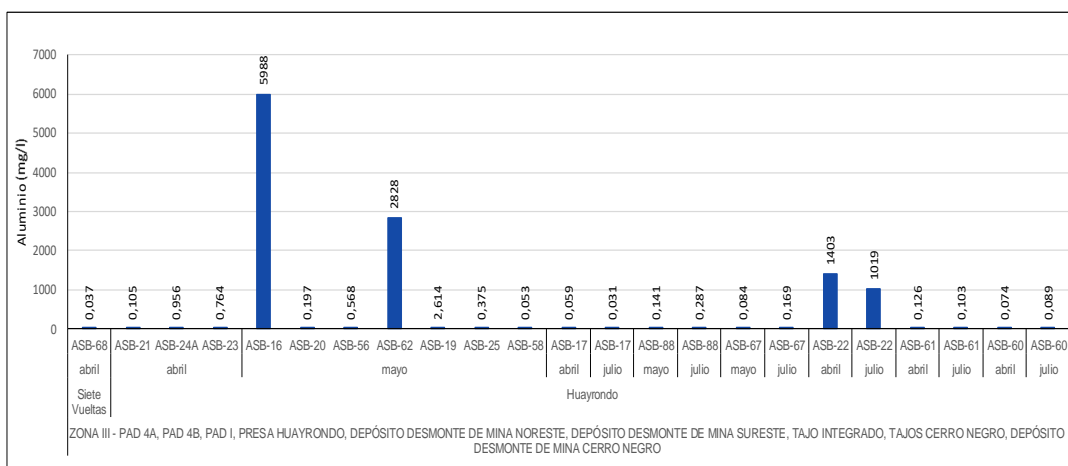


Figura 6-78. Aluminio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III

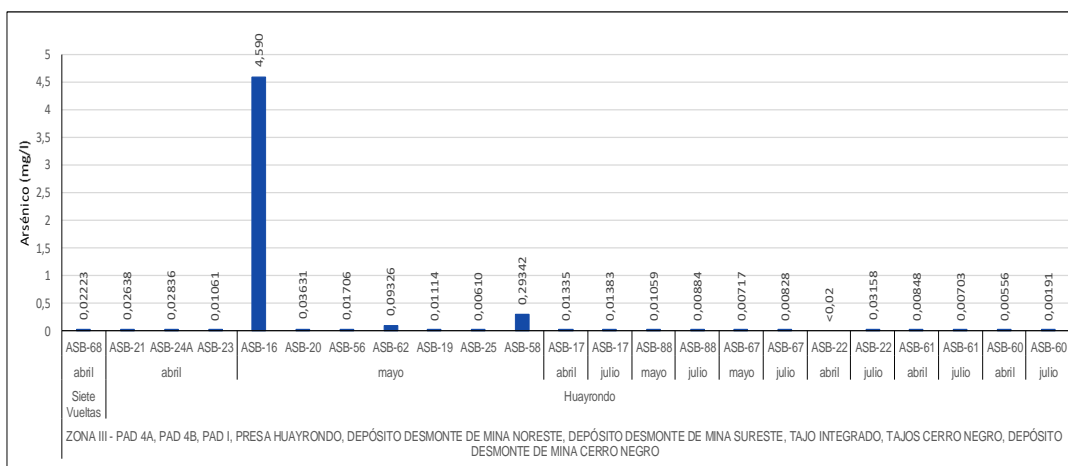


Figura 6-79. Arsénico en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

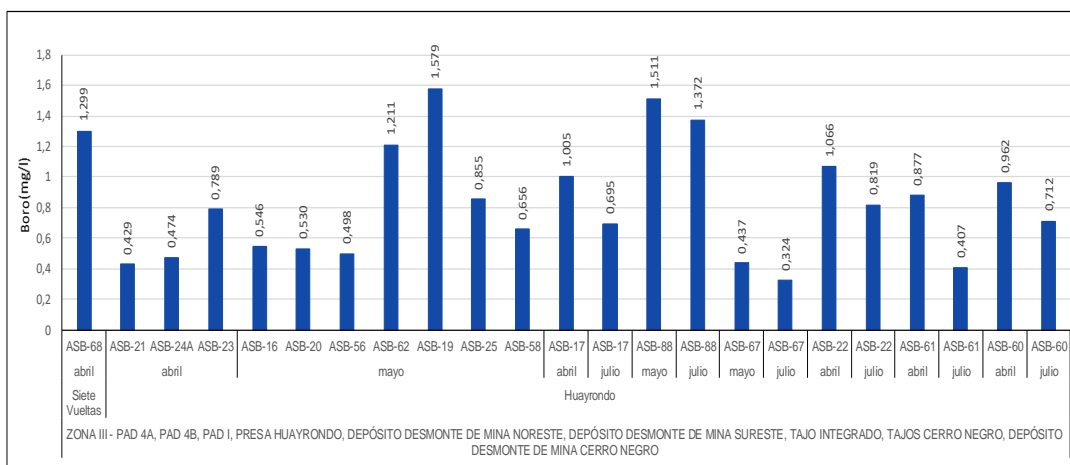


Figura 6-80. Boro en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III

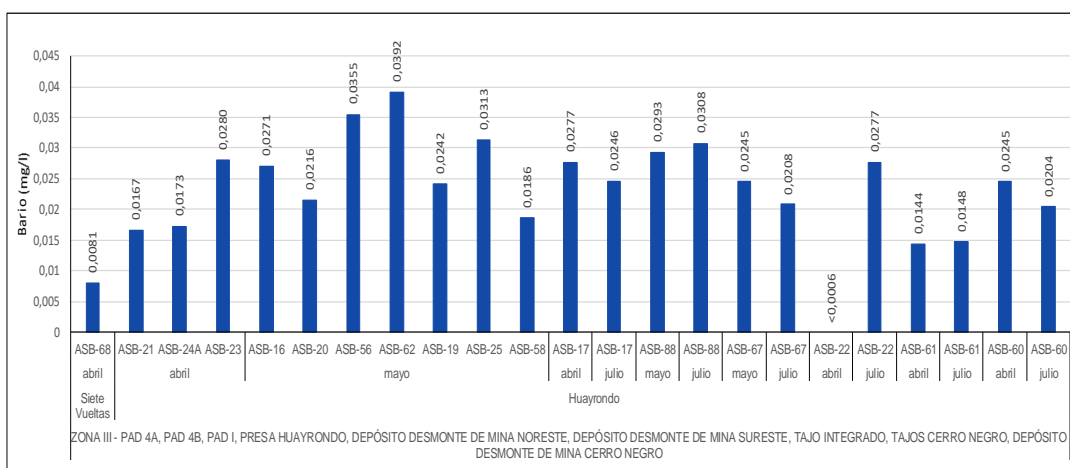


Figura 6-81. Bario en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III

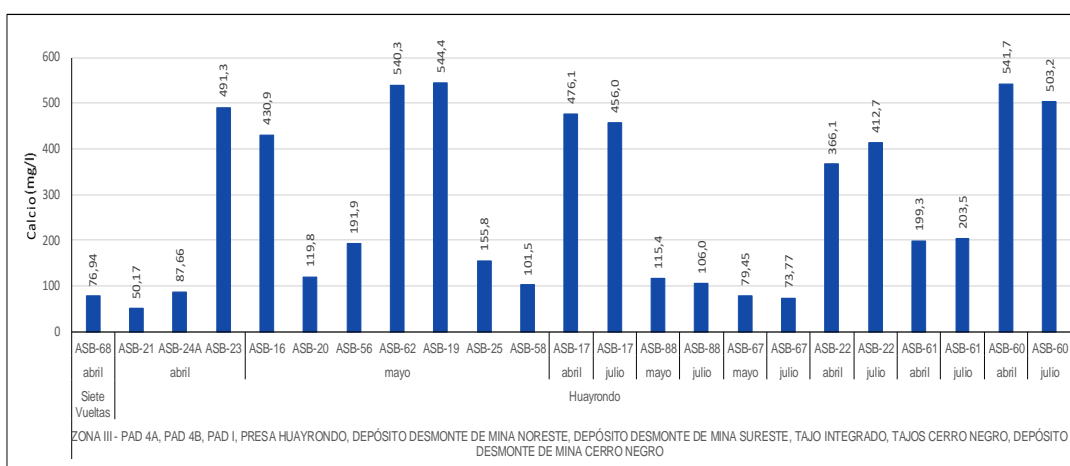


Figura 6-82. Calcio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

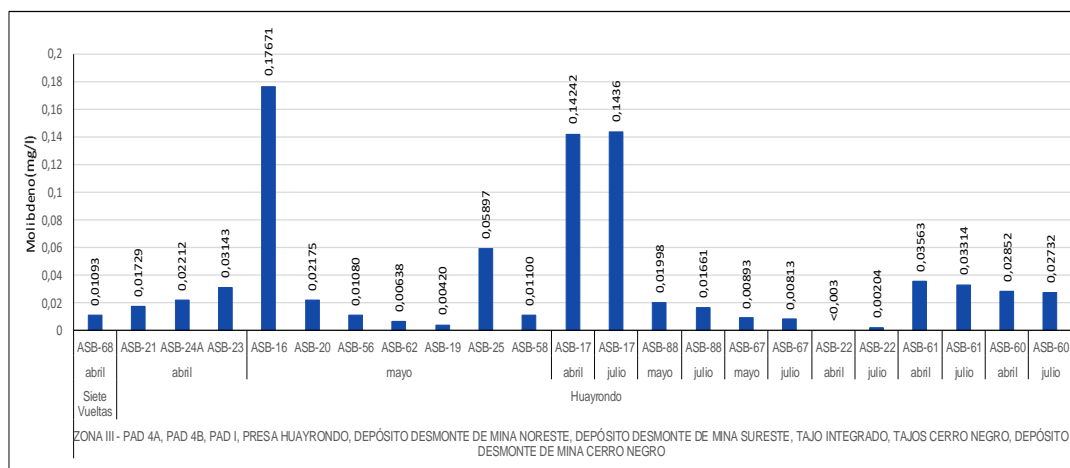


Figura 6-83. Molibdeno en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III

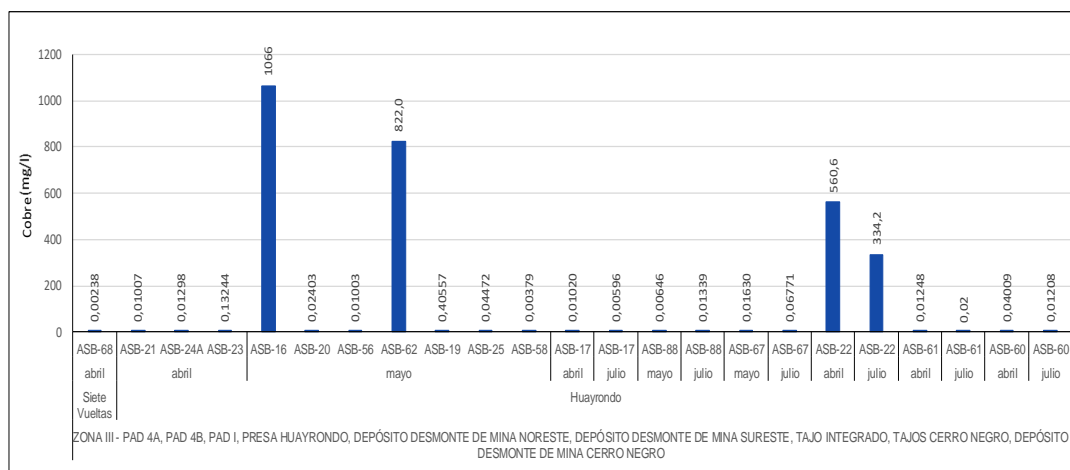


Figura 6-84. Cobre en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III

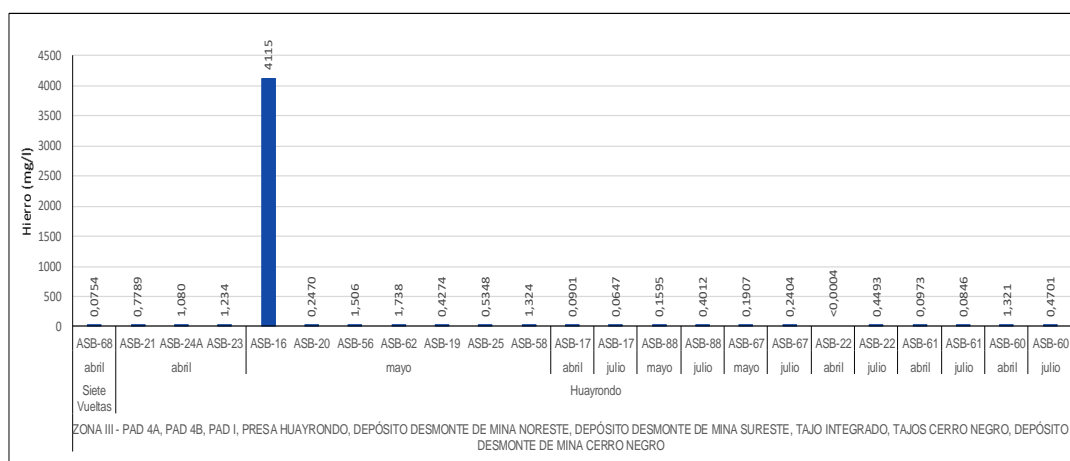


Figura 6-85. Hierro en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

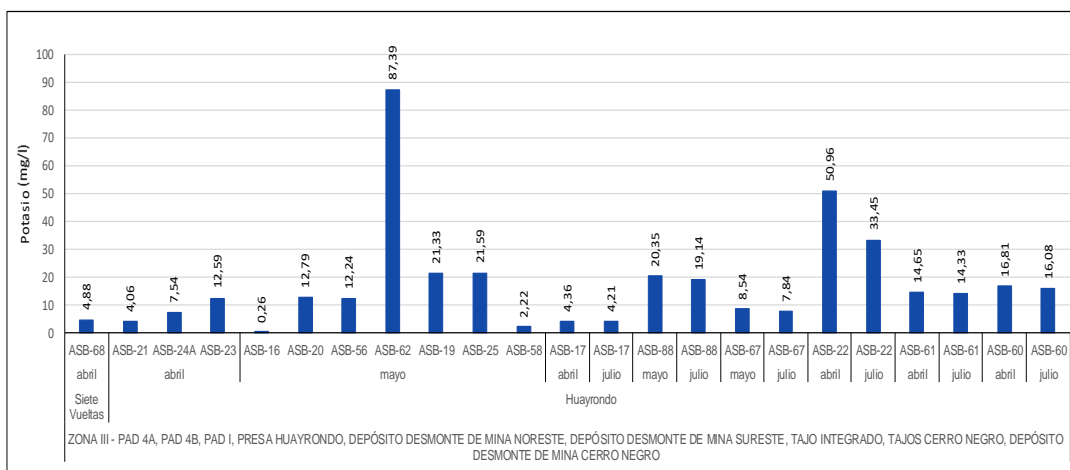


Figura 6-86. Potasio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III

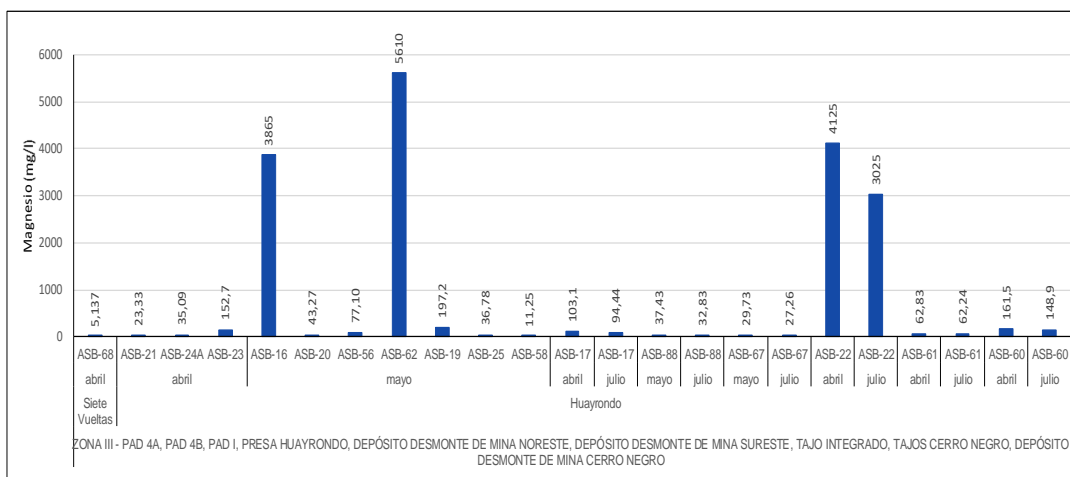


Figura 6-87. Magnesio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III

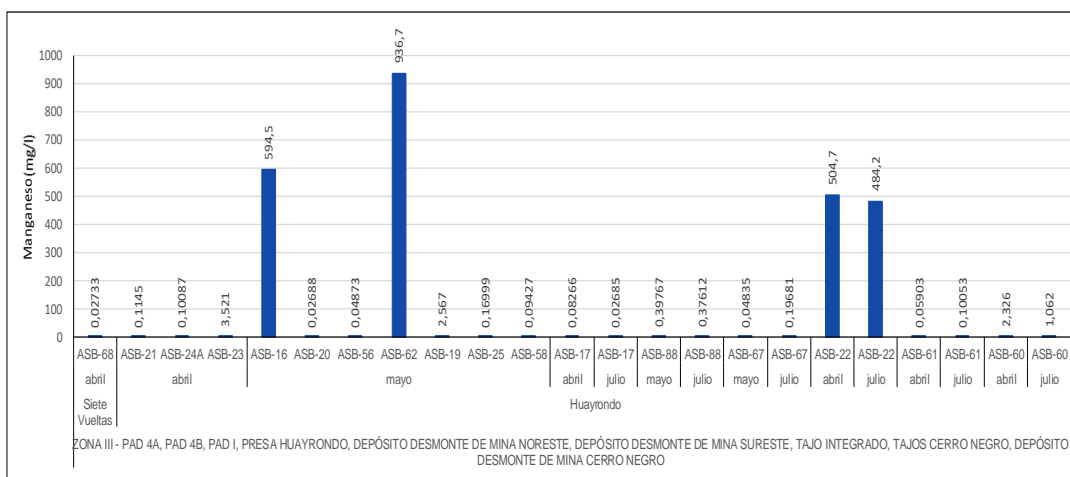


Figura 6-88. Manganeso en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

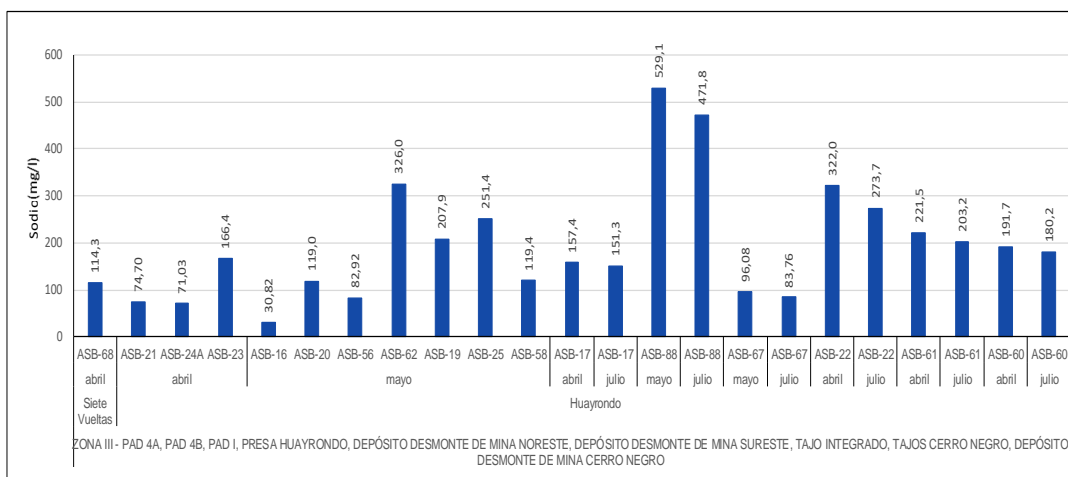


Figura 6-89. Sodio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III

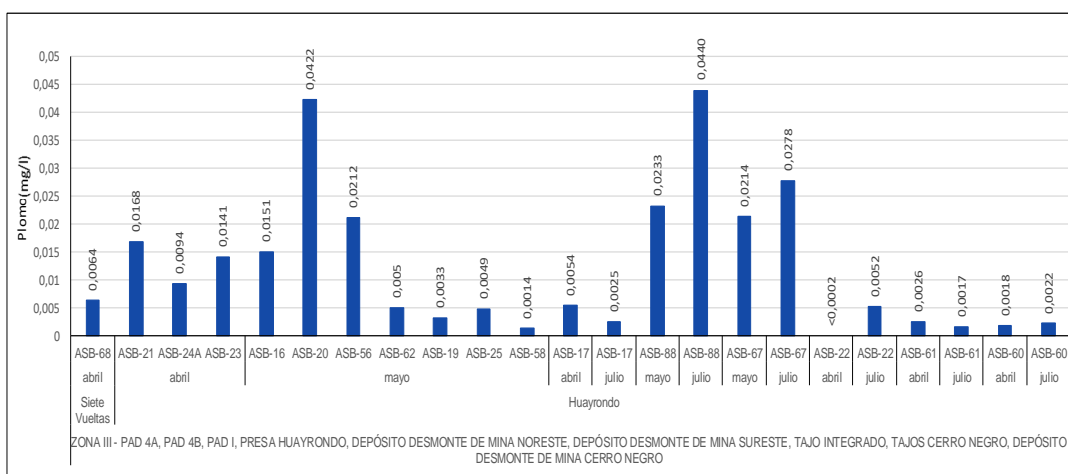


Figura 6-90. Plomo en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III

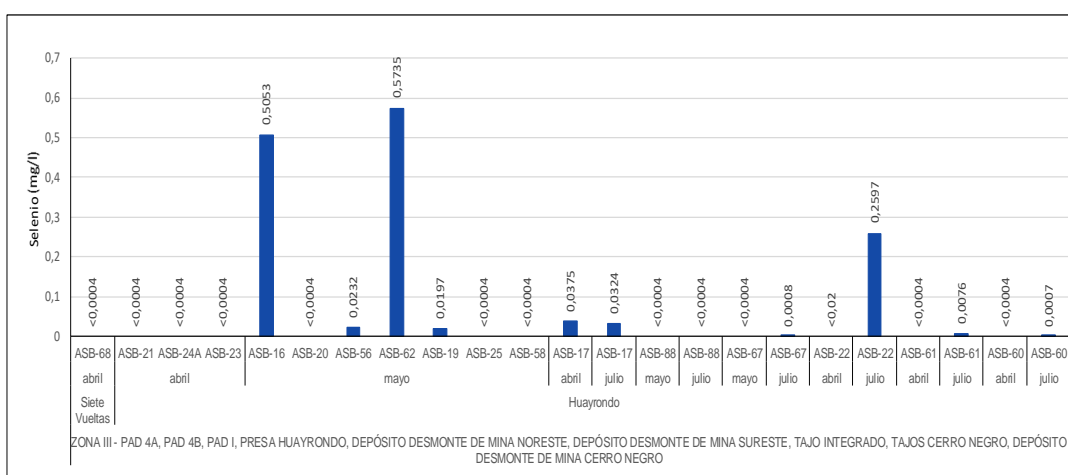


Figura 6-91. Selenio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

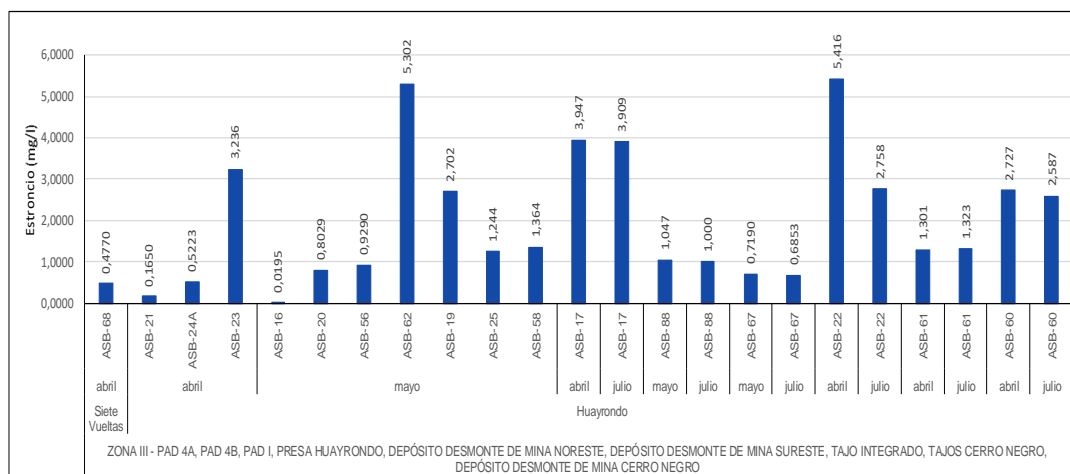


Figura 6-92. Estroncio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III

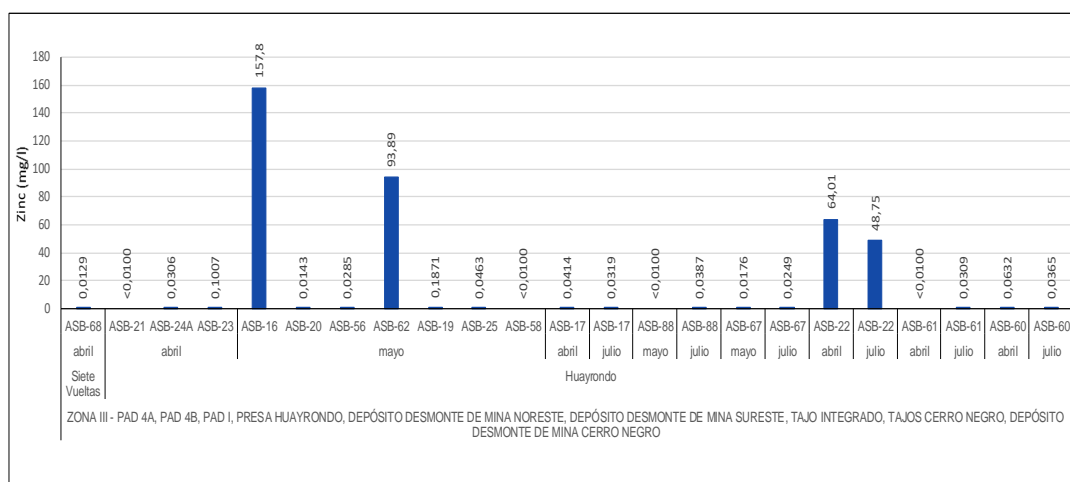


Figura 6-93. Zinc en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona III

6.3.1.4 Zona IV: DDM Oeste y DDM Suroeste

Esta zona comprende las microcuencas Tinajones, San José, Cerro Verde y donde se evaluó el agua subterránea mediante 5 piezómetros.

En la Tabla 6-22 se presenta los valores máximos y mínimos obtenidos en los parámetros evaluados en las aguas subterráneas de los piezómetros de la zona IV. Asimismo, en la Figura 6-94 se muestra en forma esquemática la ubicación de los piezómetros que presentaron los valores máximos.

Tabla 6-22. Valores máximos y mínimos obtenidos en los piezómetros evaluados en la zona IV

Parámetro	Unidad	Valor	Código	Abril-Mayo
pH	unidad de pH	Mínimo	ASB-71	6,84
		Máximo	ASB-63	9,67
Conductividad eléctrica	uS/cm	Mínimo	ASB-63	1545
		Máximo	ASB-64	2790
Cloruros	mg/L	Mínimo	ASB-63	137,2
		Máximo	ASB-75	329,7
Sulfatos		Mínimo	ASB-63	615,8
		Máximo	ASB-71	1171
Aluminio		Mínimo	ASB-75	0,127
		Máximo	ASB-63	0,641



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Parámetro	Unidad	Valor	Código	Abril-Mayo
Arsénico		Mínimo	ASB-64	0,00873
		Máximo	ASB-43	0,04499
Boro		Mínimo	ASB-63	0,433
		Máximo	ASB-71	5,766
Bario		Mínimo	ASB-75	0,0109
		Máximo	ASB-63	0,0469
Calcio		Mínimo	ASB-63	172,3
		Máximo	ASB-75	315,2
Molibdeno		Mínimo	ASB-63	0,00410
		Máximo	ASB-43	0,11822
Cobre		Mínimo	ASB-43	0,00285
		Máximo	ASB-71	0,04169
Hierro		Mínimo	ASB-75	0,4008
		Máximo	ASB-63	4,289
Potasio		Mínimo	ASB-75	4,56
		Máximo	ASB-64	21,32
Magnesio		Mínimo	ASB-63	1,384
		Máximo	ASB-64	79,52
Manganeso		Mínimo	ASB-63	0,05061
		Máximo	ASB-64	0,6265
Sodio		Mínimo	ASB-63	170,4
		Máximo	ASB-71	293
Plomo		Mínimo	ASB-43	0,0012
		Máximo	ASB-71	0,2002
Selenio		Mínimo	-	-
		Máximo	ASB-43	0,0192
Estroncio		Mínimo	ASB-63	0,8389
		Máximo	ASB-71	1,749
Zinc	Mínimo	ASB-63	0,0288	
	Máximo	ASB-64	0,0616	

(-) Valor por debajo del límite de detección en los puntos evaluados en ese mes

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

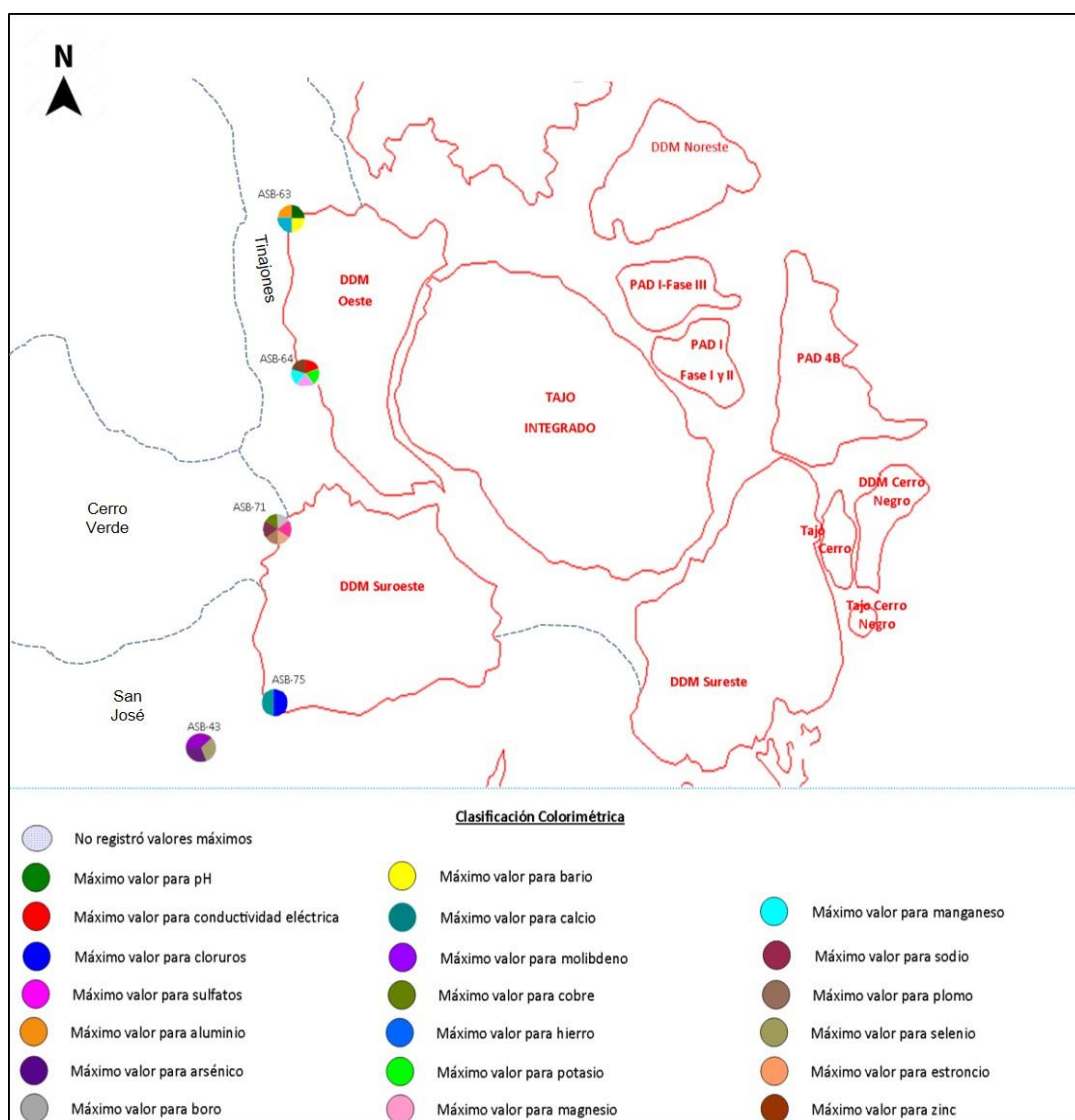


Figura 6-94. Piezómetros de la zona IV que registraron valores máximos en los parámetros evaluados en agua subterránea en los meses de abril y/o mayo 2018

En esta zona, se registraron los máximos valores de pH, aluminio, bario, hierro en el agua subterránea del punto ASB-63 (a 30 m al sureste de la poza M2 DM Oeste); conductividad eléctrica, potasio, magnesio, manganeso y zinc en el agua subterránea del punto ASB-64 (al oeste del DDM Oeste).

Se reportaron los máximos valores de cloruros, calcio en el punto ASB-75; sulfatos, boro, cobre, sodio, plomo y estroncio en el punto ASB-71 (al oeste del DDM Oeste); y arsénico, molibdeno, selenio en el punto ASB-43 (al noreste del depósito de relaves Linga).

Los valores de cadmio, cromo, mercurio y plata estuvieron por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio en el agua subterránea de todos los piezómetros evaluados en esta zona. A continuación, se presentan gráficas de los resultados obtenidos en los piezómetros de esta zona (Figuras 6-95 a 6-114).

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

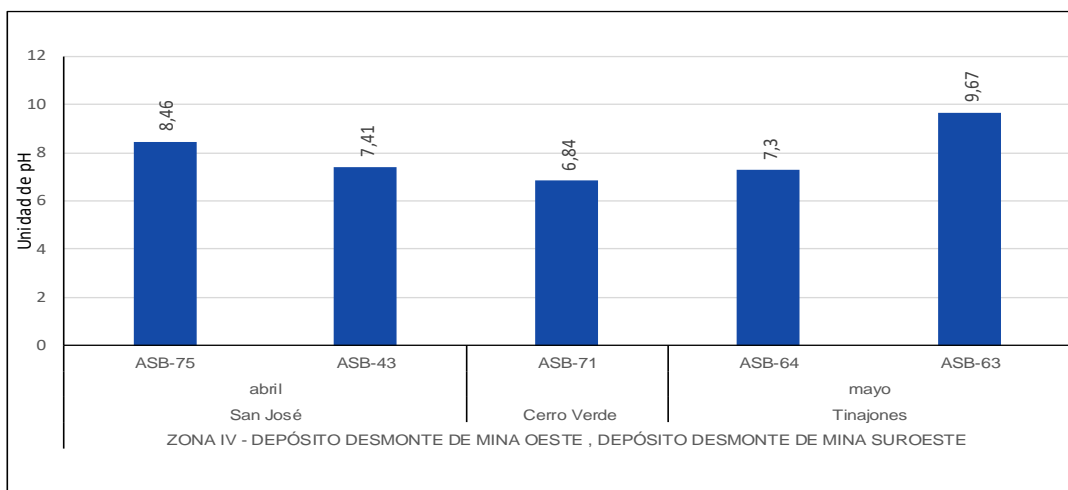


Figura 6-95. Potencial de hidrógeno en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

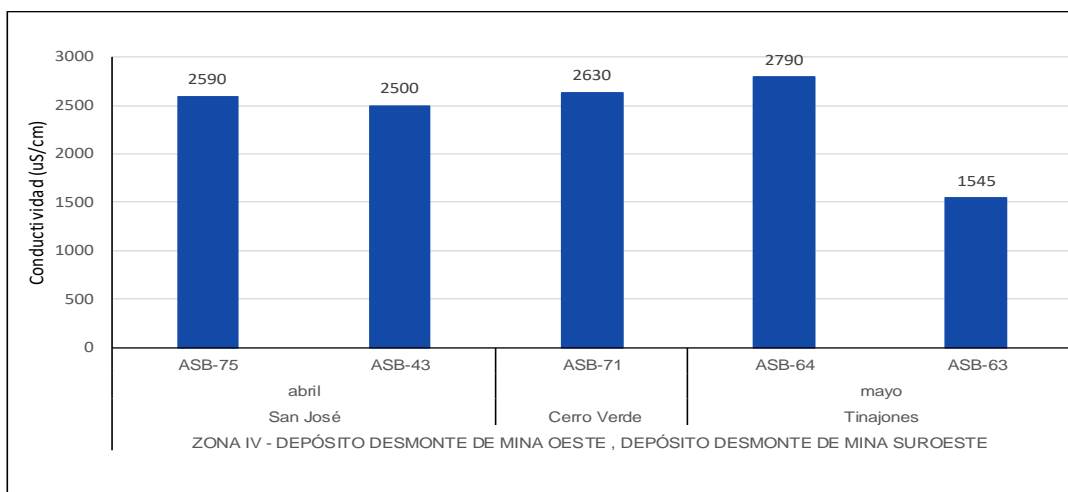


Figura 6-96. Conductividad eléctrica en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

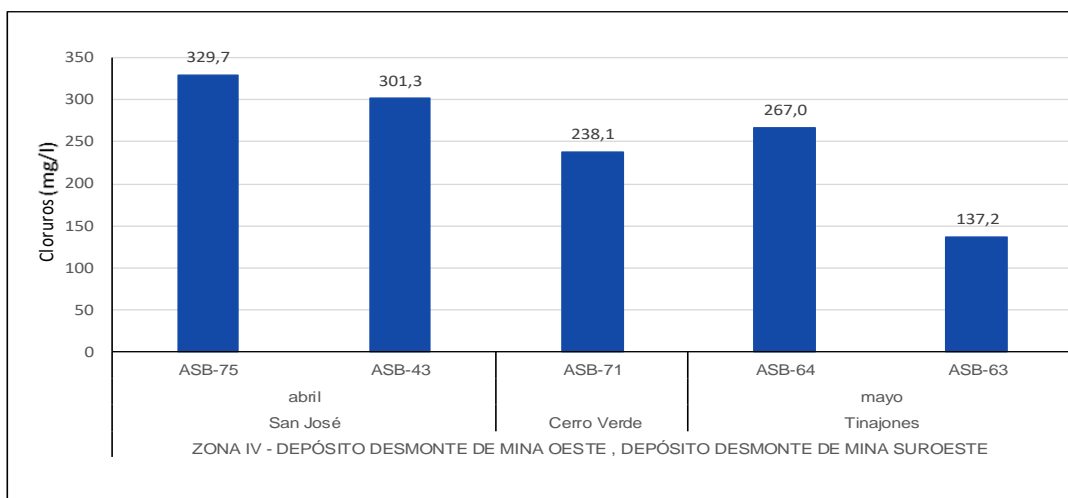


Figura 6-97. Cloruros en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

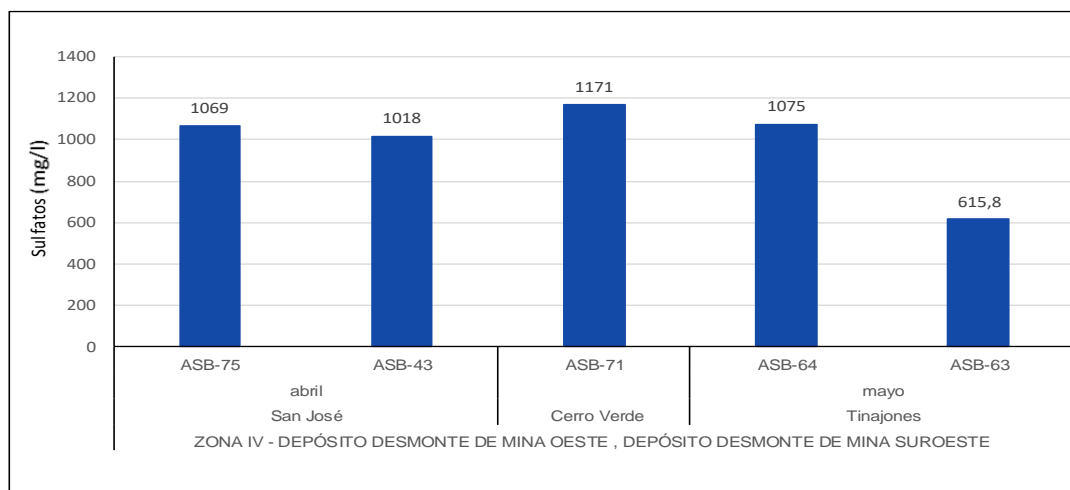


Figura 6-98. Sulfatos en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

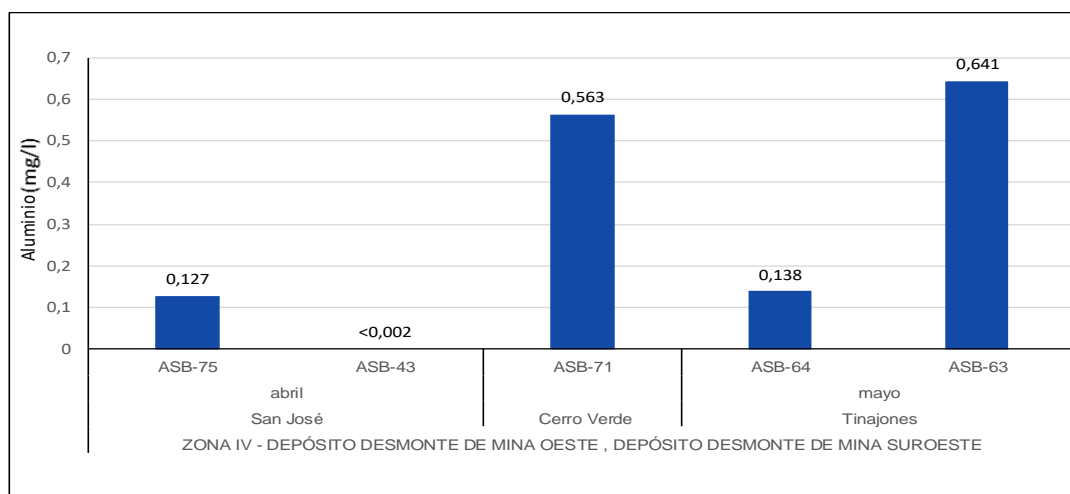


Figura 6-99. Aluminio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

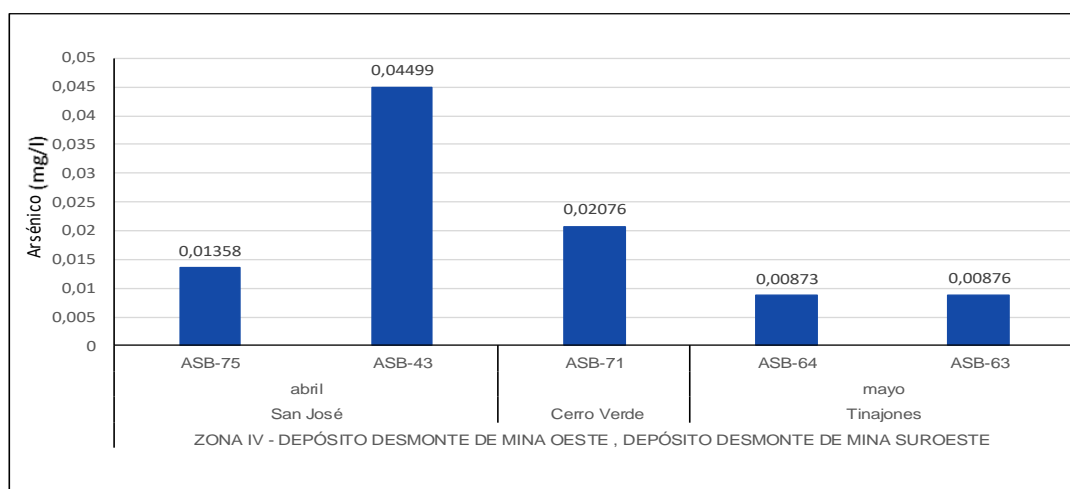


Figura 6-100. Arsénico en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

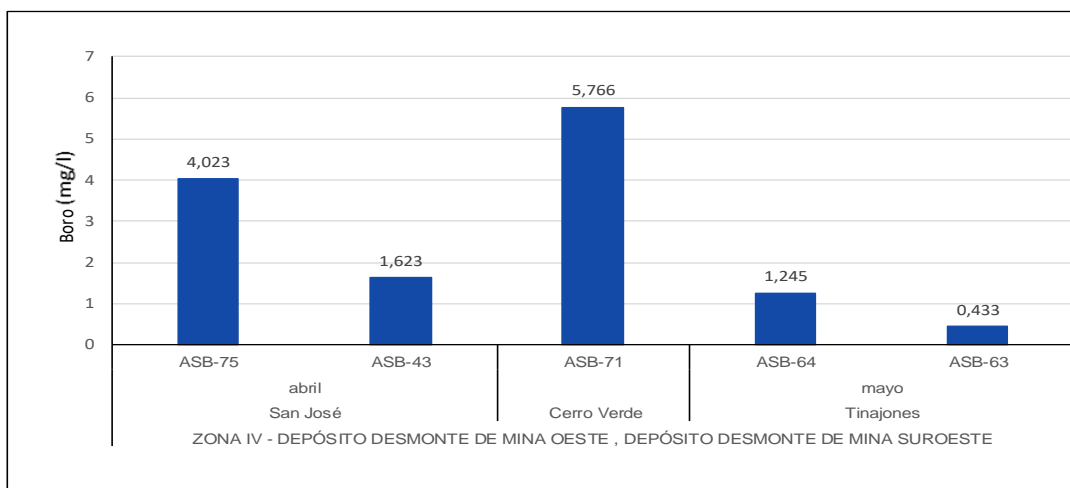


Figura 6-101. Boro en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

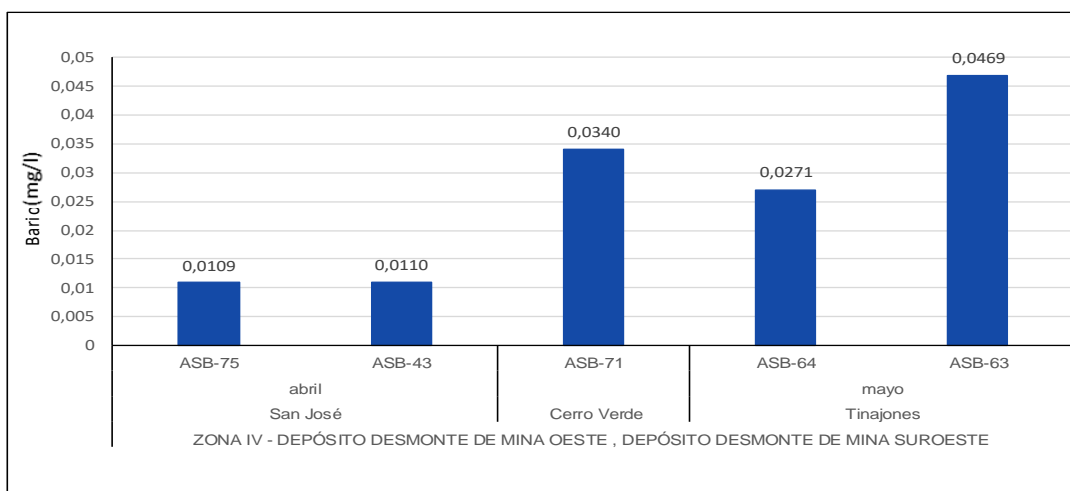


Figura 6-102. Bario en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

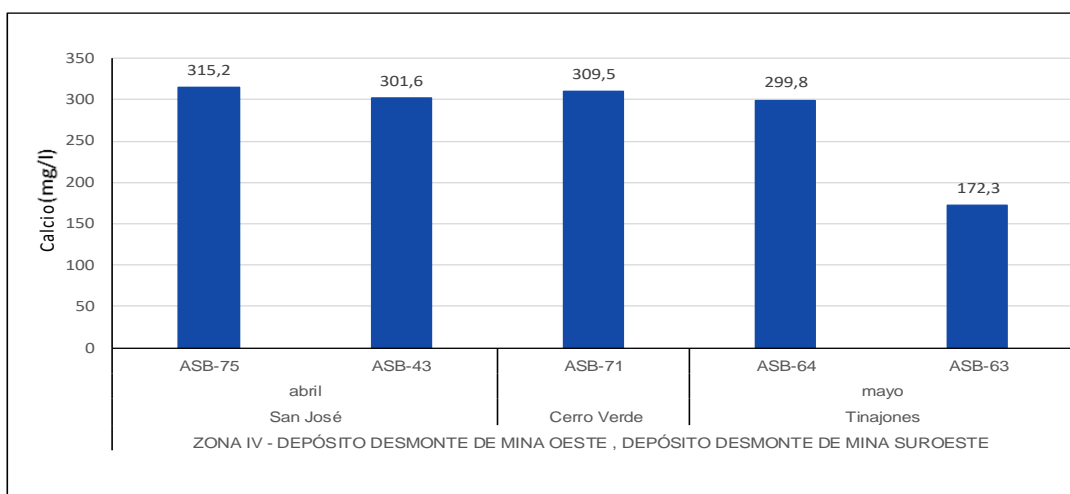


Figura 6-103. Calcio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

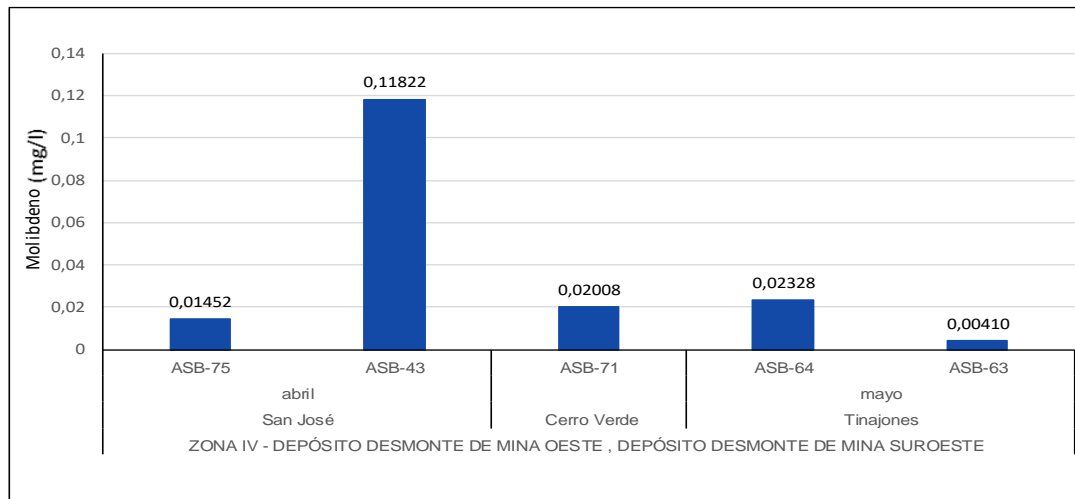


Figura 6-104. Molibdeno en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

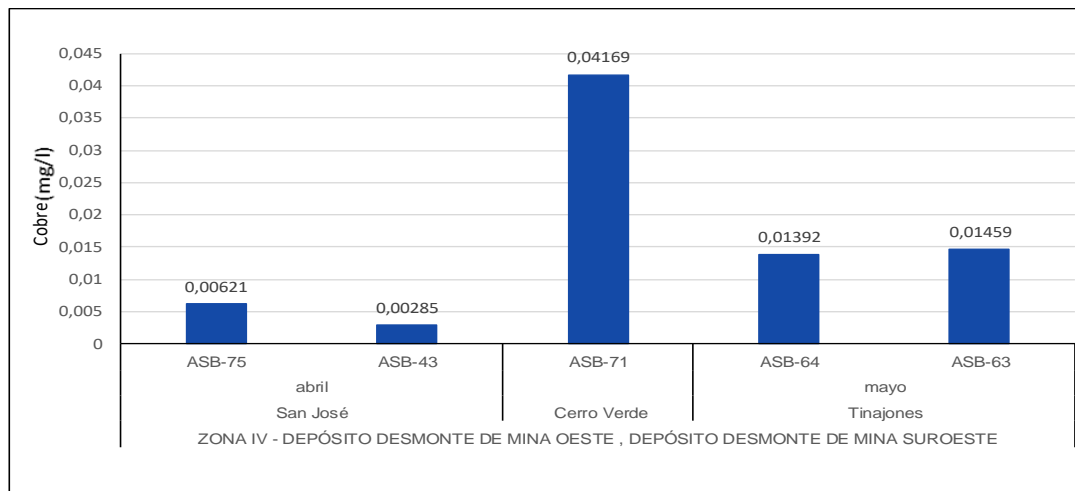


Figura 6-105. Cobre en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

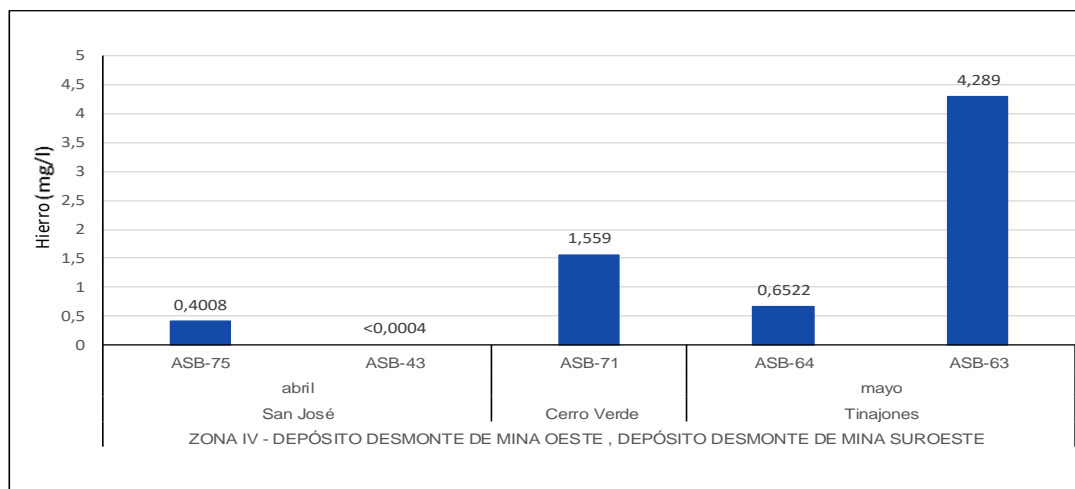


Figura 6-106. Hierro en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

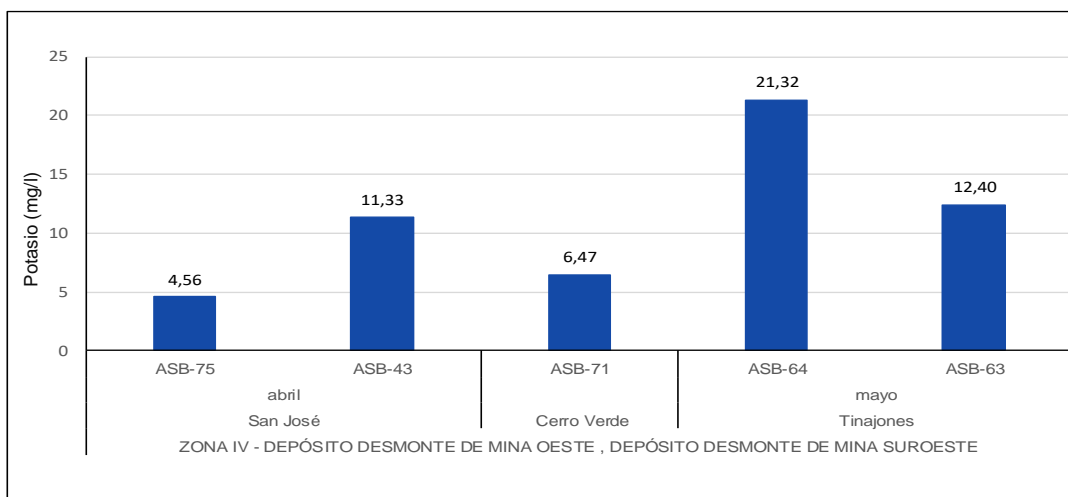


Figura 6-107. Potasio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

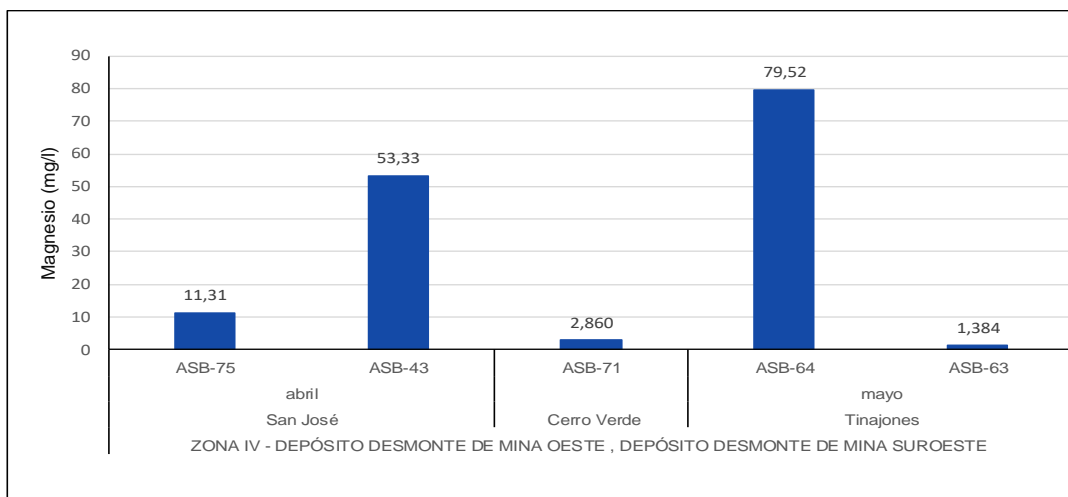


Figura 6-108. Magnesio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

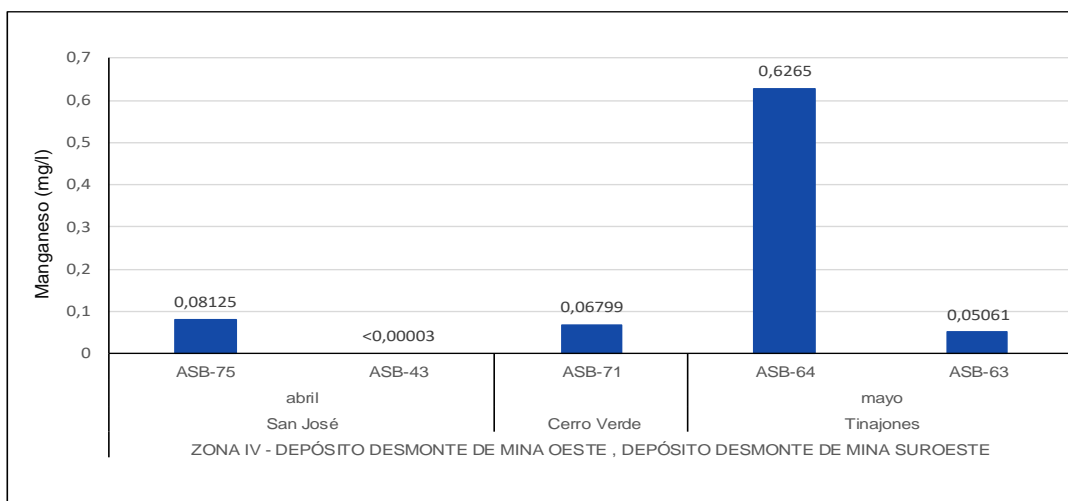


Figura 6-109. Manganeso en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

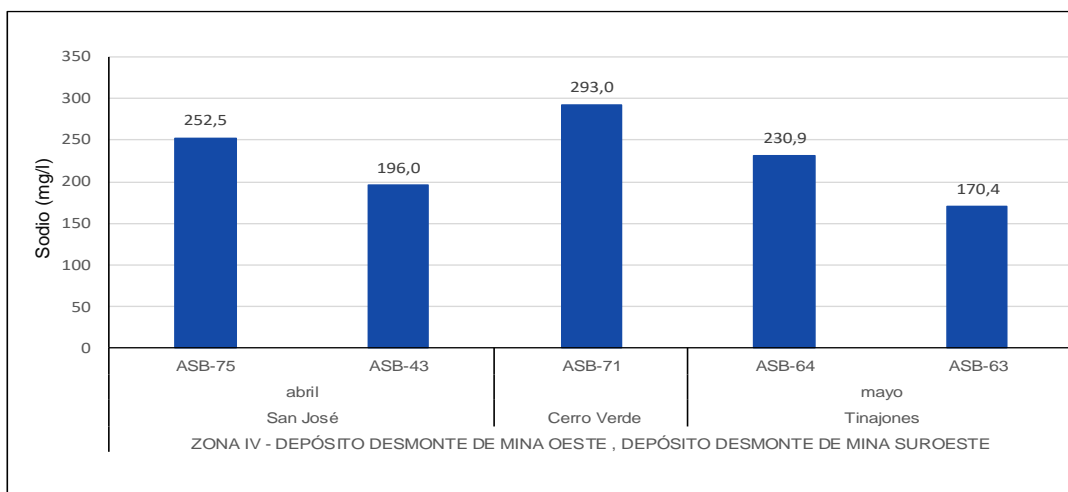


Figura 6-110. Sodio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

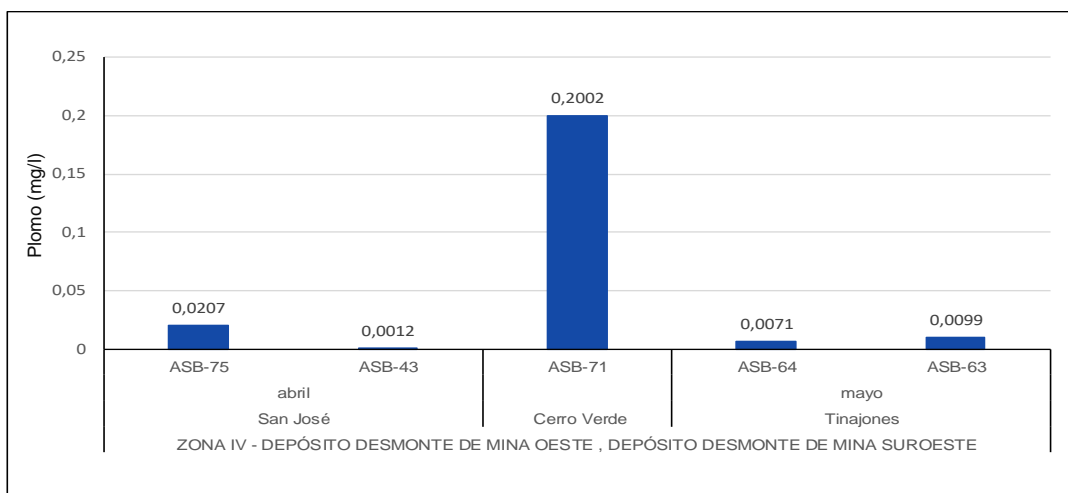


Figura 6-111. Plomo en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

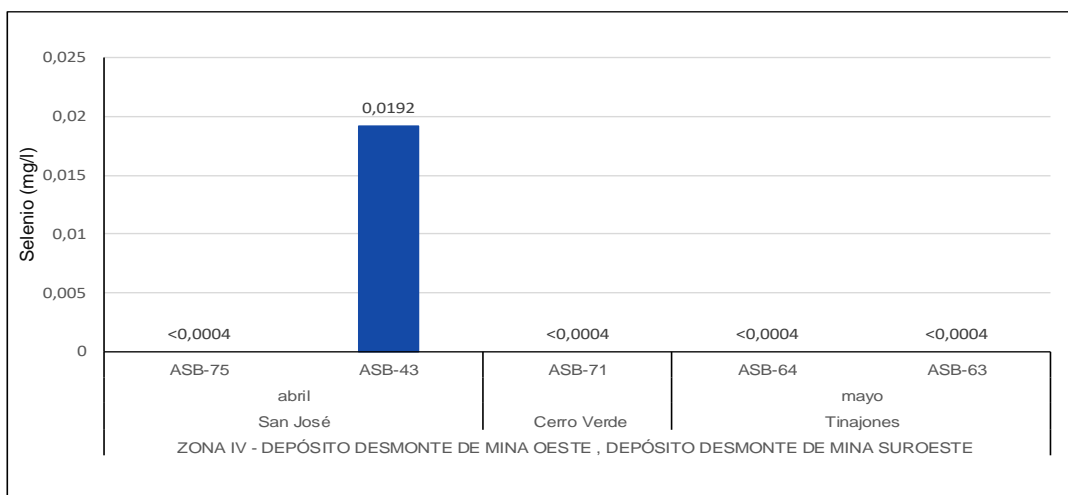


Figura 6-112. Selenio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

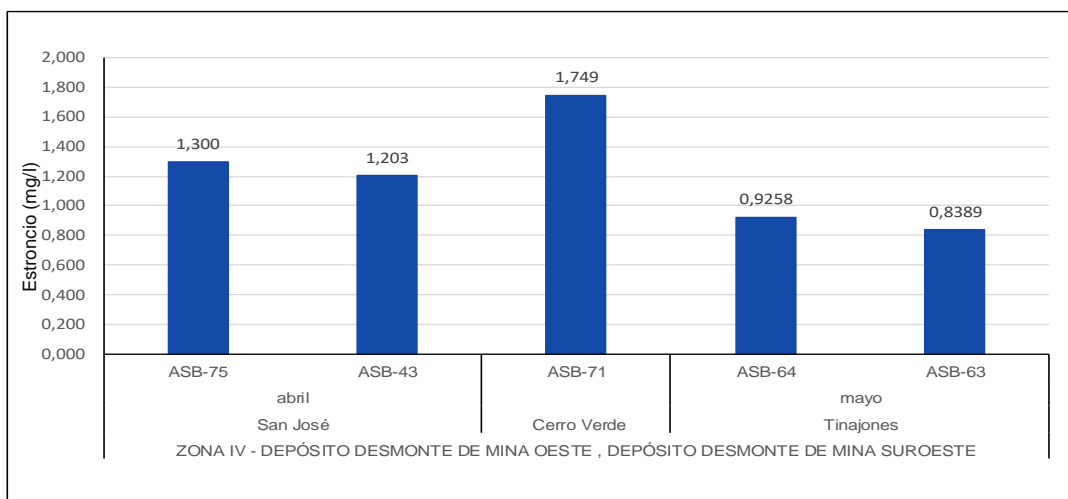


Figura 6-113. Estroncio en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la zona IV

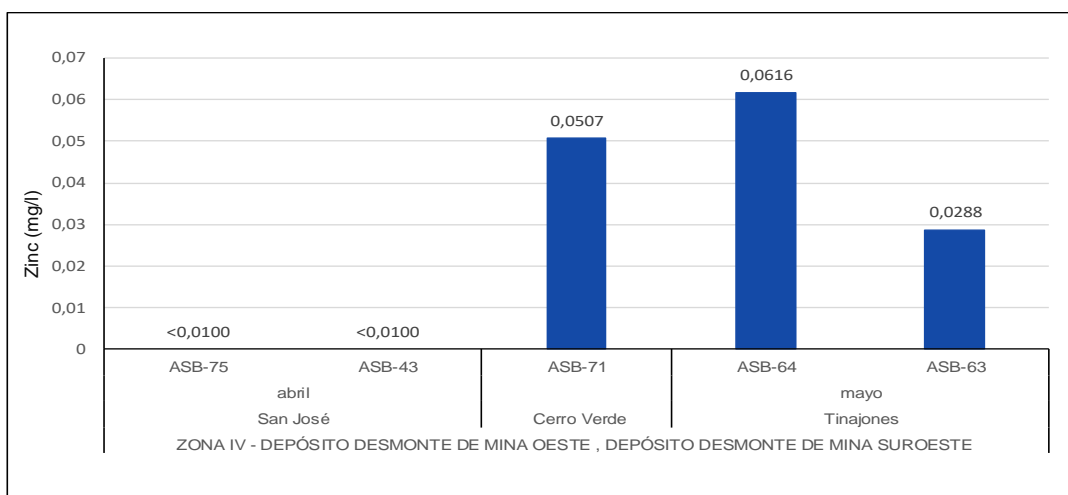


Figura 6-114. Zinc en el agua subterránea (piezómetros) evaluada en el 2018 en la Zona IV

6.3.2 Caracterización geológica

El área de estudio geológicamente presenta edades del precámbrico hasta el cuaternario reciente, conformada por rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias.

6.3.2.1 Unidades regionales

I. Complejo Basal de la costa

Este complejo basal está compuesto por rocas metamórficas antiguas tales como gneis y esquistos, cuyas transiciones varían de bandeados a félsicos. Asimismo, existen intrusiones ligadas a las rocas graníticas de grano grueso (INGEMMET, 1968).

a) Formación chocolate

Esta formación se encuentra aflorante al sur del depósito de relave Enlozada y parte central del DDM Oeste. Conformado principalmente por secuencias estratigráficas de rocas volcánicas con intercalaciones de rocas clásticas, cuyo contacto superior son las calizas Socosani (INGEMMET, 1968).

**b) Formación Socosani**

Esta formación se encuentra distribuida al este del depósito de relaves Enlozada, norte del depósito de relaves Linga y parte central del DDM Sureste y Oeste. Se encuentra conformada por secuencias calcáreas con niveles de calizas pizarrosas de color gris oscuro que se encuentran afectadas por los intrusivos del Batolito de la Caldera (INGEMMET, 1968).

II. Rocas intrusivas

Las rocas intrusivas que pertenecen al complejo plutónico se emplazaron de manera independiente, tanto en límites de contacto, así como en las orientaciones paralelas al rumbo andino (noroeste-sureste) (INGEMMET, 1968).

a) Gabro

Esta roca se encuentra rodeada e intruida por miembros del grupo Linga, se presentan a manera de bloques redondos de color marrón oscuro con superficie rugosa generando bandeamientos, donde la distribución de los granos presenta una orientación preferencial. Es importante resaltar que se encuentran aflorando al norte del depósito de relaves Enlozada (INGEMMET, 1968).

b) Grupo Linga

Este grupo está compuesto por rocas intrusivas como, granito, granodiorita, monzonita, monzodiorita. Este tipo de roca forma parte de la cordillera de la Caldera y poseen una coloración rojiza.

La diversidad de rocas de este grupo se debe en gran parte al magma ácido (granítico) por asimilación del gabro existente (INGEMMET, 1968).

c) Granodiorita Yarabamba

Este tipo de rocas se encuentran aflorantes al noreste del depósito de relaves Enlozada, la mayor parte de ellas se formó a consecuencia de numerosas pulsaciones magmáticas, de diferentes composiciones. Ocasionalmente esta litología se encuentra alterada, manifestándose a través de manchas dentro de la roca (INGEMMET, 1968).

6.3.2.2 Litoestratigrafía

En esta sección se describirán las principales unidades estratigráficas en el área donde se emplaza los depósitos relaves Enlozada (Zona I), Linga (Zona II), y los DDM Noreste y Pad 4B (Zona III).

I. Zona I: Depósito de relaves Enlozada

La litoestratigrafía que se desarrolla en el depósito de relaves Enlozada está representada por las rocas granodioríticas y gabros, cuyos afloramientos se disponen hacia el este y con menor frecuencia hacia el oeste del mismo. Seguidamente, hacia el sur aflora la roca gneis, en tanto que las calizas desplazadas hacia el oeste se encuentran en menor proporción entrando en contacto con las dioritas (Figura 6-115).

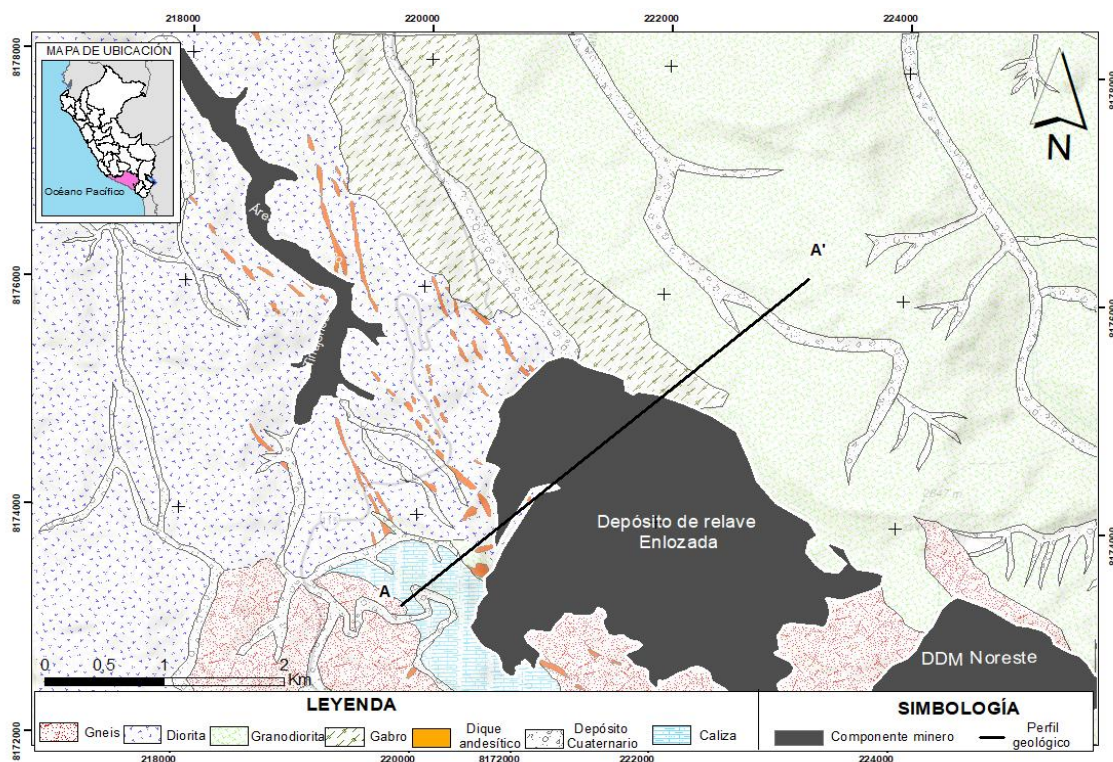


Figura 6-115. Litología local en la zona I

La granodiorita entra en contacto con el gneis en forma transicional, asimismo se presentan inyecciones subcortante de granodioritas máficas que podrían estar relacionadas a intrusiones de menor edad (Figura 6-116 a). Además, estas se muestran englobadas y parcialmente asimiladas a manera de xenolitos (Figura 6-116 b).

En general las granodioritas poseen coloraciones que varían entre grises a rosadas asociadas con el incremento de la biotita, textura porfírica de grano grueso y presentan enclaves máficos de diversos tamaños cuyos diámetros son < 20 cm (Figura 6-116 c).

Es importante resaltar que, estas granodioritas desarrollaron mayor deformación dúctil en el estribo derecho de este componente, evidenciada a través de la foliación milonítica e intenso tectonismo (Figura 6-116 d).

Se identificó que en el extremo norte del estribo derecho de este componente, las granodioritas se encuentran intruidas discordantemente por diques de aptitas en sentido noroeste – sureste; que se representan a manera de fallas normales e inversas, siendo el movimiento medido en centímetros (potencia varía entre 5-40 cm). Además, poseen coloraciones blanquecinas y rosáceas, de grano medio a fino con textura sacaroidea (Figura 6-116 e).

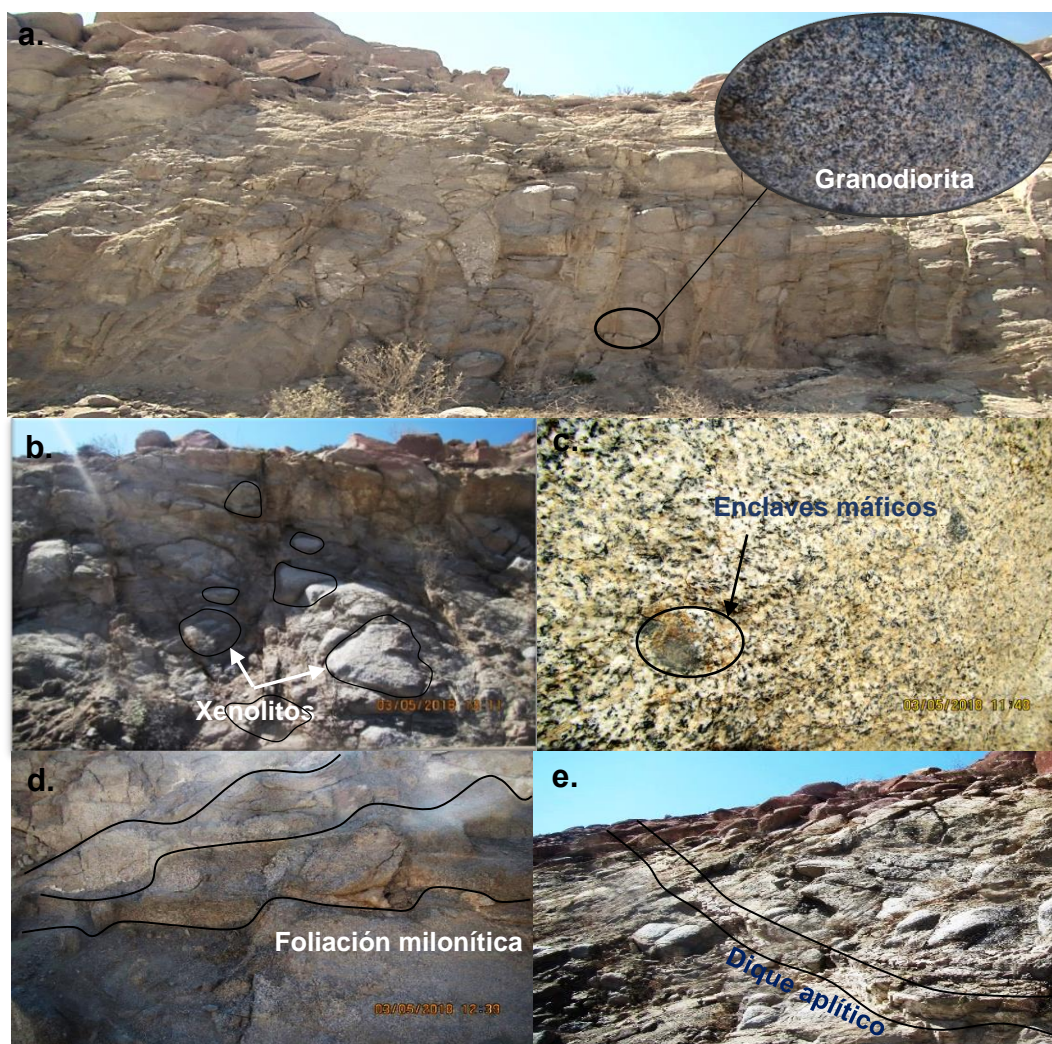


Figura 6-116. a. Afloramiento de granodiorita con presencia de inyecciones subcortantes de granodioritas máficas, **b.** Presencia de xenolitos, **c.** Enclaves máficos, **d.** Foliación milonítica y **e.** Dique aplítico

Hacia el norte, afloran gabros desplazándose a manera de intrusiones circulares elongadas en sus ejes mayores en sentido noroeste-sureste; asimismo, se encuentran pequeños cuerpos con morfologías subredondeadas que poseen tonalidades verdes a grises.

Esta litología posee estructura masiva con contenido de plagioclasa, hornblenda y piroxeno; sin embargo, la presencia de estos en los bordes está ligada a las fallas que producen una deformación dúctil esquistosa (Figura 6-117).



Figura 6-117. Afloramiento de gabbro masivo, ligada a fallas que producen una deformación dúctil esquistosa

En cuanto a las dioritas que afloran al oeste del depósito de relaves Enlozada, poseen coloraciones grises por el alto contenido de máficos y el aumento de feldespatos alcalinos produce en ella la variación de coloración clara (Figura 6-118). Es importante resaltar que, estas rocas superficialmente presentan aspecto fresco, escasa alteración y moderado fracturamiento, además de presentar granos bien orientados y bien cementados.

Existen intrusiones de diques andesíticos replegados que cortan a las dioritas, debido a presiones mecánicas de las mismas. Dichos diques poseen una estructura pegmatítica, con contenido de óxidos de hierro en patinas y adquieren coloraciones verdosas por la cantidad de hornblendas, además se observa un cambio brusco en las orientaciones de sus granos debido a un contacto discordante angular.



Figura 6-118. Afloramiento de diorita de coloración gris con alto contenido de máficos

Hacia el suroeste, se encuentran aflorantes las calizas grises a pardas pertenecientes a ambientes marinos, asimismo existen tramos que toman coloraciones negruzcas que sugiere la presencia de materia orgánica petrificada. Estos poseen superficies ondulantes, con una disposición estratiforme debido al acoplamiento de los estratos.

Estas calizas forman cuerpos rocosos aislados detríticos, de estratos gruesos que buzcan como promedio entre 30°-40°, además de poseer una recristalización de calcita en matriz y venillas (Figura 6-119).



Figura 6-119. Afloramiento de caliza, conformado por estratos gruesos con buzamientos entre 30- 40°

En relación a los afloramientos de gneis, estos se encuentran aflorantes al sur del depósito de relaves Enlozada. Posee un bandeamiento composicional entre minerales más claros (bandeamiento de cuarzo) y oscuros (bandeamiento de feldespato y micas) con una estructura frágil superficialmente.

En la microcuenca «Quebradita» los afloramientos de granodiorita se encuentran altamente meteorizadas, formando lámelas a consecuencia de los cambios climáticos acontecidos en la zona. Además, los xenolitos, se encuentra clasto soportadas por grava, arena y limo (Figura 6-120 a).

En cuanto a los depósitos cuaternarios se tiene principalmente la presencia de cantos rodados representada por rocas volcánicas, intrusivas, y algo de calizas. En tanto que estos bloques adoptan formas redondeadas a subredondeadas hasta angulosas, desplazándose en toda la quebrada (Figura 6-120 b).

Estos materiales fueron transportados desde las partes altas por acción eólica, seguidamente de fuertes precipitaciones que sucedieron en la zona, de esta forma se fueron extendiendo sinuosamente, hasta sedimentarse. Se precisa, que los depósitos coluviales se presentaron antes de la sedimentación fluvial; evidencia de ello, son los estratos que se encuentran en la parte baja compuesta por estratificación estratocreciente (Figura 6-120 c).



Figura 6-120. Depósitos coluviales en el área de influencia de Quebradita con presencia de:
a. Depósitos coluviales, **b.** Sedimentación estratocreciente y **c.** Presencia de cantos rodados heterolítico

En la Figura 6-121, se muestra el corte geológico A-A' en el área de influencia del depósito de relaves Enlozada. Para ello se realizó una interpretación esquemática de la litoestratigrafía y las relaciones estructurales en profundidad³⁷.

Se distinguen 2 afloramientos de secuencias ígneas plutónicas, la primera de ellas se relaciona con la granodiorita aflorante al este del depósito de relaves Enlozada, en tanto que la diorita se encuentra aflorante en el estribo oeste, cabe resaltar que estas secuencias intrusivas entran en contacto gradacional.

La secuencia volcánica está representada por diques andesíticos - dacíticos, que entran en contacto con las dioritas y calizas por medio de fallas normales e inversas. Además, como parte de esta secuencia se observa a los afloramientos de caliza ondulante que generan topografías moderadamente pronunciadas.

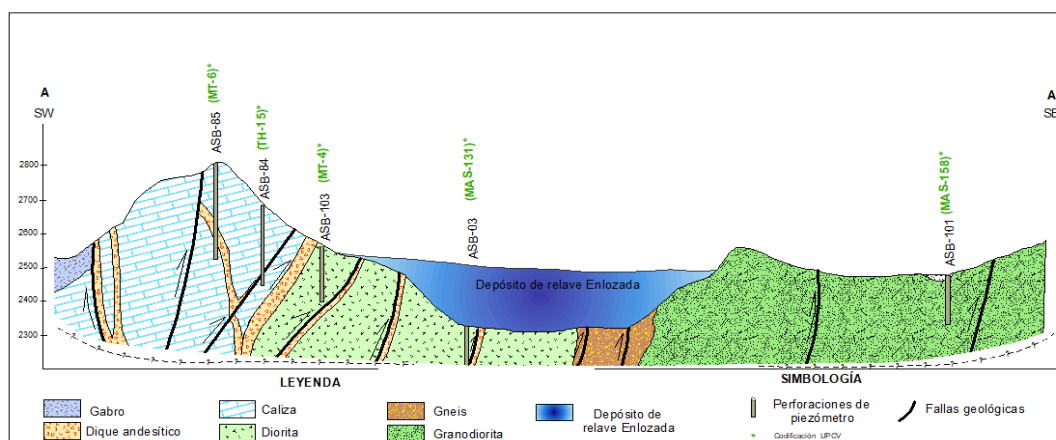


Figura 6-121. Perfil litológico en la zona I

Fuente: Datos de las perforaciones de piezómetros proporcionados por la UP Cerro Verde

- Análisis estructural

De acuerdo a la caracterización estructural en esta zona, las principales estructuras (fallas mayores) siguen una dirección noroeste-sureste (Figura 6-122).

Se distingue tres sistemas de fallas, consideradas las más importantes y de carácter regional. La primera de ellas denominada falla «Variante», con dirección noreste-sureste (coincide con la dirección andina), que pasa por el extremo noroeste - sureste del mismo cuya estructura sugiere el contacto de las rocas plutónicas granodioríticas con dioritas. Mientras que la segunda falla es «Cenicenta», que se desplaza lateralmente en dirección noroeste - sureste desde los afloramientos de gneis, diorita hasta los gabros. Por último, se tiene a la falla «Jenks», que se ubica al extremo oeste de este componente, que se desarrolla longitudinalmente atravesando los gneis y calizas.

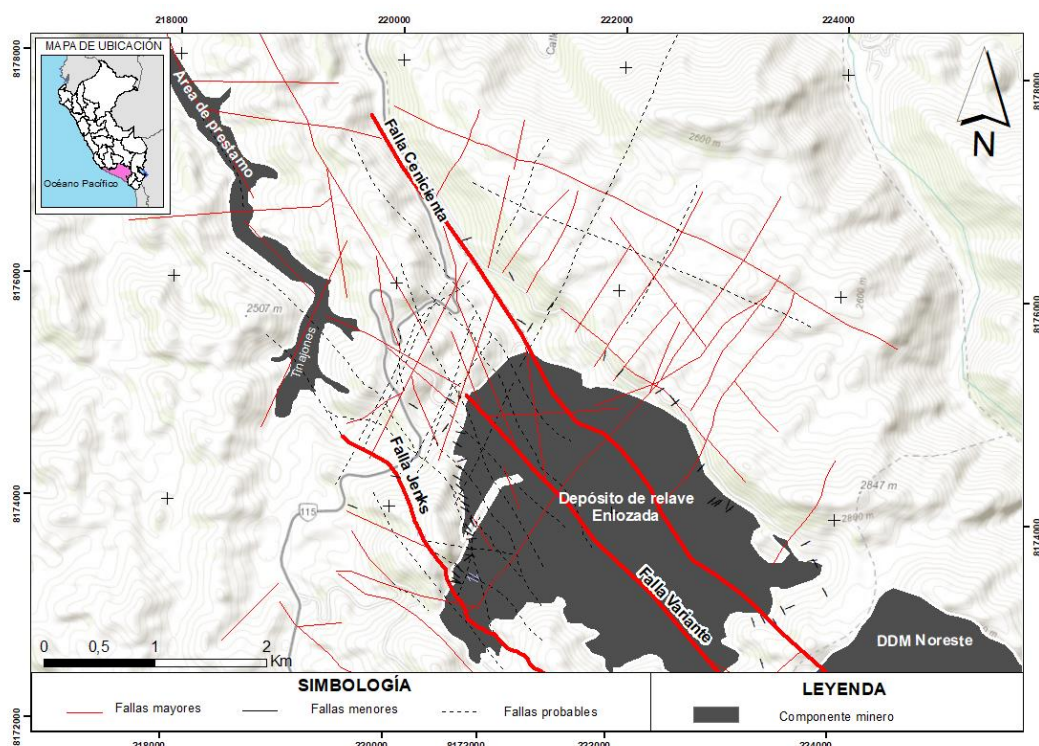


Figura 6-122. Litología local en el área donde se emplaza el depósito de relave Enlozada

Para el análisis estructural en esta zona, se utilizaron datos estructurales procesados para obtener los principales esfuerzos tanto en el estribo derecho como izquierdo. Por un lado, el resultado que se representa a través de falsías estereográficas hacia en el estribo izquierdo (20 datos) del depósito de relaves Enlozada demuestra, que se trataría de una zona de compresión, evidenciada a través de fallas inversas con componente dextral.

El principal esfuerzo (σ_1) tiene una orientación noreste-suroeste, lo que sugiere que las estructuras tensionales son paralelas al mayor esfuerzo. Por lo tanto, el efecto de la deformación frágil, así como la dirección de las fallas generadas; denotan que el depósito de relaves se dispone entre las fallas y fracturas en forma paralela al tensor de compresión, según McClay, *et al.*, (1987), se consideran abiertas las cuáles podrían comportar como fallas normales en la mayoría de los casos con algún movimiento de rumbo lateral, además de ser un medio de libre tránsito de fluidos.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Con respecto al análisis estructural en el estribo derecho (15 datos) resultó que principalmente se encuentran en sentido noreste-suroeste, por lo tanto, estas fallas fueron sometidas a una dinámica inversa con componente dextral, dando como resultado estructuras tensionales noroeste - sureste favorables para el emplazamiento de flujos. Estas fallas estarían representadas por las fallas transversales con dirección NW-SE que podrían permitir el paso de fluidos (Figura 6-122).

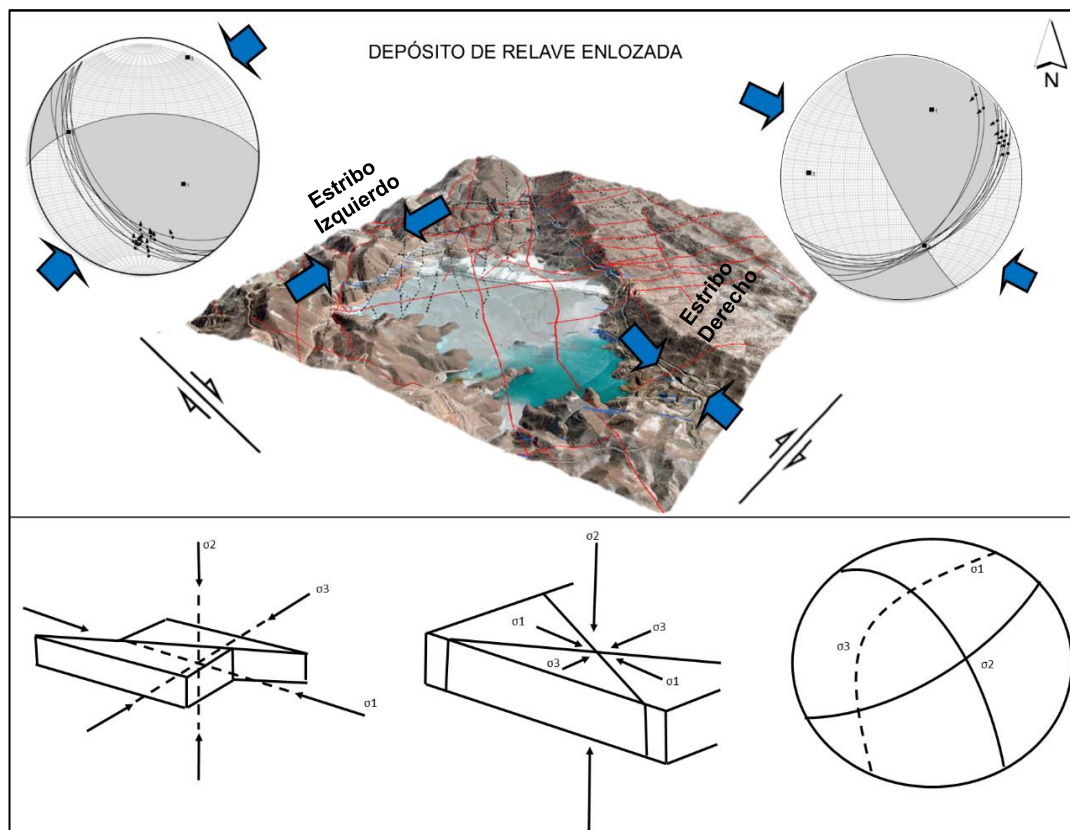


Figura 6-123. Representación de los esfuerzos principales en la zona I

II. Zona II: Depósito de relaves Linga

Las principales rocas en el área de donde se emplaza el depósito de relaves Linga se muestra en la Figura 6-124, la cual está representada por diferentes rocas ígneas cubiertas por tufos volcánicos y depósitos cuaternarios.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

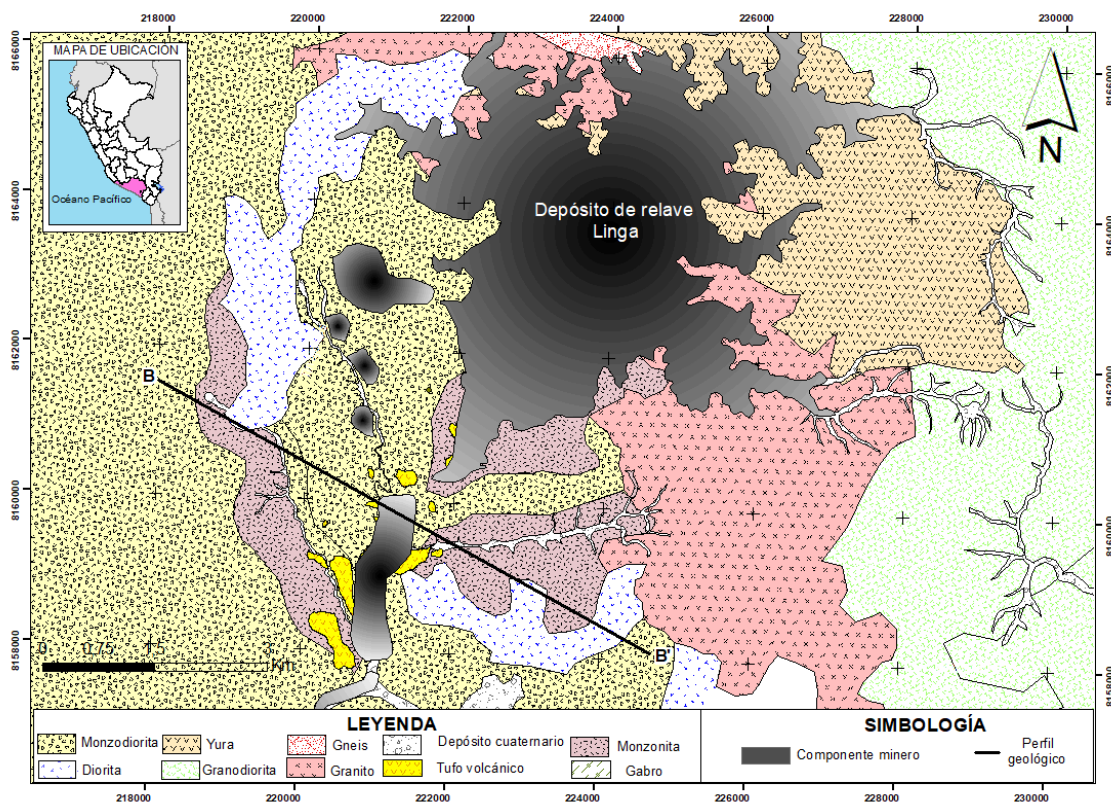


Figura 6-124. Litología local en la zona II

La monzodiorita representaría la mayor litología aflorante, distribuyéndose al suroeste del mismo. Se precisa que posee una textura fanerítica de grano grueso, coloración rosada a gris, con contenido de cuarzo (40 %), feldespato potásico (70 %) mayor que la plagioclasa y como accesorios a la hornblenda y biotita (Figura 6-125).

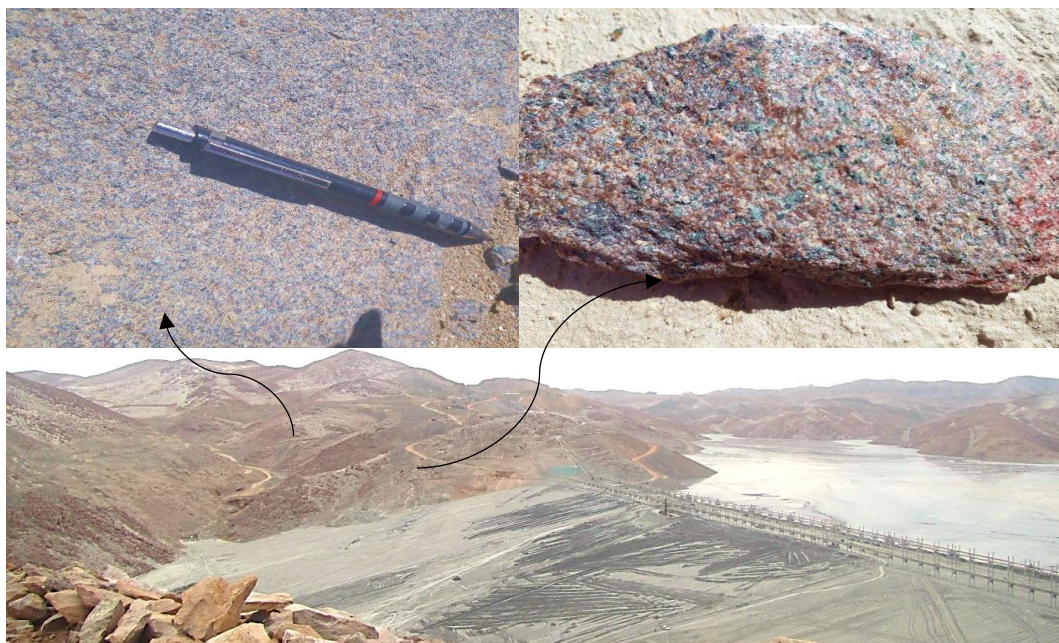


Figura 6-125. Afloramiento de monzodiorita con presencia de hornblenda y biotita

Es importante resaltar que la granodiorita entra contacto con 2 rocas. La primera de ellas la diorita, que se encuentra al oeste y sur del componente minero, posee

coloración gris, de textura fanerítica de grano medio, constituida principalmente por plagioclasa y cuarzo.

La segunda de ellas es la roca monzonita que posee menor cantidad de feldespato y cuarzo que supera el 50 %. Posee textura fanerítica de grano medio a fino y la coloración varía según la cantidad de accesorios máficos (Figura 6-126).



Figura 6-126. Afloramiento de monzonita con presencia de hornblenda y biotita y cuerpo aislado de tufo volcánico

El granito se encuentra aflorante al este del componente minero, posee coloración gris, de grano fino a grueso, inequigranular y no presenta bandeamiento alguno. En cuanto a la abundancia de minerales posee cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita siendo el principal mineral accesorio. Ocasionalmente este cuerpo ígneo se encuentra intruida por aplitas de grano fino.

Adicionalmente se observaron cuerpos aislados y dispersos de tufos volcánicos en la hacia el suroeste del depósito de relaves Linga.

Por último, se tiene a las granodioritas que se disponen al este del depósito de relave que muestran contactos difusos con la formación Yura. La principal característica de esta litología es presentar enclaves máficos y xenolitos de granodioritas de grano fino.

Como se muestra en la Figura 6-127, el corte geológico B-B' muestra a la monzodiorita que entra en contacto con la monzonita, estas intrusiones constituyen las 2 principales intrusiones del área de influencia del depósito de relaves Linga. Es importante mencionar que los afloramientos de granito y gabro fueron evidenciados a través de los piezómetros ASB-55 y ASB-40.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

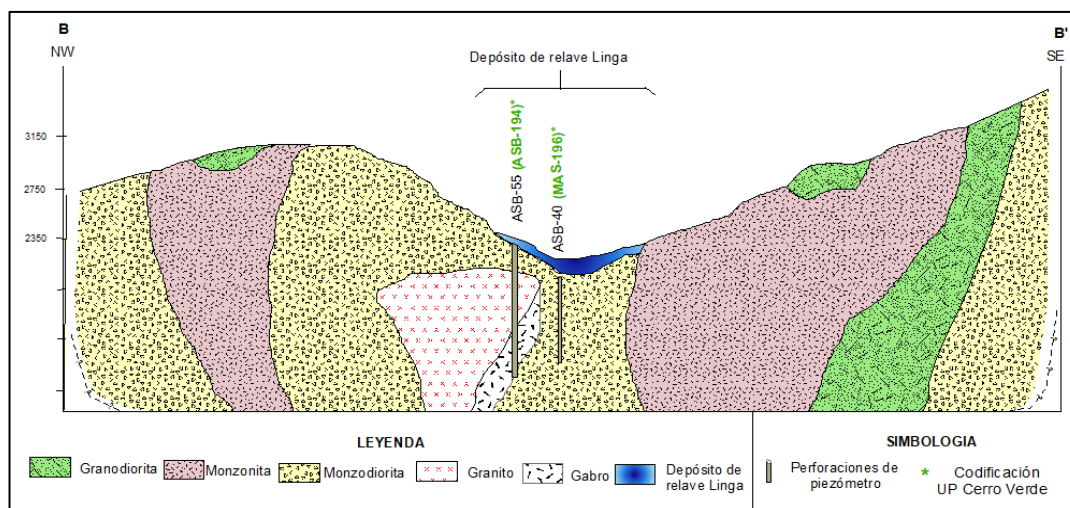


Figura 6-127. Perfil litológico en la zona II

- Análisis estructural

Los resultados de caracterización estructural en esta zona, indica la predominancia de 2 orientaciones, el primero hacia al noroeste en tanto que el segundo al sureste lo que desarrollo esfuerzos mecánicos estructurales en los mismos (Figura 6-128).

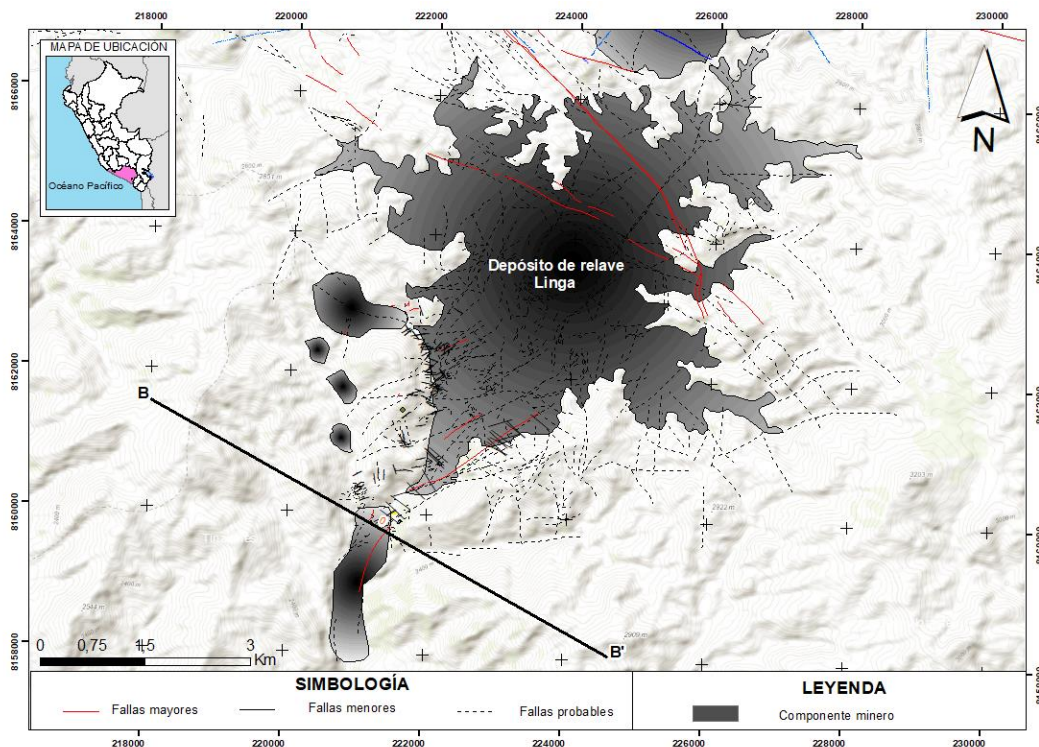


Figura 6-128. Representación estructural en la zona II

Para los análisis cinemáticos de las estructuras en este componente se utilizaron 140 datos. Cuyo resultado de las proyecciones estereográficas demuestra que el esfuerzo σ_1 y σ_2 se disponen hacia la horizontal, mientras que el σ_3 es vertical; lo que implicaría que está dominado por fallamiento inverso con componente horizontal casi nulo, donde las fallas paralelas al esfuerzo mayor son las fallas tensionales.

Como se observa en la Figura 6-128, la falla regional Yura tiene una dirección noroeste-sureste, que pone en contacto al grupo Yura con las intrusiones monzoníticas y según su desplazamiento se encuentra paralela o subparalela al máximo esfuerzo principal o de compresión, lo cual implicaría que se comportan como fallas abiertas.

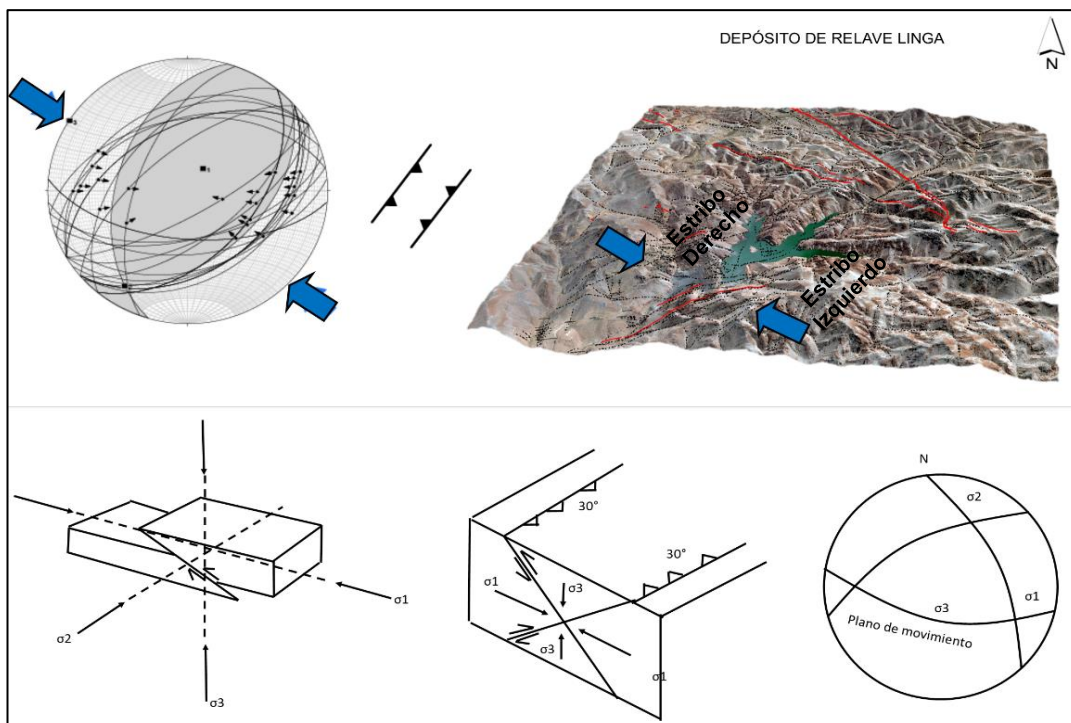


Figura 6-129. Representación de esfuerzos principales en la zona II

III. Zona III: PAD, presa Huayrondo, tajos y DDM

Litológicamente el área donde se emplaza el Pad 4B y DDM Noreste se encuentra dominado por la presencia de roca metamórfica, ígnea y depósito cuaternario. Por un lado, la roca granodiorita se encuentra ubicada al norte del DDM Noreste, pasando por la quebrada Huayrondo.

Los afloramientos de gneis se encuentran aflorando al este del DDM Noreste entrando en contacto gradual con las granodioritas (Figura 6-130).



Figura 6-130. Afloramiento de gneis ubicada al oeste del Pad 4B

La segunda litología distinguida corresponde a gneis cuyo contacto es transicional con las dioritas. Macroscópicamente son de grano medio a grueso, de coloración gris, con presencia de feldespato paralela a la foliación, agregados de cuarzo y minerales accesorios como la magnetita.

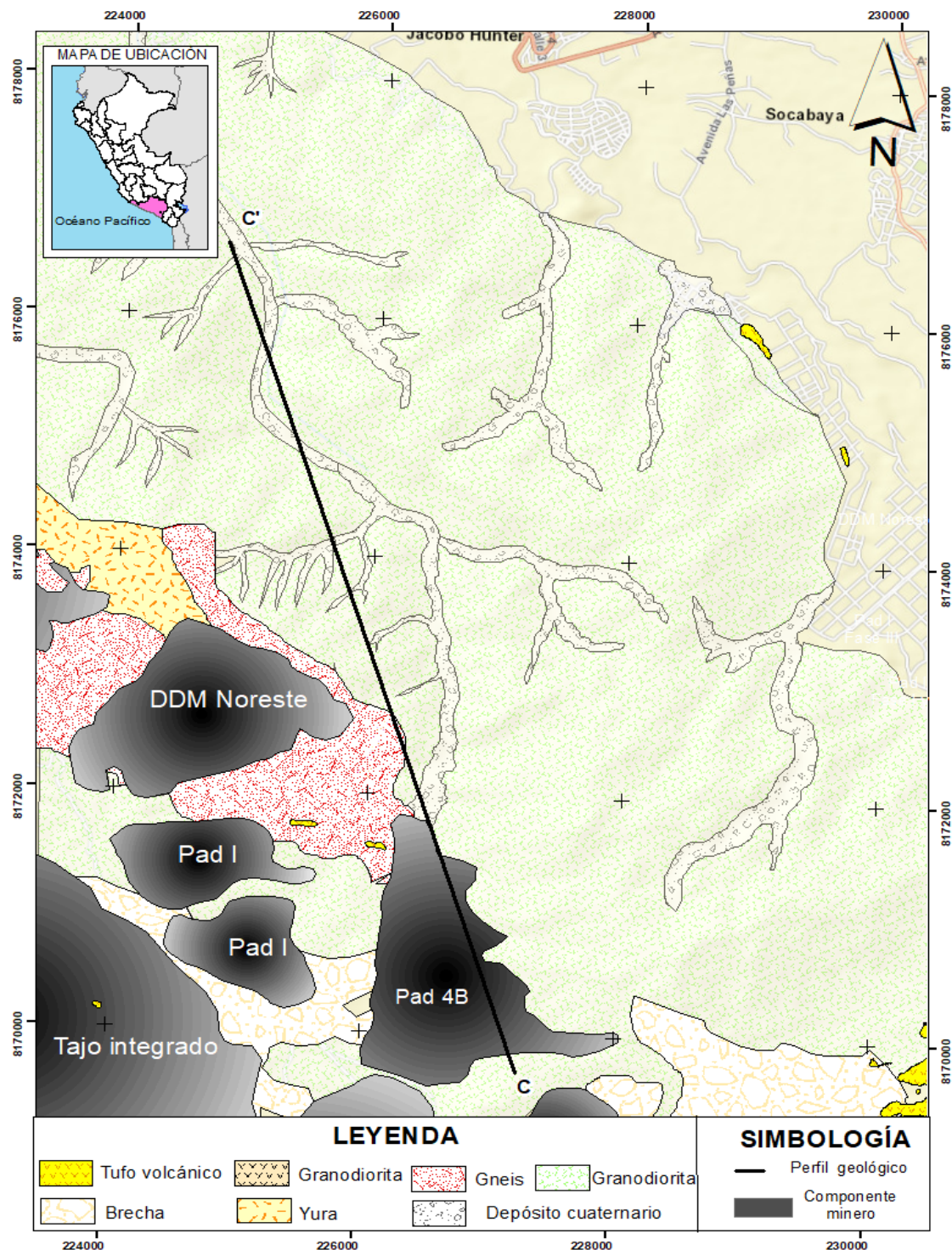


Figura 6-131. Representación de esfuerzos principales en la zona III

Como se observa en la Figura 6-132a la granodiorita es gris claro de grano medio, variando su coloración de acuerdo a la cantidad de accesorios al igual que se describió para el estribo derecho del depósito de relaves Enlozada, pero con algunas variaciones en la cantidad de máficos. Además, se distingue un marcado diaclasamiento de rumbo N 50° E e inclinación de 40 - 55° hacia el noroeste (Figura 6-132b).

La textura que presenta esta roca, es fanerítica, observándose un desarrollo de las plagioclasas en relación a los otros minerales que lo conforman, en tanto que la cantidad

de feldespato es menor. Cabe precisar que el mineral que más predomina es la biotita primaria.

Las tonalidades rosáceas de los elementos líticos redondeados de tamaños variables en las partes intemperizadas, son más notables en esta quebrada. Siendo, la parte media de la quebrada Huayrondo donde se puede apreciar bloques (> 5 m), subredondeados a redondeados, los cuáles fueron generados por procesos de transporte desde las partes altas (Figura 6-132c).

En la margen derecha de la quebrada Huayrondo, los afloramientos granodioríticos que afloran se encuentran altamente meteorizadas por las características climáticas a las que fueron sometidas. Prueba de ello, es la escamación concéntrica observada en ella, generando un desprendimiento en forma de capas o lámelas (Figura 6-132d).



Figura 6-132 a. Afloramiento de granodiorita gris claro de grano medio, b. Presencia de diaclasamiento, c. Elementos líticos redondeados y d. Presencia de lámelas concéntricas

En la Figura 6-133, la granodiorita se encuentra cortada en forma sinuosa por diques aplíticos de potencias centimétricas que a veces configuran cuerpos de pequeños diámetros. Dichos filones poseen espesores variables menores a 70 cm, siendo los de 30 cm los de mayor frecuencia. Además, la presencia intrusiva sugiere que este cuerpo correspondería a una fase posttectónica.



Figura 6-133. Afloramiento de granodiorita cortada por diques aplíticos de potencias centimétricas

Como se puede observar en la Figura 6-134, el perfil geológico B-B' representa gráficamente la litología a profundidad³⁸. Este corte geológico muestra a las brechas que entran en contacto con las granodioritas, y a su vez los mismos se encuentra afectados por fallas de gran extensión como la falla «Variante». Por otro lado, se observa que al norte del Pad 4B, existe la presencia de gneis con presencia de marcada foliación.

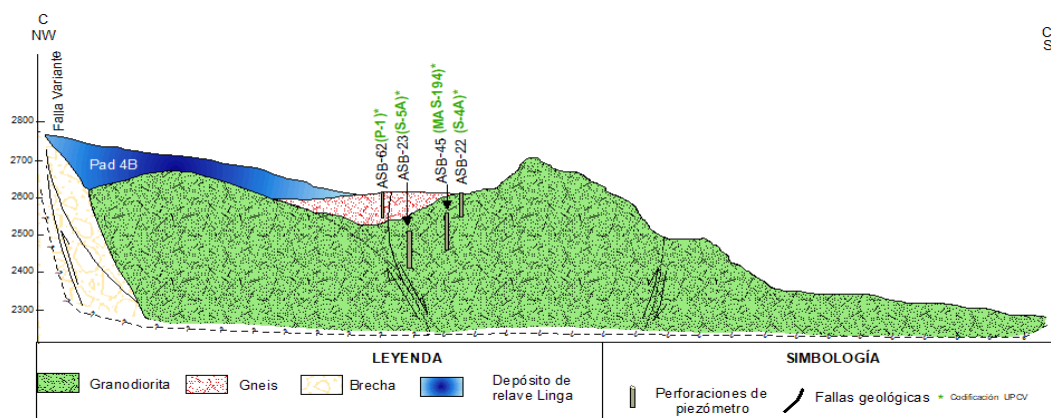


Figura 6-134. Perfil estratigráfico en la zona III

- Análisis estructural

Los resultados de caracterización estructural en esta zona, indica la predominancia de sistemas estructurales noroeste-sureste; y noreste-suroeste generando cambios estructurales en los mismos (Figura 6-135).

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

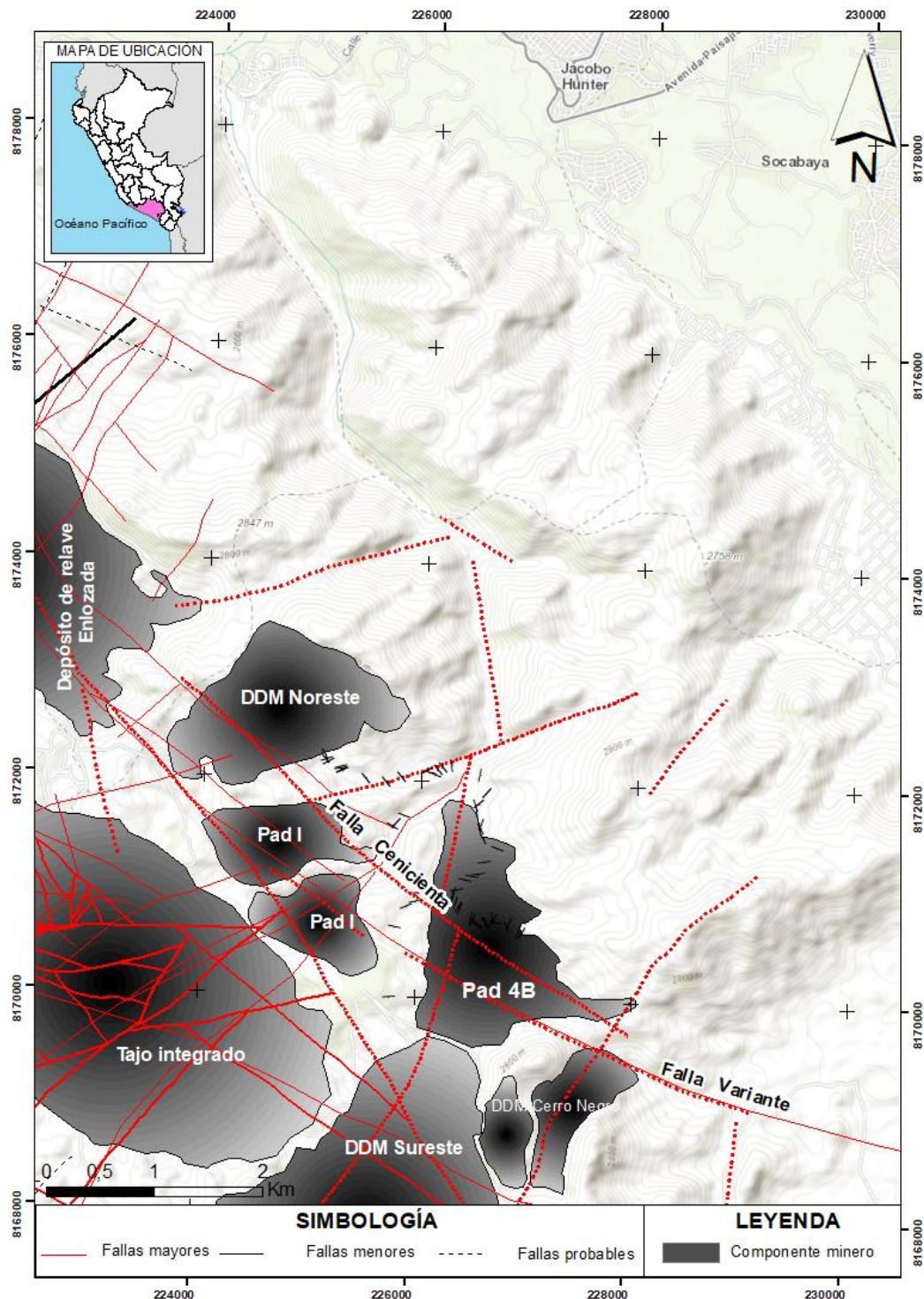


Figura 6-135. Representación de esfuerzos principales en la zona III

En esta zona se realizó el análisis cinemático de las estructuras utilizando 47 datos. Cuyo resultado de las proyecciones estereográficas demuestra que los esfuerzos principales σ_1 es de norte-sur, mientras que el σ_3 tiende a la vertical en tanto que el esfuerzo σ_2 es menor. Lo que implicaría que está dominado por fallamiento inverso sin un componente horizontal (Figura 6-136).

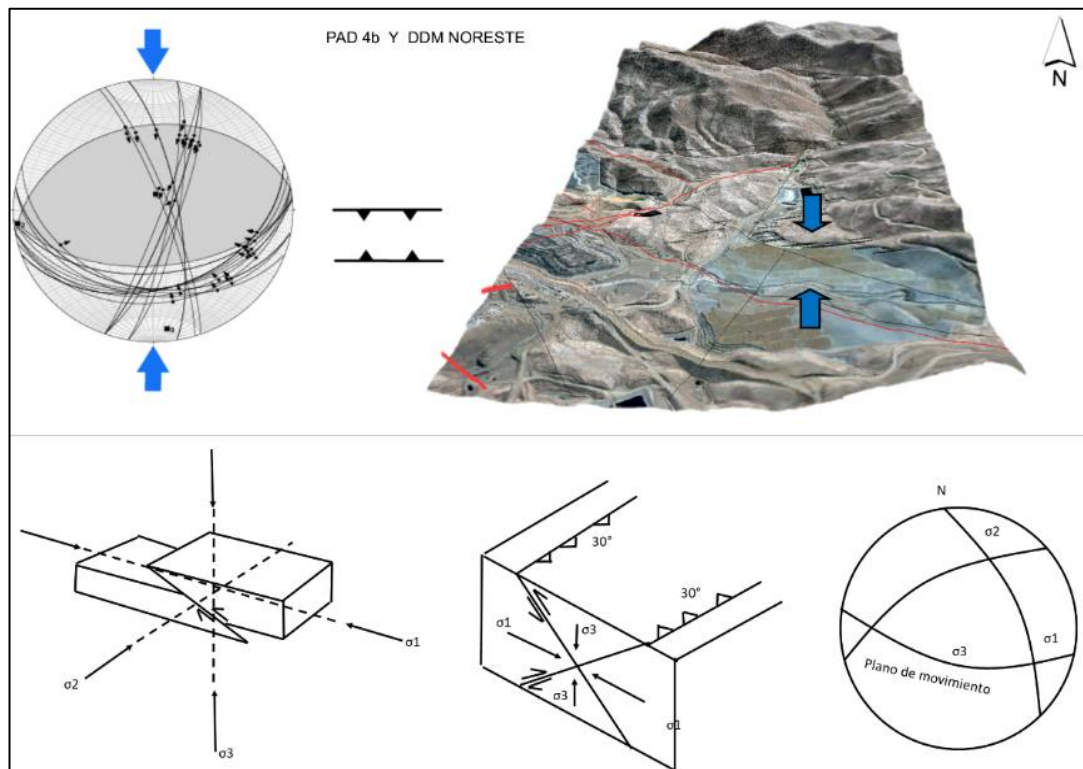


Figura 6-136. Representación de esfuerzos principales en la zona III

6.3.3 Caracterización de roca

Se presenta los resultados del análisis geoquímico en 6 muestras de roca correspondientes a 2 zonas (Figura 6-137), 3 de ellas en la Zona I (RE-1, RE-2, RE-3), y otras 3 en la Zona II (RL-1, RL-2, RL-3), detalladas en el Anexo 2.

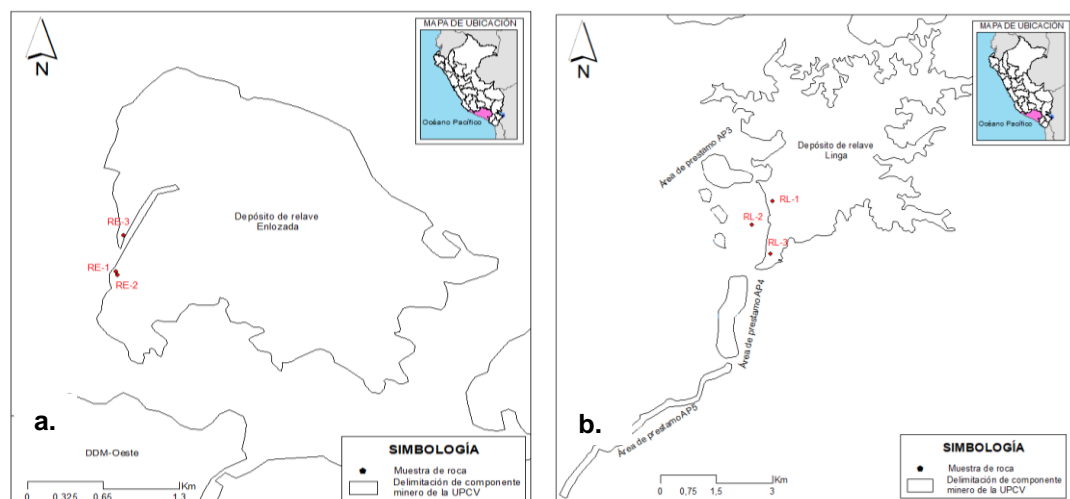


Figura 6-137. Distribución de muestras de roca para caracterización geoquímica: a. Zona I y b. Zona II

Para la caracterización geoquímica en las rocas, se realizaron ensayos químicos que incluyó determinación de metales, Tessier (extracción secuencial de metales solubles) y procedimientos de lixiviación por precipitación sintética (SPLP) para determinar el potencial de lixiviación de metales, que podrían tener impacto sobre aguas subterráneas. Además, se consideró la prueba estática de balance ácido-base (en

adelante ABA) para definir la generación de acidez y la prueba de lixiviación *shake flask extraction* (en adelante SFE) para aniones solubles a pH neutro.

6.3.3.1 Zona I: Depósito de relaves Enlozada

La muestra RE-1 corresponde a una caliza, macroscópicamente posee coloración gris, grano medio a fino, textura mudstone, aspecto masivo, moderado fracturamiento y ocasionalmente presenta recristalización de calcita (Figura 6-138).



Figura 6-138. Muestra de mano de caliza tomada del estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada

De los resultados mineralógicos, presentó mayor porcentaje la calcita, plagioclasa tipo oligoclasa y cuarzo, y en menor proporción clinocloro, biotita, epidota, actinolita y como mineral arcilloso a la montmorillonita, detallados en la Tabla 6-23.

Tabla 6-23. Análisis mineralógico de caliza (RE-1)

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado (%)
Calcita	CaCO_3	39
Plagioclasa (Oligoclasa)	$(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$	29
Cuarzo	SiO_2	13
Clorita (Clinocloro)	$(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	7
Mica (Biotita)	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2]$	4
Epidota	$\text{Ca}_2(\text{Fe}, \text{Al})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$	2
Anfíbol (Actinolita)	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	2
Montmorillonita	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2,n}(\text{H}_2\text{O})$	2

Fuente: Informe de ensayo N.º IL-001MI-731. Laboratorio Bizalab.

La muestra RE-2 es una granodiorita, macroscópicamente posee coloración gris en roca fresca y adquiere pigmentación amarillenta en roca meteorizada. Posee grano medio a grueso, textura fanerítica, aspecto masivo y moderado fracturamiento (Figura 6-139).

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»



Figura 6-139. Muestra de mano de granodiorita tomada del estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada

En lo referente a los minerales que presenta la roca RE-2, la mayor proporción fue de plagioclasa, cuarzo, seguida de la ortoclasa, y en menor proporción de biotita, actinolita, clinocloro y montmorillonita mostrados en la Tabla 6-24.

Tabla 6-24. Análisis mineralógico de granodiorítica (RE-2)

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado (%)
Plagioclasa (Andesina)	$(Ca,Na)(Al,Si)_4O_8$	43
Cuarzo	SiO_2	24
Feldespato - K (Ortoclasa)	$KAlSi_3O_8$	10
Mica (Biotita)	$K(Mg,Fe)_3[AlSi_3O_{10}(OH,F)_2]$	8
Anfíbol (Actinolita)	$Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	7
Montmorillonita	$(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot n(H_2O)$	3
Clorita (Clinocloro)	$(Mg,Fe)_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$	2
Epidota	$Ca_2(Fe,Al)_3(SiO_4)_3(OH)$	< L. D.

Fuente: Informe de ensayo N.º IL-001MI-731. Laboratorio Bizalab

La muestra RE-3 corresponde a una andesita, cuando es roca fresca posee un color gris que se torna a pardo por efectos de la oxidación. Normalmente es de grano medio, textura afanítica, masiva y con contenido de trazas de óxidos de hierro (Figura 6-140).



Figura 6-140. Muestra de mano de andesita tomada del estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada

De acuerdo a los resultados de mineralogía en la roca RE-3 está compuesta mayormente por calcita, montmorillonita, plagioclasa y cuarzo, y en menor proporción caolinita, muscovita, yeso y talco, mostrados en la Tabla 6-25.

**Tabla 6-25.** Análisis mineralógico de andesita (RE-3)

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado (%)
Calcita	CaCO_3	22
Montmorillonita	$(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2,n}(\text{H}_2\text{O})$	20
Plagioclasa (Oligoclasa)	$(\text{Ca,Na})(\text{Al,Si})_4\text{O}_8$	18
Cuarzo	SiO_2	17
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	8
Mica (Muscovita)	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$	6
Talco	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	4
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	2
Pirita	FeS_2	< L. D.

Fuente: Informe de ensayo N.º IL-001MI-731. Laboratorio Bizalab

✓ **Parámetros fisicoquímicos**

En la Tabla 6-26, se muestra los resultados de parámetros fisicoquímicos para 3 tipos de roca (RE-1, RE-2 y RE-3) del área donde se emplaza el depósito de relaves Enlozada.

Tabla 6-26. Parámetros fisicoquímicos en muestras de roca

Parámetros	Unidad	RE-1	RE-2	RE-3
pH	Unidades de pH	8,61	9,23	8,11
Cloruros	mg/kg	22	96	290
Sulfatos	mg/kg	1700	100	4600
Sulfuros	mg/kg	200	400	400

Fuente: Informes de ensayo N.º SAA-18/01005 AGQ / MA181100142 J. Ramón

✓ **Metales**

En la Figura 6-141 se presenta las concentraciones de metales obtenidas en 3 tipos de roca RE-1, RE-2 y RE-3.

La muestra RE-1 presentó mayores concentraciones de calcio, aluminio, hierro, magnesio, potasio, sodio y titanio; en comparación al arsénico, bario, cobalto, cromo, cobre, mercurio, litio, manganeso, fósforo, plomo, silicio, estroncio, vanadio y zinc (Figura 6-141 a).

La muestra RE-2 presentó las mayores concentraciones de hierro, aluminio, calcio, magnesio, potasio, sodio y titanio; en comparación al bario, cobalto, cromo, cobre, mercurio litio, manganeso, fósforo, silicio, estroncio, vanadio y zinc (Figura 6-141 b).

La muestra RE-3 presentó las mayores concentración de calcio, aluminio, magnesio, hierro, potasio, sodio y titanio; en comparación al boro, bario, cobalto, cromo, cobre, litio, manganeso, níquel, fósforo, plomo, silicio, estroncio, vanadio y zinc (Figura 6-141 c).

Cabe precisar que los demás elementos no mencionados se encuentran por debajo del límite de detección del método del laboratorio.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

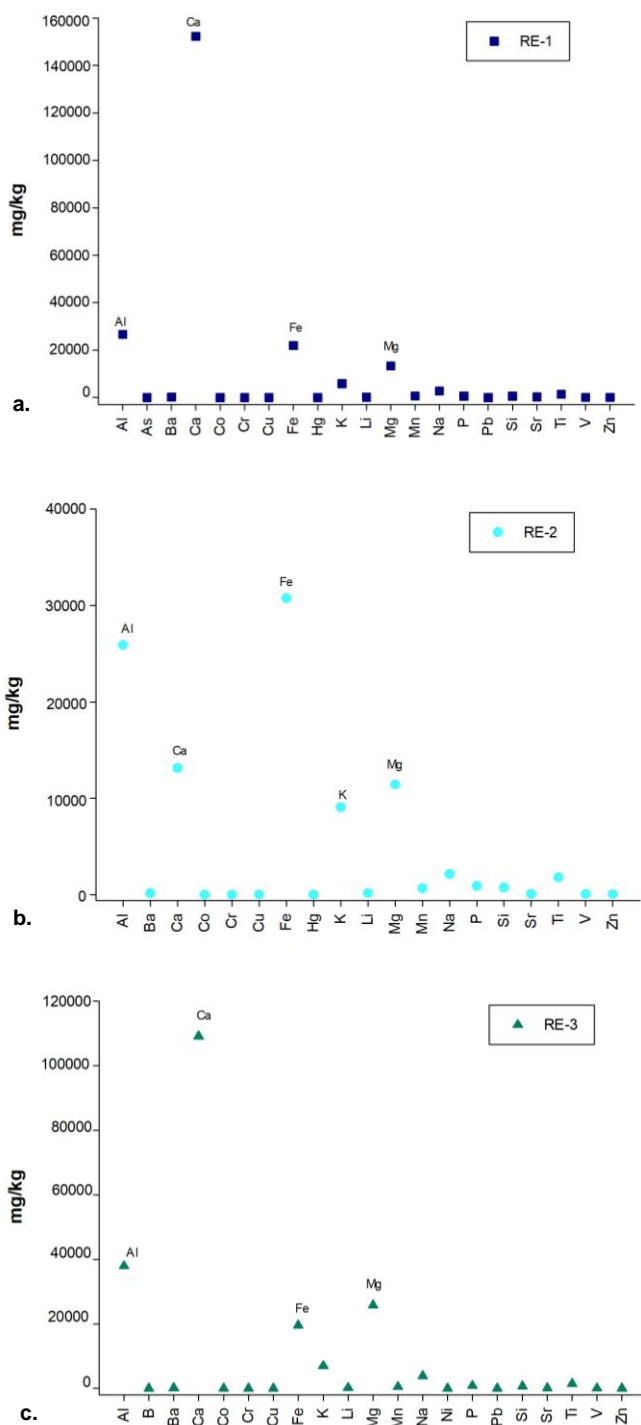


Figura 6-141. Metales en muestras de roca de la zona I: **a.** RE-1, **b.** RE-2 y **c.** RE-3

✓ Lixiviación de metales - SPLP

En la Figura 6-142a se muestra que a las condiciones de la prueba SPLP en la roca RE-1 se lixivian principalmente el calcio, azufre, potasio, sílice y sodio en comparación al aluminio, bario, estroncio, magnesio, manganeso.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

En la Figura 6-142b se muestra que la roca RE-2 lixivia principalmente sílice, potasio, calcio y sodio en comparación al aluminio, bario, estroncio, hierro, magnesio, titanio y vanadio.

La Figura 6-142c, muestra que la roca RE-3 lixivia principalmente calcio, azufre, sodio y potasio en comparación al aluminio, bario, boro, estroncio, magnesio, molibdeno, selenio y silice.

Cabe precisar que los demás analitos no mencionados se encuentran por debajo del límite de detección del método del laboratorio.

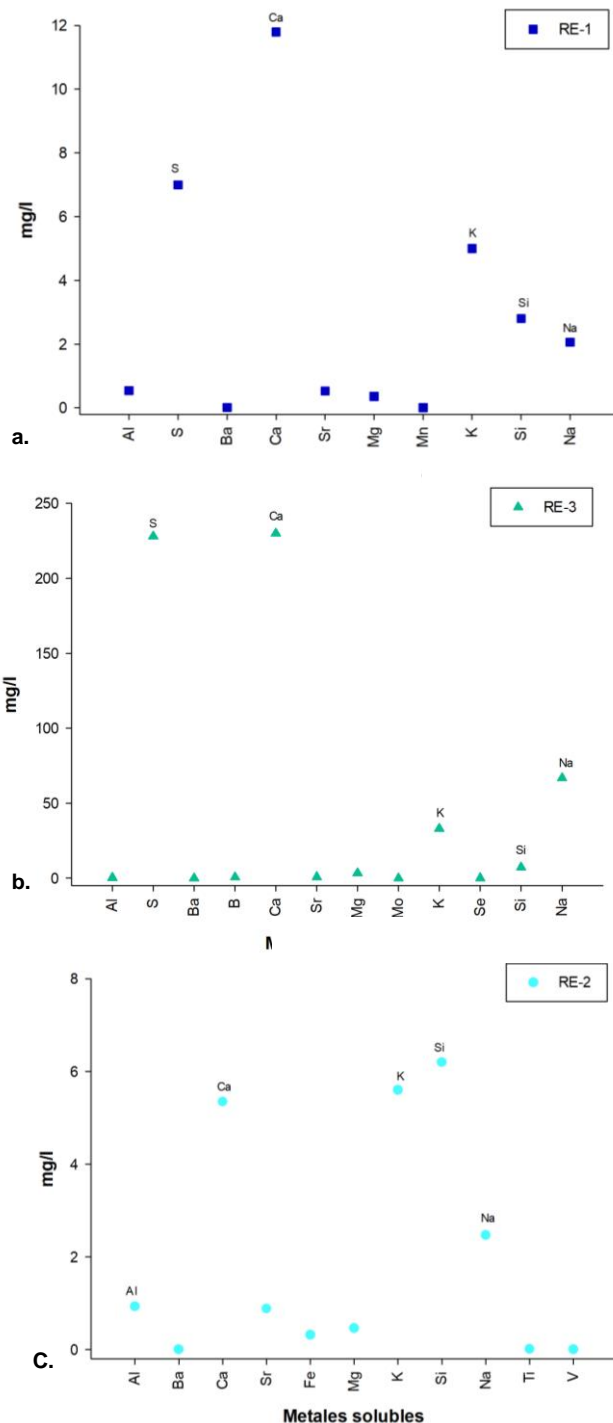


Figura 6-142. Prueba de lixiviación de metales solubles SPLP en muestras de roca: **a.** RE-1, **b.** RE-2 y **c.** RE-3



✓ Biodisponibilidad de metales - Tessier

En cuanto a la determinación de biodisponibilidad de metales, en la Figura 6-143, se observó que, la muestra RE-1 presentó cobre asociado a la fracción 1 (intercambiable). En cuanto a los analitos que se encontraron en la fracción 2 (enlazados a carbonatos) y en la fracción 3 (enlazados a oxi-hidróxidos de Fe y Mn) se tuvo al hierro, níquel y manganeso. Asimismo, en la fracción 4 (enlazada a materia orgánica) se registró cobalto, hierro, níquel, manganeso y zinc.

La muestra RE-2 presentó hierro, níquel y manganeso asociado a las fracciones 2 (enlazados a carbonatos), fracción 3 (enlazados a oxi-hidróxidos de Fe y Mn) y fracción 4 (enlazada a materia orgánica), adicionalmente, cobre en la fracción 3.

La muestra RE-3 presentó manganeso asociado a la fracción 2 (enlazados a carbonatos). Asimismo, en la fracción 3 (enlazados a oxi-hidróxidos de Fe y Mn) presentó cobre, cobalto, hierro, manganeso y níquel, y en la fracción 4 (enlazada a materia orgánica) hierro, manganeso y níquel.

En cuanto a la fracción 5 (minerales primarios y secundarios) en todas las muestras se encontró todos los metales que forman parte de la metodología de Tessier, excepto el cadmio, que se encontró por debajo del límite de detección del método del laboratorio (Figura 6-143).

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»



Figura 6-143. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras de roca de la Zona I

✓ **Generación de acidez - ABA**

De acuerdo a los resultados de la prueba estática de balance ácido-base (ABA) para definir la generación de acidez de los afloramientos rocosos, la muestra RE-2, según el primer criterio se encontró en la zona de incertidumbre, en tanto, que las muestras RE-1 y RE-3, no son generadoras de acidez (Figura 6-144). Mientras que, según el segundo criterio de análisis todas las muestras de roca (RE-1, RE-2 y RE-3) no son generadoras de acidez (Figura 6-145).



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

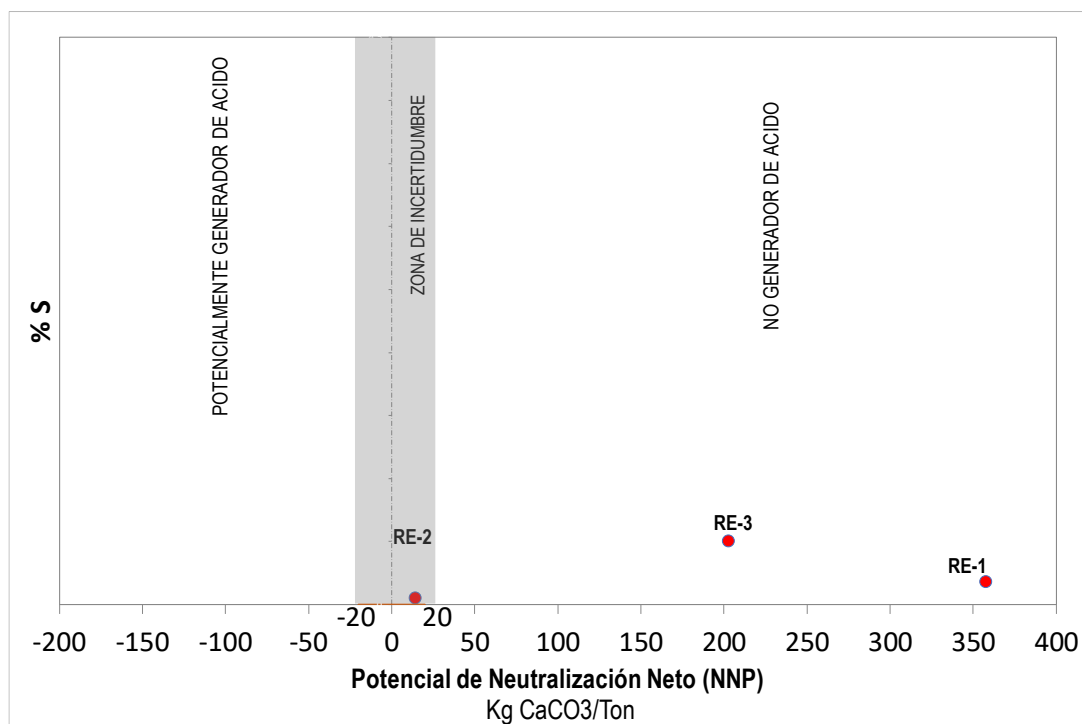


Figura 6-144. Prueba ABA en muestras de roca de la zona I (primer criterio)

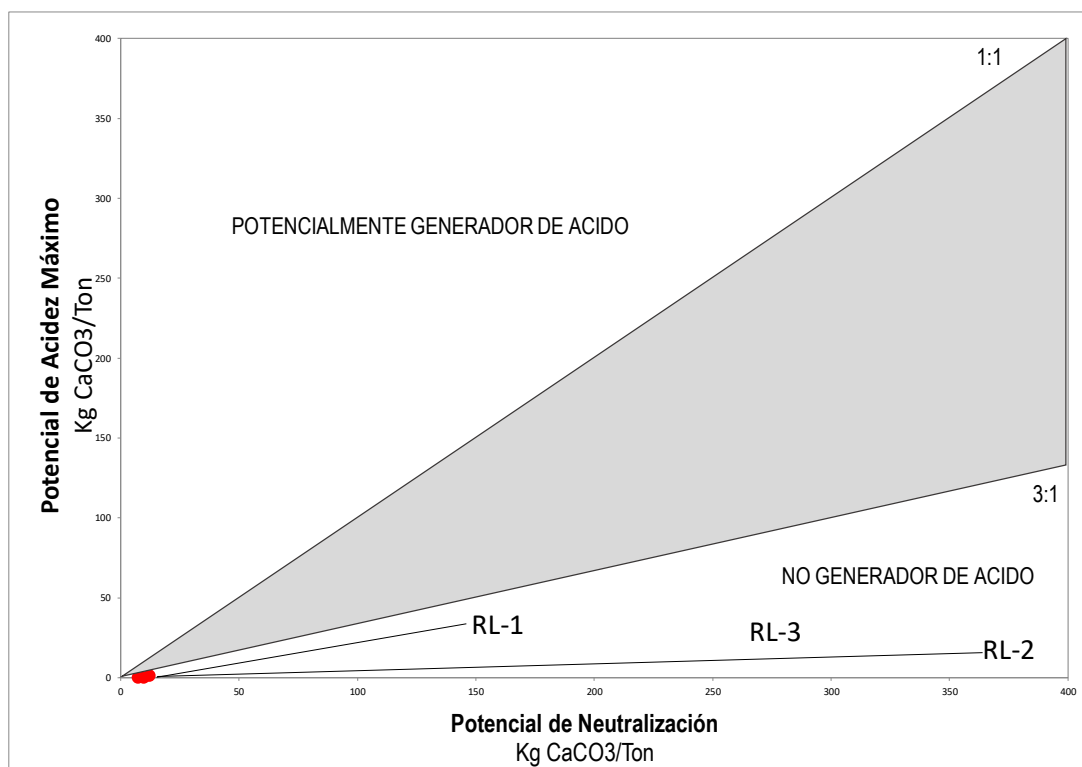


Figura 6-145. Prueba ABA en muestras de roca de la zona I (segundo criterio)

✓ Lixiviación de aniones - SFE

En la Tabla 6-27, se muestra los resultados de la prueba SFE, prueba de lixiviación para determinar aniones fácilmente solubles a pH neutro, para los 3 tipos de roca (RE-1, RE-2 y RE-3), del área donde se emplaza el depósito de relaves Enlozada.

Tabla 6-27. Prueba SFE en muestras de roca de la zona I

Parámetros	Unidad	RE-1	RE-2	RE-3
Bromuros	mg/l	<0,013	<0,013	<0,013
Cloruros	mg/l	6,424	32,19	102,2
Fluoruros	mg/l	0,354	0,623	2,090
Fosfatos	mg PO ₄ -P/l	25,50	2,896	0,293
Nitratos	mg NO ₃ -N/l	0,238	1,030	0,366
Nitritos	mg NO ₂ -N/l	0,0026	0,0073	0,0006
Sulfatos	mg/l	23,52	19,81	12,93

Fuente: Informe de ensayo N.º MA18100141-J Ramón

6.3.3.2 Zona II: Depósito de relaves Linga

La roca RL-1 corresponde a una monzodiorita ferromagnesiana, macroscópicamente posee coloración gris rosáceo, grano grueso e inequigranular, textura fanerítica, aspecto masivo, moderado fracturamiento mostrada en la Figura 6-146.



Figura 6-146. Muestra de mano de la monzodiorita ferromagnesiana tomada del estribo derecho del depósito de relaves Linga

De los resultados mineralógicos, presentó mayor porcentaje de plagioclasa tipo andesina, feldespato potásico y cuarzo, y en menor proporción anfíbol, montmorillonita, biotita, clinocloro, talco y yeso, detallados en la Tabla 6-28.

Tabla 6-28. Análisis mineralógico de roca caliza (RL-1)

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado (%)
Plagioclasa (Andesina)	(Ca,Na)(Al,Si) ₄ O ₈	47
Feldespato - K (Ortoclasa)	KAlSi ₃ O ₈	19
Cuarzo	SiO ₂	18
Anfíbol (Actinolita)	Ca ₂ (Mg,Fe) ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	6
Montmorillonita	(Na,Ca) _{0,3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·n(H ₂ O)	3
Mica (Biotita)	K(Mg,Fe) ₃ [AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂]	2
Clorita (Clinocloro)	(Mg,Fe) ₅ Al(Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₈	2
Talco	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	< L.D.
Yeso	CaSO ₄ ·2(H ₂ O)	< L.D.

Fuente: Informe de ensayo N.º IL-001MI-731. Laboratorio Bizalab

La muestra RL-2 es una monzodiorita, macroscópicamente posee coloración rosacea, de grano grueso, textura fanerítica, aspecto masivo y moderado fracturamiento (Figura 6-147).



Figura 6-147. Muestra de mano de monzodiorita tomada del estribo derecho del depósito de relaves Linga

En lo referente al porcentaje de minerales que presenta la roca RL-2, la mayor proporción es de plagioclasa, cuarzo, actinolita y ortoclasa, y en menor proporción, biotita, clinocloro y montmorillonita, detallados en la Tabla 6-29.

Tabla 6-29. Análisis mineralógico de monzodiorita (RL-2)

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado (%)
Plagioclasa (Andesina)	$(Ca,Na)(Al,Si)_4O_8$	45
Cuarzo	SiO_2	17
Feldespato - K (Ortoclasa)	$KAlSi_3O_8$	14
Anfíbol (Actinolita)	$Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	15
Mica (Biotita)	$K(Mg,Fe)_3[AlSi_3O_{10}(OH,F)_2]$	2
Clorita (Clinocloro)	$(Mg,Fe)_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$	3
Montmorillonita	$(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot n(H_2O)$	2

Fuente: Informe de ensayo N.º IL-001MI-731. Laboratorio Bizalab

La roca RL-3 corresponde a una monzonita, cuando la roca está fresca posee un color gris que se torna a pardo por efectos de la oxidación. Normalmente es de grano medio, textura afanítica, masiva y con contenido de trazas de óxidos de hierro (Figura 6-148).



Figura 6-148. Muestra de mano de monzonita tomado del estribo derecho del depósito de relaves Linga



De acuerdo a los resultados de mineralogía la muestra RL-3, presentó mayor proporción de plagioclasa, cuarzo, actinolita y ortoclasa, y en menor proporción clinocloro, biotita, talco y montmorillonita, mostrados en la Tabla 6-30.

Tabla 6-30. Análisis mineralógico de la roca monzonita (RL-3)

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado (%)
Plagioclasa (Andesina)	$(Ca,Na)(Al,Si)_4O_8$	45
Cuarzo	SiO_2	18
Anfíbol (Actinolita)	$Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	15
Feldespato - K (Ortoclasa)	$KAlSi_3O_8$	14
Clorita (Clinocloro)	$(Mg,Fe)_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$	3
Mica (Biotita)	$K(Mg,Fe)_3[AlSi_3O_{10}(OH,F)_2]$	2
Talco	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	< L.D.
Montmorillonita	$(Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot n(H_2O)$	< L.D.

Fuente: Informe de ensayo N.º IL-001MI-731. Laboratorio Bizalab

✓ **Parámetros fisicoquímicos**

En la Tabla 6-31, se muestra los resultados de parámetros fisicoquímicos para las muestras de roca (RL-1, RL-2 y RL-3) del área donde se emplaza el depósito de relaves Linga.

Tabla 6-31. Parámetros fisicoquímicos en muestras de roca de la zona II

Parámetros	Unidad	RL-1	RL-2	RL-3
pH	Unidades de pH	8,92	8,95	8,66
Cloruros	mg/kg	168	213	265
Sulfatos	mg/kg	100	300	100
Sulfuros	mg/kg	200	100	400

Fuente: Informes de ensayos N.º SAA-18/1002 – AGQ Perú / N.º MA18100140- J Ramón

✓ **Metales**

La Figura 6-149a muestra que la roca RL-1 presentó mayor concentración de hierro, aluminio, magnesio, calcio, potasio, sodio y titanio; en comparación al bario, cobalto, cromo, cobre, litio, manganeso, fósforo, plomo, silicio, estroncio, vanadio y zinc.

La Figura 6-149b muestra que la roca RL-2, presentó mayor concentración de hierro, aluminio, magnesio, calcio, sodio, potasio y titanio; en comparación al bario, cobalto, cromo, cobre, litio, manganeso, mercurio, fósforo, silicio, estroncio, vanadio y zinc.

La Figura 6-149c muestra que muestra la roca RL-3, presentó mayor concentración de hierro, aluminio, calcio, magnesio, potasio, sodio y titanio; en comparación bario, cobalto, cromo, cobre, litio, manganeso, mercurio, fósforo, plomo, silicio, estroncio, vanadio y zinc.

Cabe precisar que los demás analitos no mencionados se encuentran por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

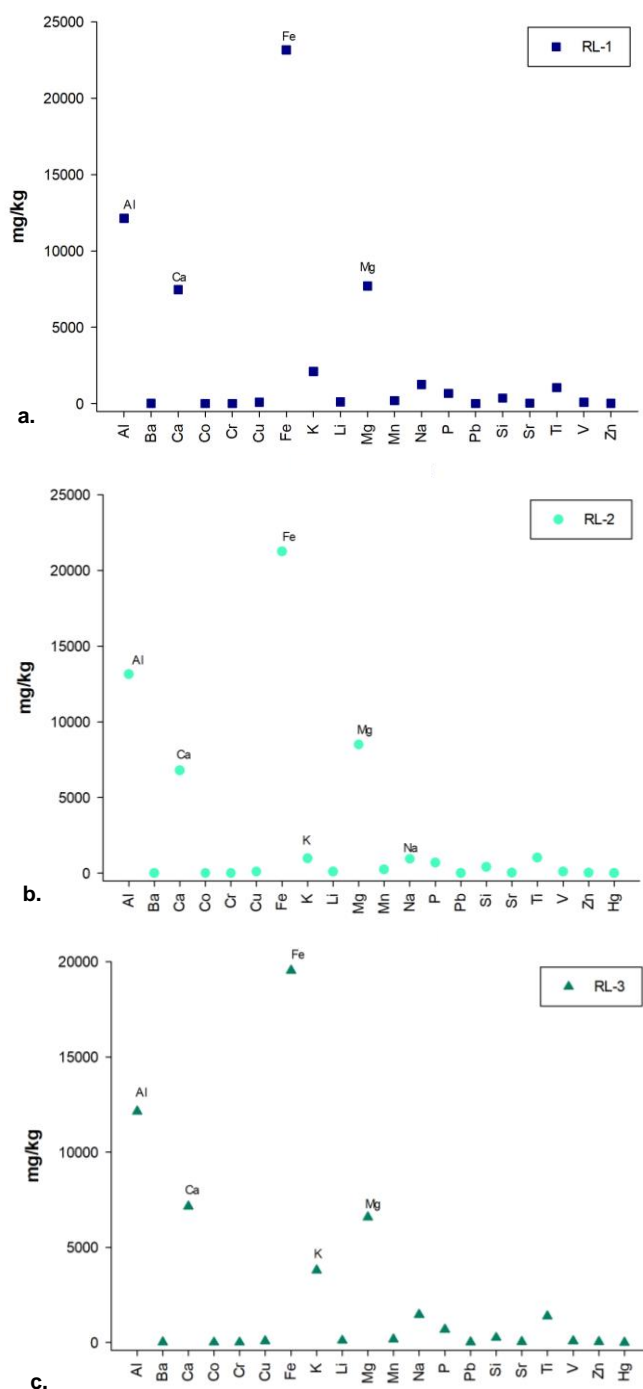


Figura 6-149. Metales en muestras de roca de la zona II

✓ Lixiviación de metales - SPLP

En la Figura 6-150a se muestra que a las condiciones de la prueba SPLP, la roca RL-1 lixivia principalmente sílice, calcio, azufre, sodio y potasio; en comparación al aluminio, magnesio, hierro, bario, cobre, estroncio, manganeso, titanio y vanadio.

En la Figura 6-150b se muestra que la roca RL-2 lixivia principalmente sílice, calcio, potasio y sodio; en comparación al aluminio, magnesio, estroncio, boro, hierro y titanio.

La Figura 6-149c muestra que la roca RL-3 lixivia principalmente potasio, calcio, sodio y sílice; en comparación al aluminio, magnesio, estroncio, hierro y titanio.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Cabe precisar que, los demás analitos no mencionados fueron reportados por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio.

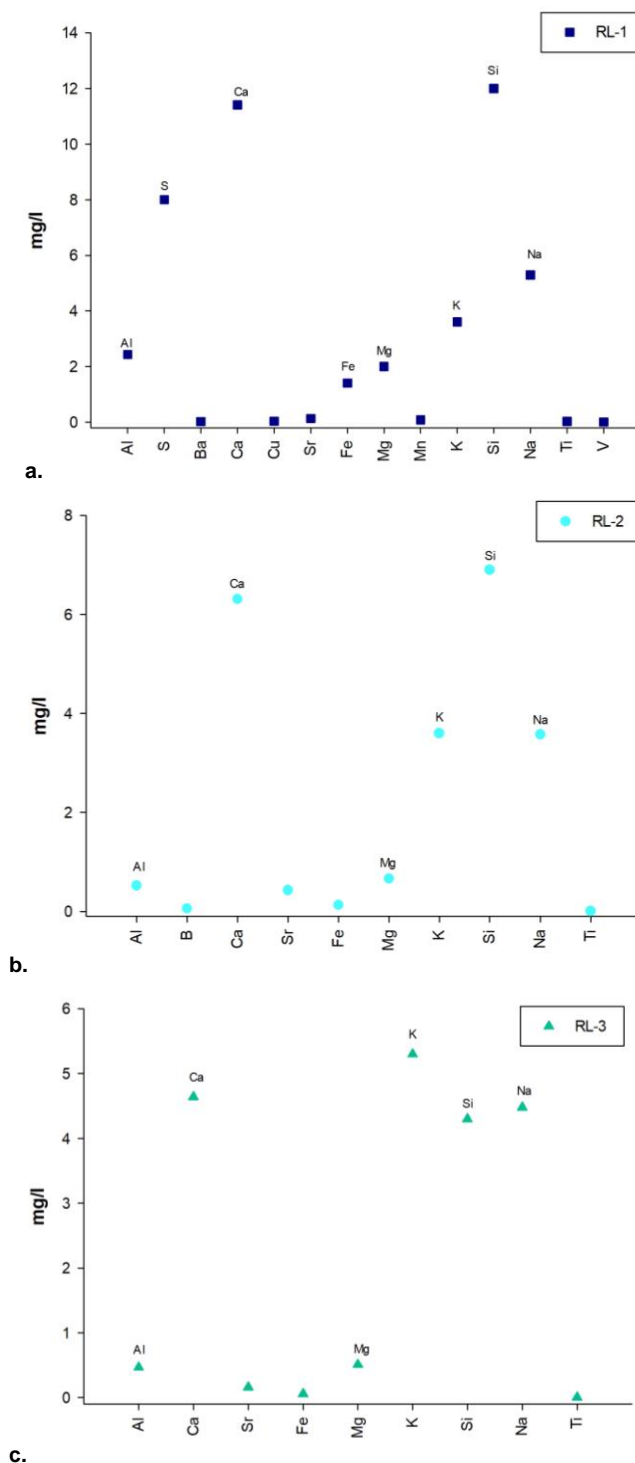


Figura 6-150. Prueba de lixiviación de metales SPLP en muestras de roca **a.** RL-1, **b.** RL-2 y **c.** RL-3

✓ Biodisponibilidad de metales - Tessier

En cuanto a la determinación de biodisponibilidad de metales, en la Figura 6-151 se observó que, la muestra RL-1 presentó concentraciones de cobre, hierro y manganeso asociadas a la fracción 2 (enlazados a carbonatos). Asimismo, el hierro, manganeso y



níquel se encontraron en la fracción 3 (enlazados a oxi-hidróxidos de Fe y Mn) y fracción 4 (enlazada a materia orgánica), adicionalmente, el cobre se encontró en la fracción 3.

La muestra RL-2 presentó concentraciones de cobre, hierro y manganeso asociadas a la fracción 2 (enlazados a carbonatos). Asimismo, en la fracción 3 (enlazados a oxi-hidróxidos de Fe y Mn) y fracción 4 (enlazada a materia orgánica) se registraron concentraciones de cobre, hierro, manganeso y níquel.

La muestra RL-3, presentó concentraciones de hierro asociadas a la fracción 1 (intercambiable). En las fracciones 2 (enlazados a carbonatos), 3 (enlazados a oxi-hidróxidos de Fe y Mn) y 4 (enlazada a materia orgánica) se registraron concentraciones de cobre, hierro, manganeso y níquel.

En cuanto a la fracción 5 (minerales primarios y secundarios) se encontraron todos los metales que forman parte de la metodología de Tessier, excepto el cadmio, que se encontró por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio (Figura 6-151).



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»



Figura 6-151. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras de roca de la zona II

✓ **Generación de acidez - ABA**

De acuerdo a los resultados de la prueba ABA para definir la generación de acidez de los afloramientos rocosos. Las muestras RL-1, RL-2 y RL-3 según el primer criterio se encontraron en la zona de incertidumbre (Figura 6-152). Mientras que, según el segundo criterio, todas las muestras de roca no son generadoras de acidez (Figura 6-153).



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

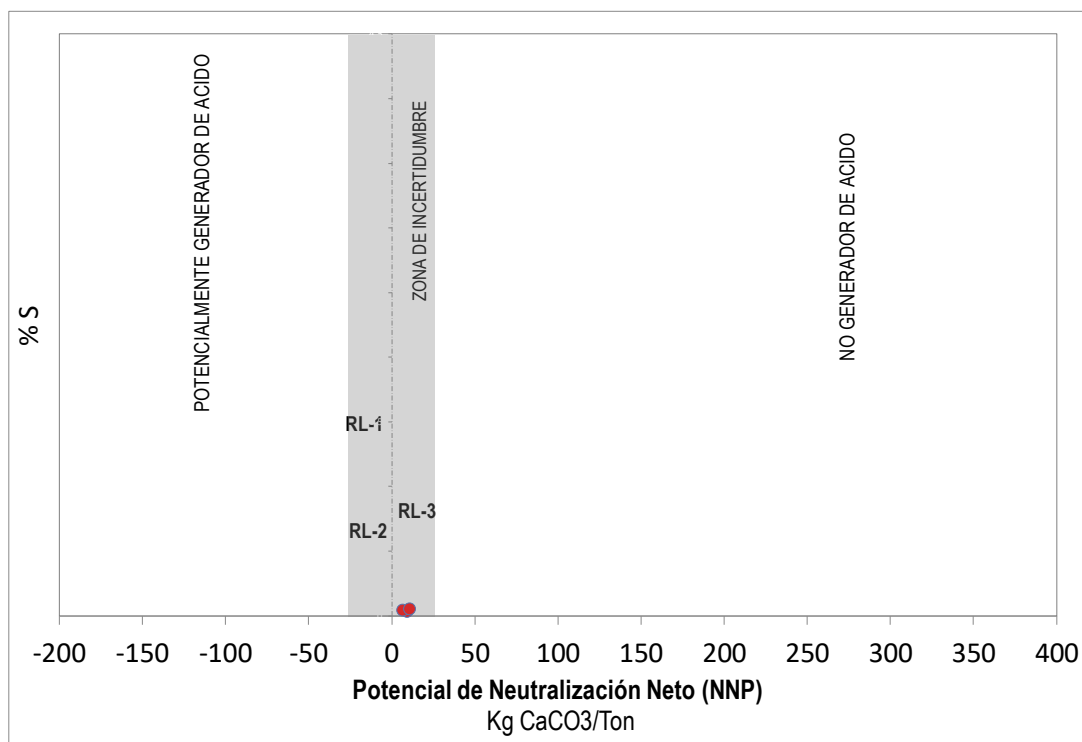


Figura 6-152. Prueba ABA en muestras de roca de la zona II (primer criterio)

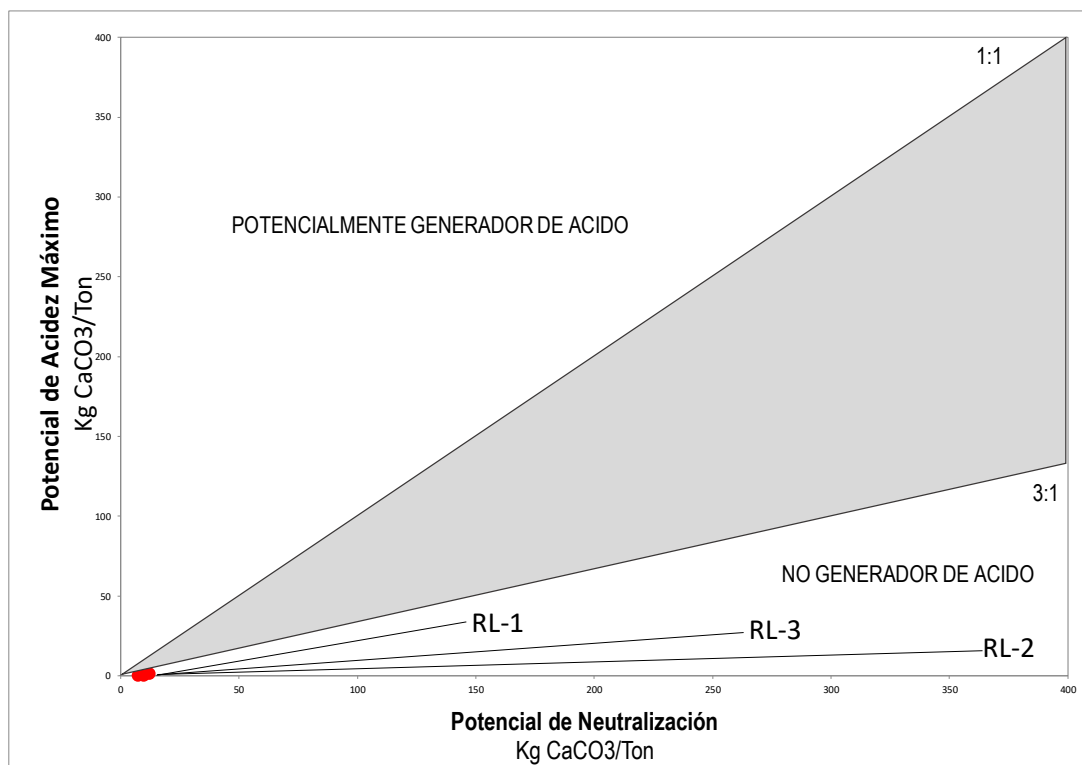


Figura 6-153. Prueba ABA en muestras de roca de la zona II (segundo criterio)

✓ **Lixiviación de aniones - SFE**

En la Tabla 6-32 se muestra los resultados de la prueba SFE, prueba de lixiviación para determinar aniones fácilmente solubles a pH neutro, para las muestras de roca (RL-1, RL-2 y RL3) del área donde se emplaza el depósito de relaves Linga.

Tabla 6-32. Prueba SFE en muestras de roca de la zona II

Parámetros	Unidad	RL-1	RL-2	RL-3
Bromuros	mg/l	<0,013	<0,013	<0,013
Cloruros	mg/l	65,2	64,61	95,6
Fluoruros	mg/l	2,482	1,492	1,296
Fosfatos	mg PO ₄ -P/l	4,164	0,604	0,751
Nitratos	mg NO ₃ -N/l	0,103	1,656	0,192
Nitritos	mg NO ₂ -N/l	0,0012	0,013	0,0019
Sulfatos	mg/l	9,908	13,87	24,85

Fuente: Informe de ensayo N.º MA18100141 J. Ramón

6.3.4 Caracterización de componentes mineros

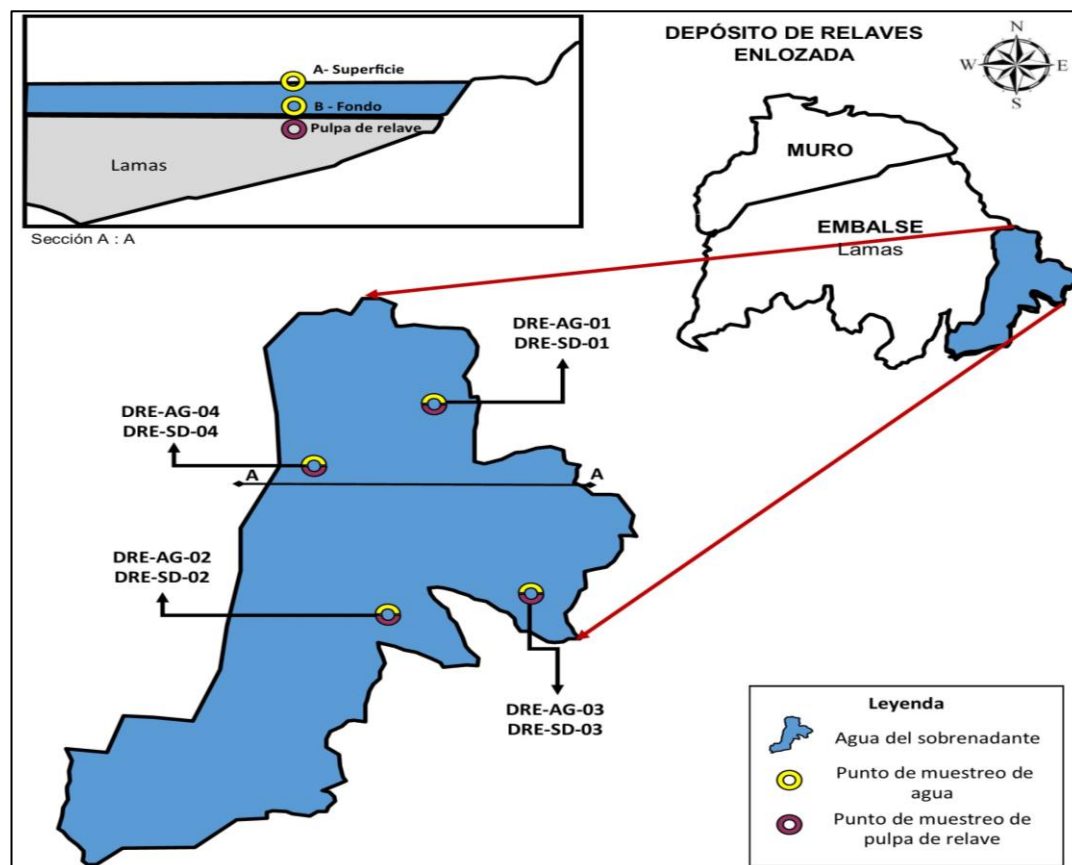
Se realizó la caracterización de los principales componentes mineros considerados como posibles fuentes de alteración del ambiente, como los depósitos de relaves y los depósitos de desmonte de mina - DDM.

6.3.4.1 Zona I: Depósito de relaves Enlozada

La caracterización comprendió la parte líquida (agua de sobrenadante) y sólida (pulpa de relave) del depósito de relaves, adicionalmente, se caracterizó el agua de recirculación de filtraciones asociadas a este componente.

a) Agua del sobrenadante

Se colectaron 8 muestras, distribuidas 4 en superficie y 4 en fondo (Figura 6-154). A continuación se presentan los resultados de los parámetros de campo y laboratorio obtenidos en los puntos de muestreo, el detalle del mismo se encuentra en el Anexo 3.


Figura 6-154. Distribución de puntos de muestreo de agua del sobrenadante y pulpa de relave del depósito de relaves Enlozada

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

En la Figura 6-155 se observa que los valores de potencial de hidrógeno variaron entre 11,82 unidades de pH y 11,88 unidades de pH. La conductividad eléctrica varió entre 5520 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 5690 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Las concentraciones de cloruros fluctuaron entre 366 mg/l y 413,7 mg/l, y los sulfatos variaron entre 1652 mg/l y 1906 mg/l.



Figura 6-155. Parámetros fisicoquímicos en el depósito de relaves Enlozada: **a.** potencial de hidrógeno, **b.** conductividad eléctrica, **c.** cloruros y **d.** sulfatos

Los elementos como el calcio, potasio, sodio, silicio, estroncio y molibdeno presentaron las mayores concentraciones en el depósito de relaves Enlozada, en comparación con los demás elementos analizados (Figura 6-156). Cabe destacar que el berilio, bismuto, cadmio, cobalto, mercurio, litio, níquel, fósforo, estaño, talio y uranio presentaron en su mayoría concentraciones por debajo del límite de detección del método del laboratorio.

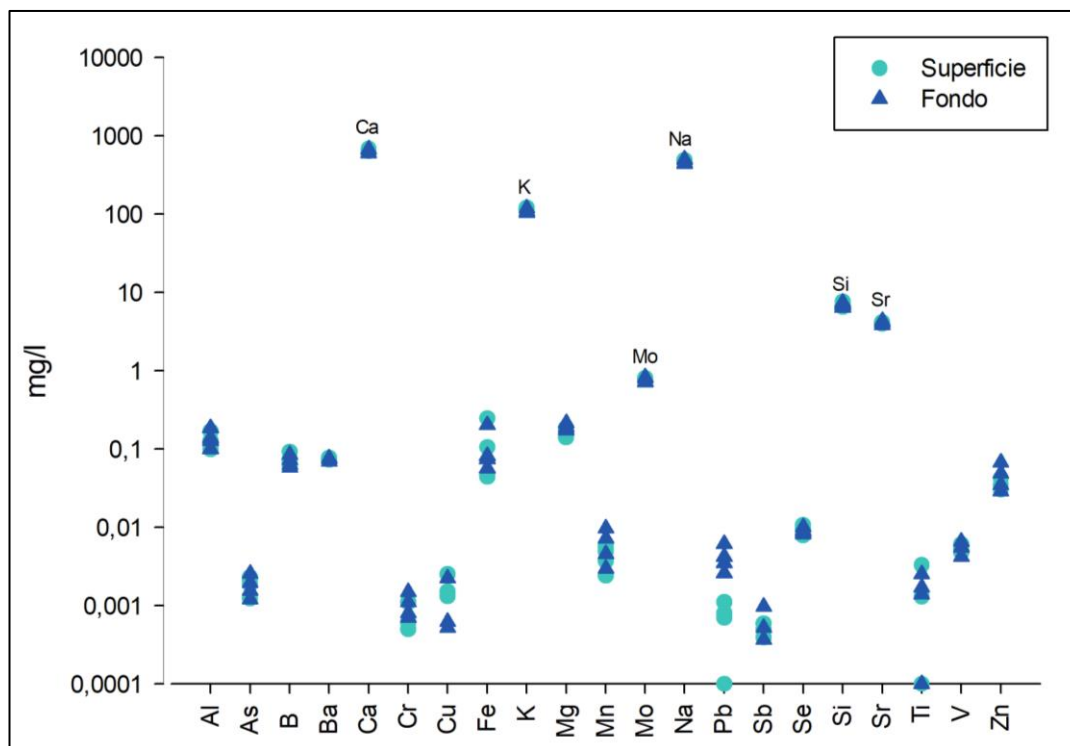


Figura 6-156. Metales en agua del sobrenadante del depósito de relaves Enlozada

b) Fracción fina (pulpa de relave)

En las muestras de pulpa de relave DRE-SD-01, DRE-SD-02, DRE-SD-03 y DRE-SD-04 (Figura 6-154), se realizó el análisis de parámetros fisicoquímicos (pH, cloruros, sulfatos, sulfuros), metales y mineralógico, así como pruebas de biodisponibilidad y lixiviación de metales y aniones.

✓ Parámetros fisicoquímicos

En la Tabla 6-33, se presenta los resultados de parámetros fisicoquímicos para las muestras DRE-SD-01, DRE-SD-02, DRE-SD-03 y DRE-SD-04 del depósito de relaves Enlozada.

Tabla 6-33. Parámetros fisicoquímicos en pulpa de relave (fracción fina)

Parámetros	Unidad	DRE-SD-01	DRE-SD-02	DRE-SD-03	DRE-SD-04
pH	Unidades de pH	8,60	8,56	8,60	8,60
Cloruros	mg/kg	552	366	597	406
Sulfatos	mg/kg	5800	5400	6800	8900
Sulfuros	mg/kg	6900	sd	4900	sd

sd: Sin dato

Fuente: Informes de ensayo N.º SAA-18/00919, SAA-18/00920 AGQ, MA18100142 J. Ramón

✓ Metales

La Figura 6-157, muestra la mayor abundancia de hierro, aluminio, calcio, magnesio y potasio en comparación al arsénico, bario, cobalto, cromo, cobre, litio, manganeso, molibdeno, mercurio, sodio, fósforo, plomo, silicio, estroncio, titanio, vanadio y zinc.

Cabe precisar que los demás analitos no mencionados se encontraron por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio.

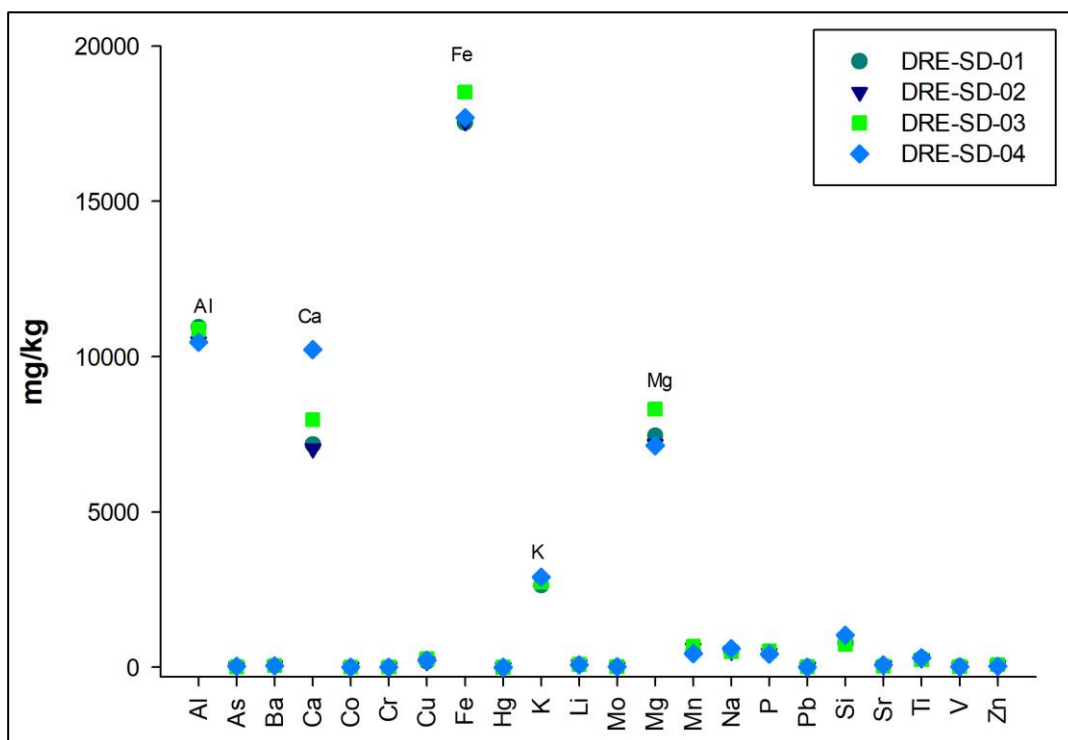


Figura 6-157. Metales en pulpa de relave del depósito de relaves Enlozada

✓ Análisis mineralógico

De los resultados mineralógicos, presentó mayor porcentaje el cuarzo, plagioclasa tipo anortina y mica, y en menor proporción feldespato, caolinita, montmorillonita, clorita y piritita, detallados en la Tabla 6-34.

Tabla 6-34. Análisis mineralógico en pulpa de relave del depósito de relaves Enlozada (DRE-SD-02)

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado (%)
Cuarzo	SiO_2	35
Plagioclasa (Anortita)	$(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$	26
Mica (Muscovita)	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2]$	21
Feldespato – K (Ortoclasa)	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	7
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	3
Montmorillonita	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$	3
Clorita (Clinocoro)	$(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	2
Piritita	FeS_2	< L.D.

Fuente: Informe de ensayo IL-001MI-733 Bizalab

✓ Biodisponibilidad de metales - Tessier

En la Figura 6-158, se observa que la pulpa de relave presentó concentraciones de cobre, hierro y plomo asociadas a la fracción 1 (intercambiable). En cuanto a los analitos que se encontraron en la fracción 2 (enlazados a carbonatos) y 3 (enlazados a oxihidróxidos de Fe y Mn) se tuvo al cobre, cobalto, hierro, manganeso, níquel y zinc; y sólo plomo en la fracción 3. En la fracción 4 (enlazada a materia orgánica) se registró cobre, cobalto, hierro, manganeso y zinc.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

En lo referente a la fracción 5 (minerales primarios y secundarios) se encontraron concentraciones de todos los metales que forman parte de la metodología de Tessier, a excepción del cadmio, que se encontró por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio (Figura 6-158).



Figura 6-158. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras de la zona I

✓ Lixiviación de metales - SPLP

En la Figura 6-159, se muestra que a las condiciones de la prueba SPLP, los metales de las muestras de pulpa de relave que lixiviaron principalmente fueron calcio, azufre, sodio y potasio; en comparación al aluminio, bario, boro, estroncio, magnesio, manganeso, molibdeno, plomo y sílice. Cabe precisar que los demás analitos no

mencionados se encontraron por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio.

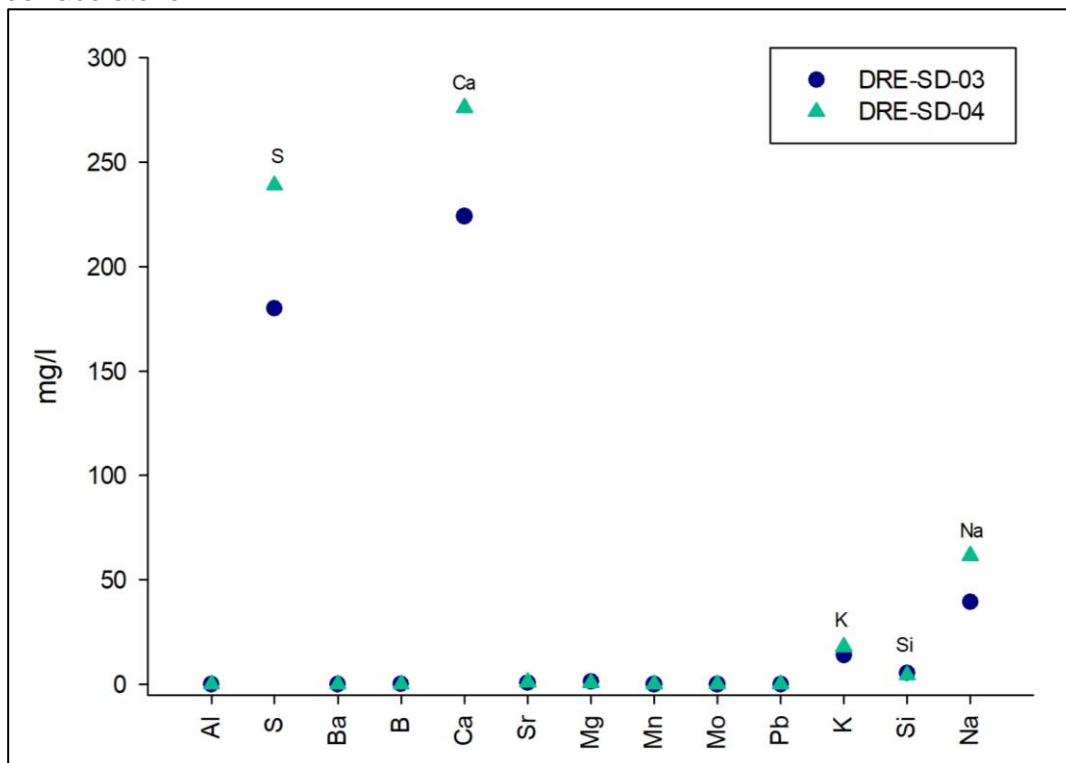


Figura 6-159. Prueba de lixiviación de metales SPLP en muestras del depósito de relaves Enlozada – zona I

✓ Lixiviación de aniones - SFE

En la Tabla 6-35 se muestra los resultados de la prueba SFE, prueba de lixiviación para determinar aniones fácilmente solubles a pH neutro, para muestras de relave DRE-SD-03 y DRE-SD-04 del depósito Enlozada.

Tabla 6-35. Prueba SFE en muestras de relave de la zona I

Parámetros	Unidad	DRE-SD-03	DRE-SD-04
Bromuros	mg/l	<0,013	<0,013
Cloruros	mg/l	205,1	186,8
Fluoruros	mg/l	0,987	1,46
Fosfatos	mg PO ₄ -P/l	28,24	40,55
Nitratos	mg NO ₃ -N/l	0,537	0,931
Nitritos	mg NO ₂ -N/l	<0,0005	0,0156
Sulfatos	mg/l	1756	1679

Fuente: Informe de ensayo N.º MA18100141 J. Ramón

c) Aguas de recirculación de filtraciones

Se caracterizó el agua de recirculación proveniente de las filtraciones del depósito de relaves Enlozada, correspondientes a las muestras F-03, F-14 y F-25.

En la Figura 6-160 se observa que los valores de potencial de hidrógeno oscilaron entre 7,19 unidades de pH y 7,69 unidades de pH, la conductividad eléctrica fluctuó entre 3350 µS/cm y 5350 µS/cm. Las concentraciones de cloruros estuvieron en un rango de 363,2 mg/l a 569,6 mg/l, mientras que los sulfatos presentaron concentraciones entre los 1665 mg/l y 2258 mg/l.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

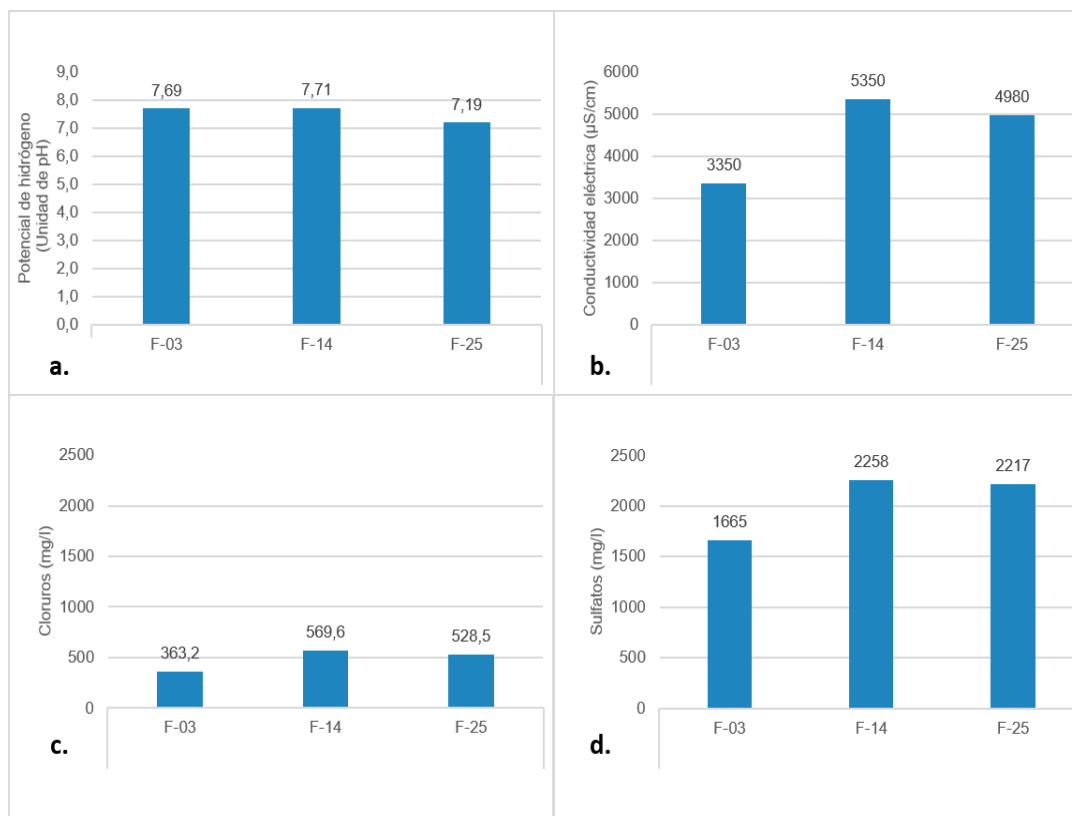


Figura 6-160. Parámetros fisicoquímicos del agua de recirculación de filtraciones del depósito de relaves Enlozada: **a.** Potencial de hidrógeno, **b.** Conductividad eléctrica, **c.** Cloruros y **d.** Sulfatos

Respecto a los metales predominantes en el agua de recirculación de filtraciones se encuentra el calcio, sodio, potasio, magnesio, estroncio, manganeso, boro y molibdeno (Figura 6-161). Cabe precisar que los elementos como el berilio, bismuto, cadmio, cobalto, cromo, mercurio, fósforo, plata, plomo, antimonio, estaño, titanio, talio y zinc presentaron en su mayoría concentraciones por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio.

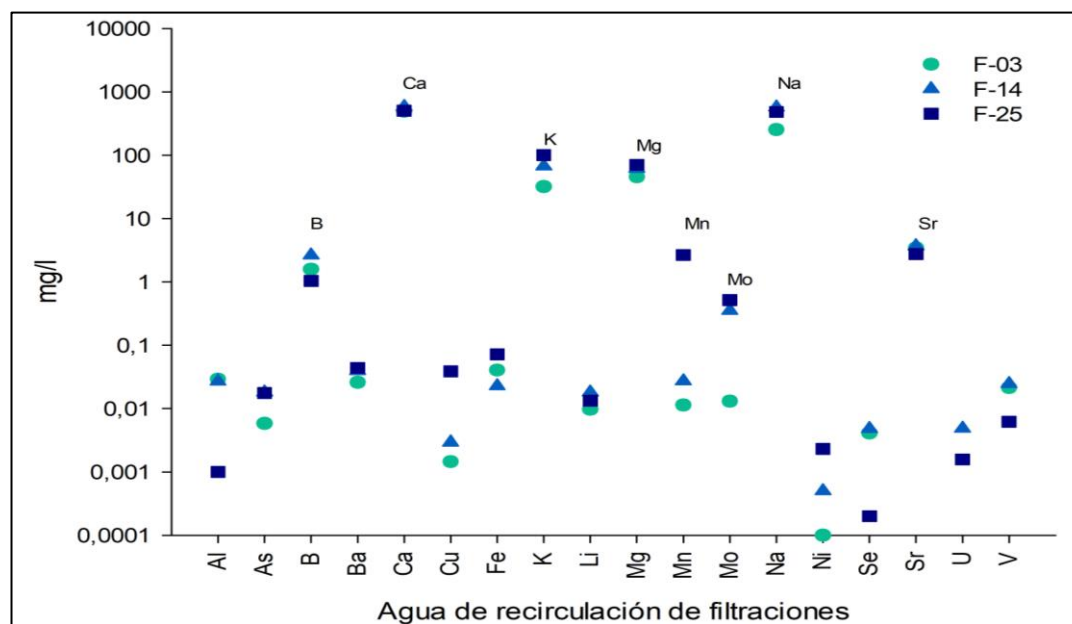


Figura 6-161. Metales en el agua de recirculación de filtraciones del depósito de relaves Enlozada - zona I

6.3.4.2 Zona II: Depósito de relaves Linga

La caracterización comprendió la parte líquida (agua de sobrenadante) y sólida (pulpa de relave), adicionalmente, se caracterizó el agua de recirculación de filtraciones asociadas al depósito de relaves.

a) Agua del sobrenadante

Se colectaron 8 muestras, distribuidas 4 en superficie y 4 en fondo (Figura 6-162). A continuación, se presentan los resultados de los parámetros de campo y laboratorio obtenidos en los puntos de muestreo, el detalle del mismo se encuentra en el Anexo 2.

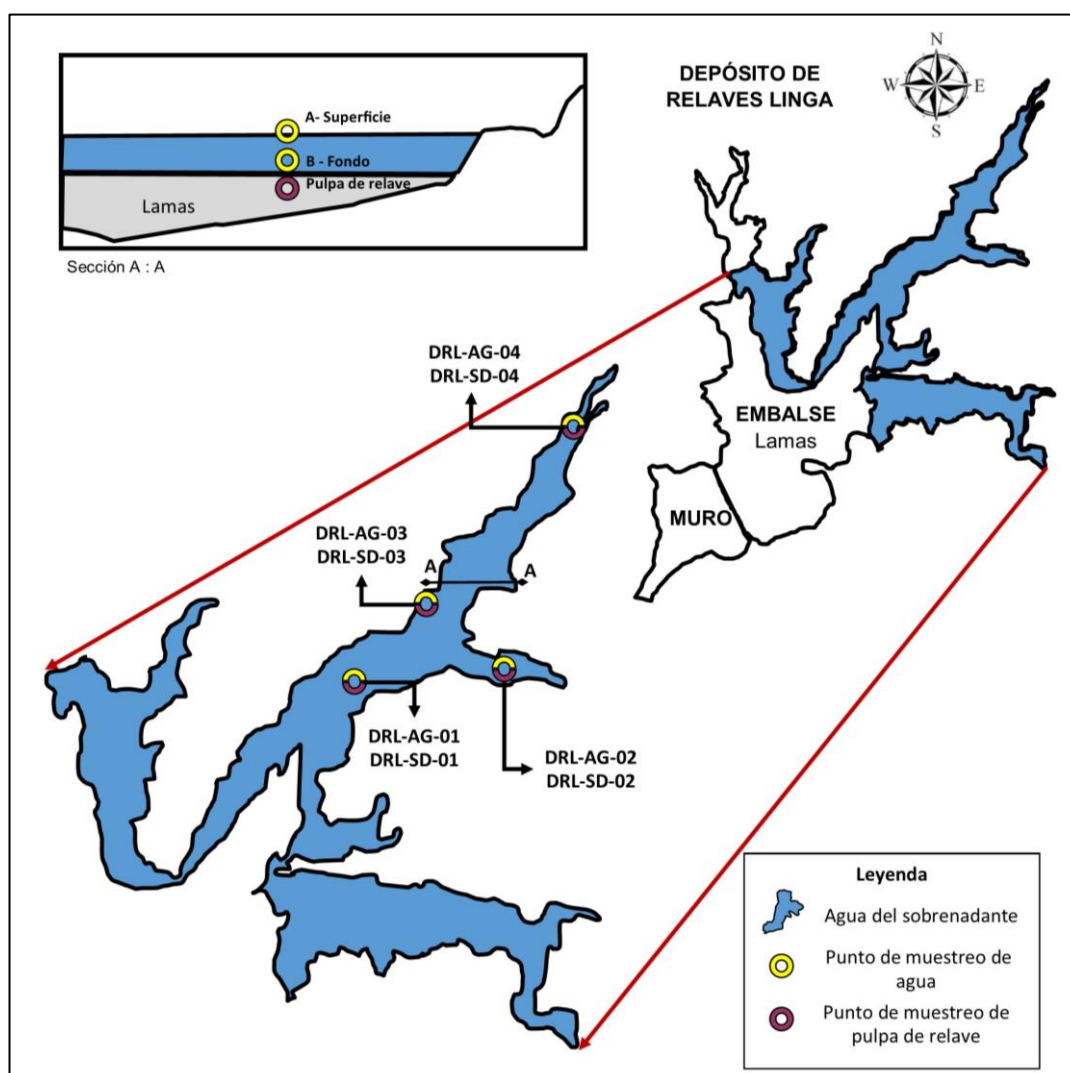


Figura 6-162. Distribución de puntos de muestreo de agua del sobrenadante y pulpa de relave del depósito de relaves Linga - zona II

En la Figura 6-163 se observa que los valores de potencial de hidrógeno variaron entre 10,36 unidades de pH y 10,63 unidades de pH. La conductividad eléctrica varió entre 4170 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 4441 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Las concentraciones de cloruros fluctuaron entre 428,8 mg/l y 447,3 mg/l, y los sulfatos presentaron un rango entre 1699 mg/l y 1778 mg/l.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»



Figura 6-163. Parámetros fisicoquímicos en el depósito de relaves Linga - zona II: **a.** potencial de hidrógeno, **b.** conductividad eléctrica **c.** cloruros y **d.** sulfatos

Los elementos como el calcio, sodio, potasio, silicio, magnesio, estroncio y molibdeno presentaron las mayores concentraciones en el depósito de relaves Linga (Figura 6-164). Cabe destacar que el berilio, bismuto, cadmio, cobalto, mercurio, plata, fósforo, estaño, titanio, talio y uranio presentaron en su mayoría concentraciones por debajo del límite de detección del método del laboratorio.

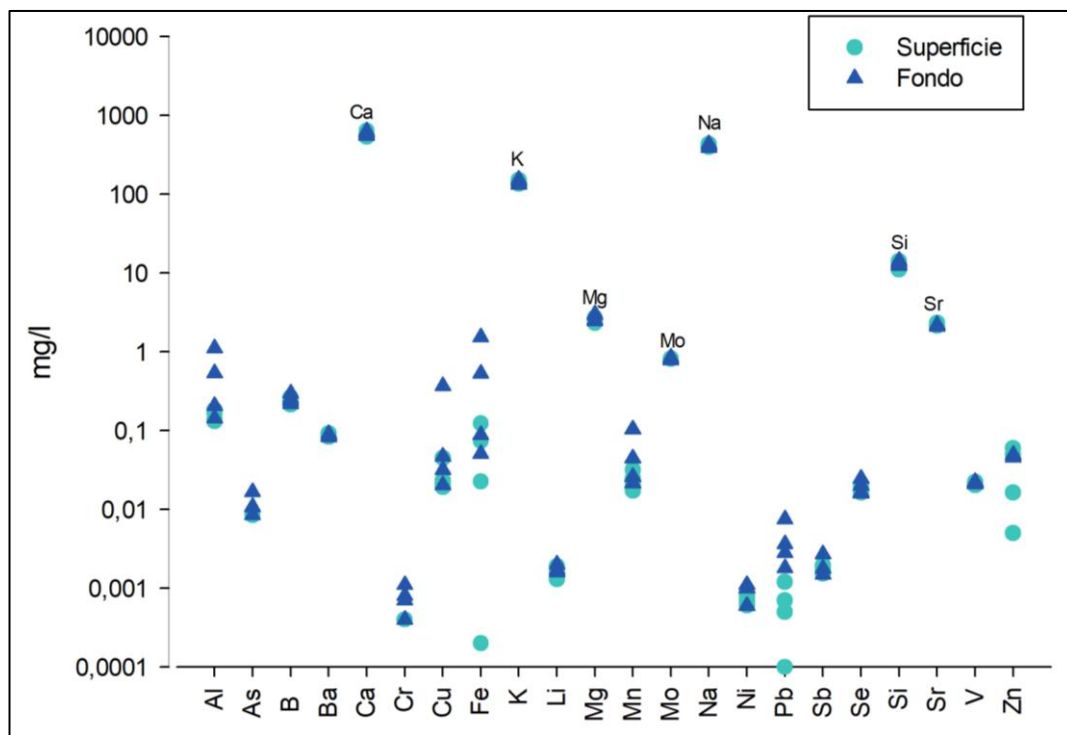


Figura 6-164. Metales en agua del sobrenadante del depósito de relaves Linga – zona II

b) Fracción fina (pulpa de relave)

En las muestras de pulpa de relave DRL-SD-01, DRL-SD-02, DRL-SD-03 y DRL-SD-04 (Figura 6-165) se realizó el análisis de parámetros fisicoquímicos (pH, cloruros, sulfatos, sulfuros), metales y mineralogía, así como, pruebas de biodisponibilidad y lixiviación de metales y aniones.

✓ Parámetros fisicoquímicos

En la Tabla 6-36, se muestra los resultados de parámetros fisicoquímicos para las muestras DRL-SD-01, DRL-SD-02 DRL-SD-03 y DRL-SD-04 de pulpa de relave del depósito Linga.

Tabla 6-36. Parámetros fisicoquímicos en muestras de relave de la zona II

Parámetros	Unidad	DRL-SD-01	DRL-SD-02	DRL-SD-03	DRL-SD-04
pH	Unidades de pH	8,33	8,35	8,40	8,50
Cloruros	mg/kg	482	584	471	406
Sulfatos	mg/kg	6400	6500	6400	6800
Sulfuros	mg/kg	9000	sd	7000	sd

Fuente: Informes de ensayo N.º SAA-18/00919, SAA-18/00920 AGQ, MA18100142 J. Ramón
sd: Sin dato

✓ Metales

Las muestras de relave presentaron mayores concentraciones de hierro, aluminio, calcio, magnesio, potasio y manganeso; en comparación con el arsénico, bario, cobalto, cromo, cobre, molibdeno, mercurio, sodio, litio, plomo, fósforo, silicio, estroncio, titanio

vanadio y zinc (Figura 6-165). Cabe precisar que los demás analitos no mencionados se encontraron por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio.

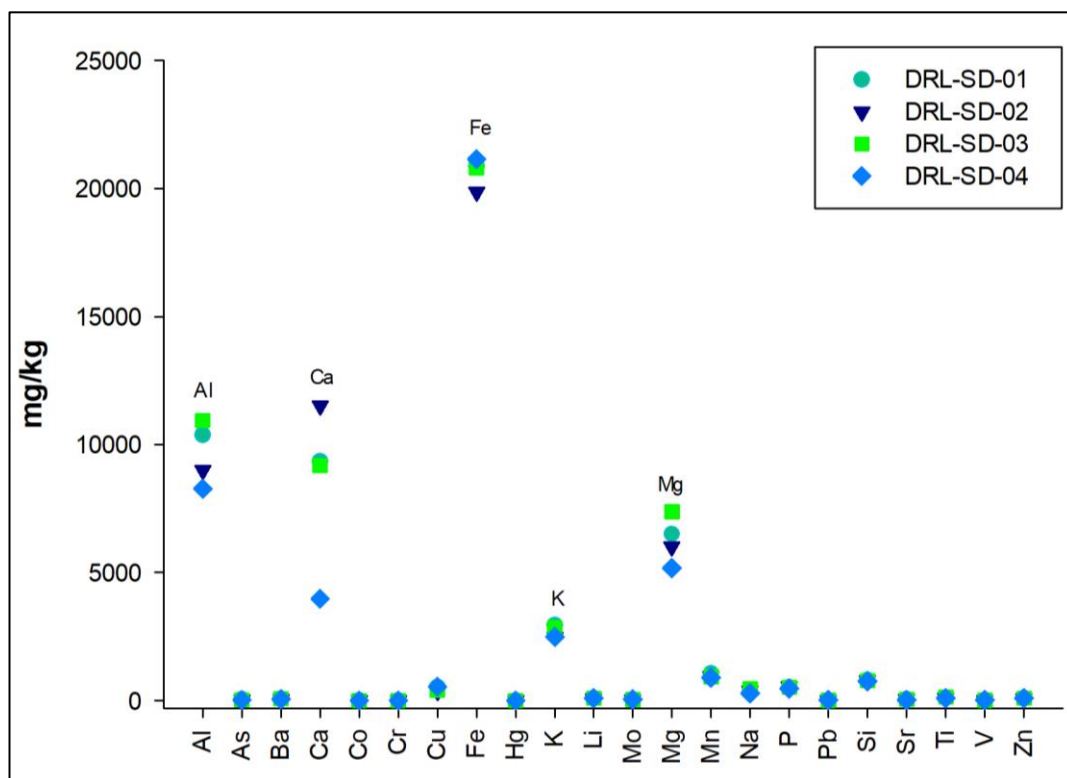


Figura 6-165. Metales en pulpa de relave del depósito de relaves Linga – zona II

✓ Análisis mineralógico

De los resultados mineralógicos, se presentó mayor porcentaje de cuarzo, mica y plagioclasa, y en menor proporción montmorillonita, ortoclasa, pirita, caolinita, clinocloro y calcita, detallados en la Tabla 6-37.

Tabla 6-37. Análisis mineralógico en pulpa de relave del depósito de relaves Linga (DRL-SD-01)

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado (%)
Cuarzo	SiO_2	37
Mica (Muscovita)	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2]$	29
Plagioclasa (Anortita)	$(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$	20
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	2
Montmorillonita	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$	4
Feldespato – K (Ortoclasa)	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	2
Pirita	FeS_2	2
Clorita (Clinocoro)	$(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	<L.D.
Calcita	CaCO_3	<L.D.

Fuente: Informe de ensayo IL-001MI-733 Bizalab

✓ Biodisponibilidad de metales - Tessier

En la Figura 6-165, se observa que el material proveniente del depósito de relave Linga presentó concentraciones de cobre, hierro, manganeso, níquel, plomo y zinc asociadas a la fracción 2 (enlazados a carbonatos). En cuanto a los analitos que se encuentran en la fracción 3 (enlazados a oxi-hidróxidos de Fe y Mn) se tuvo cobre, hierro, manganeso, níquel, plomo y zinc.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

En lo referente a los metales que se encuentran en la fracción 4 (enlazada a materia orgánica) se registraron concentraciones de cobalto, cobre, manganeso, hierro, níquel y zinc. Por otro lado, en la fracción 5 (minerales primarios y secundarios) se encontraron todos los metales que forman parte de la metodología de Tessier, a excepción del cadmio, que presentó concentraciones por debajo del límite de detección del método del laboratorio (Figura 6-166).

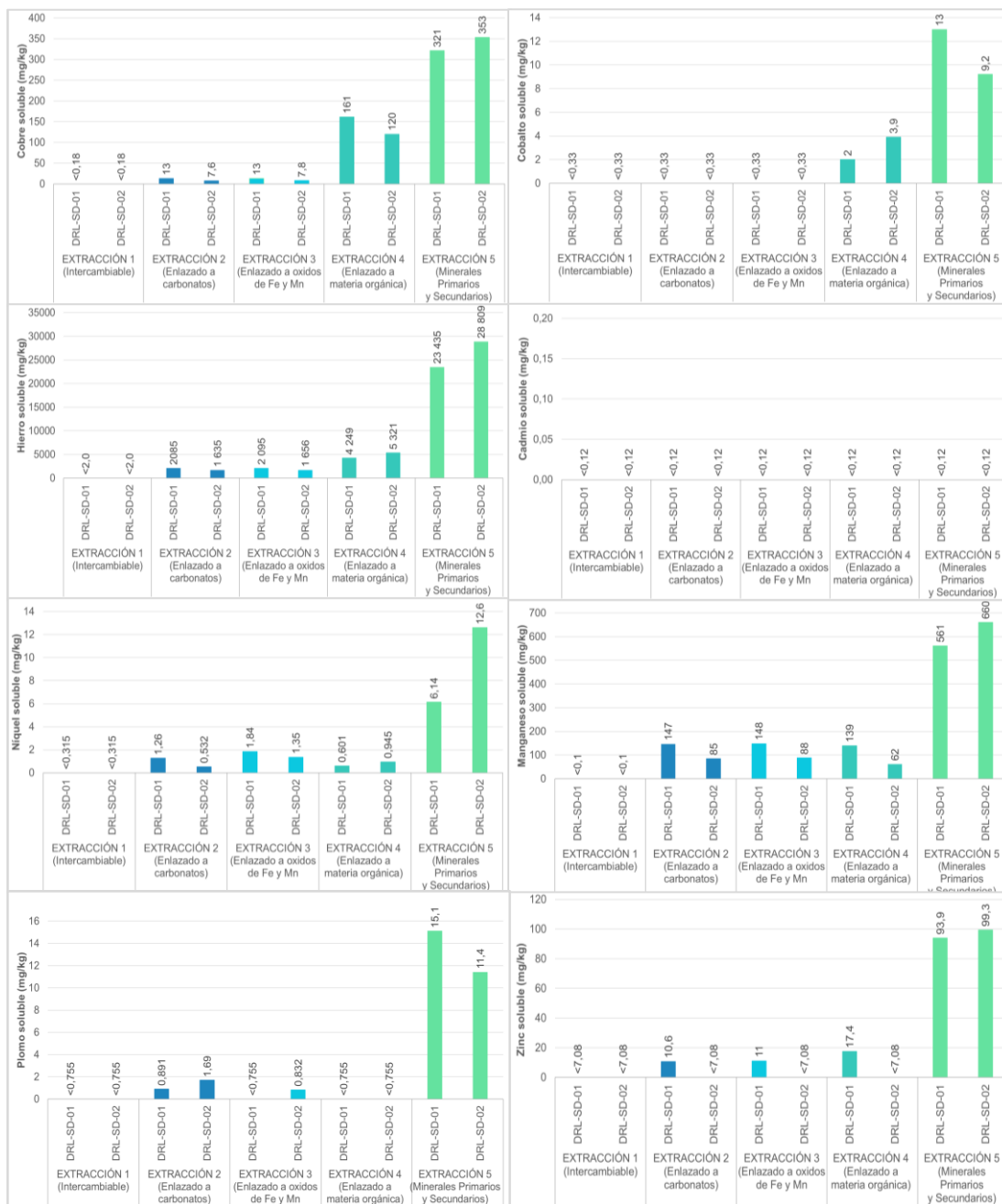


Figura 6-166. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras de la zona II

✓ Lixiviación de metales - SPLP

En la Figura 6-167, se muestra que, a las condiciones de la prueba, los metales de las muestras de relave que lixiviaron fueron principalmente calcio, azufre, sodio y potasio; en comparación al aluminio, bario, boro, cobre, estroncio, hierro, litio, magnesio, manganeso,

molibdeno y sílice. Cabe precisar que los demás analitos no mencionados se encontraron por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio.

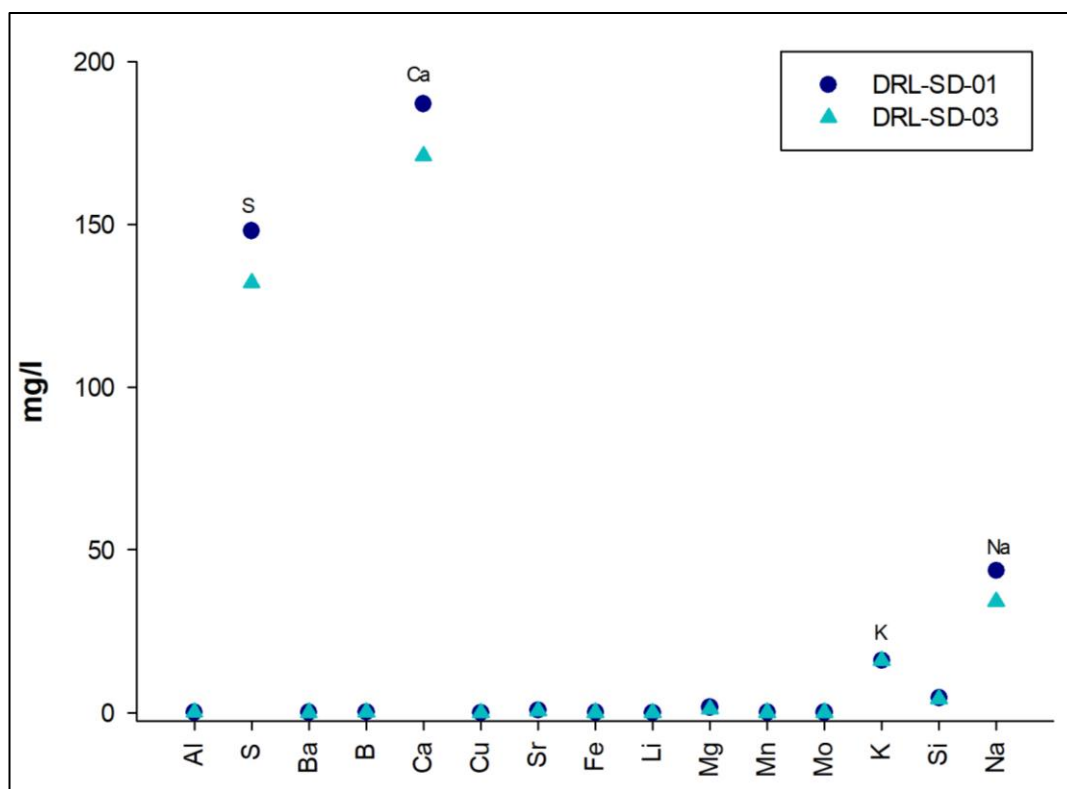


Figura 6-167. Prueba de lixiviación de metales solubles SPLP en muestras del depósito de relaves Linga – zona II

✓ Lixiviación de aniones - SFE

En la Tabla 6-38, se muestra los resultados de la prueba SFE, prueba de lixiviación para determinar aniones fácilmente solubles a pH neutro, en muestras de pulpa de relave DRL-SD-01 y DRL-SD-03 del depósito Linga.

Tabla 6-38. Prueba SFE en muestras de relave de la zona II

Parámetros	Unidad	DRL-SD-01	DRL-SD-03
Bromuros	mg/l	<0,013	<0,013
Cloruros	mg/l	211	162,2
Fluoruros	mg/L	1,215	1,004
Fosfatos	mg PO ₄ -P/l	7,525	40,38
Nitratos	mg NO ₃ -N/l	0,43	0,554
Nitritos	mg NO ₂ -N/l	<0,0005	<0,0005
Sulfatos	mg/l	1713	1671

Fuente: Informe de ensayo N.º MA18100143 J. Ramón

c) Aguas de recirculación de filtraciones

Se caracterizó el agua de recirculación proveniente de las filtraciones del depósito de relaves Linga, correspondientes a las muestras F-22, F-23 y F-24.

En la Figura 6-168 se observa que los valores de potencial de hidrógeno oscilaron entre 7,26 unidades de pH y 8,18 unidades de pH, la conductividad eléctrica fluctuó entre 4930 µS/cm y 5790 µS/cm. Las concentraciones de cloruros estuvieron en un rango de 651,1 mg/l a 1012 mg/l, mientras que los sulfatos presentaron concentraciones entre los 2015 mg/l y 2658 mg/l.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

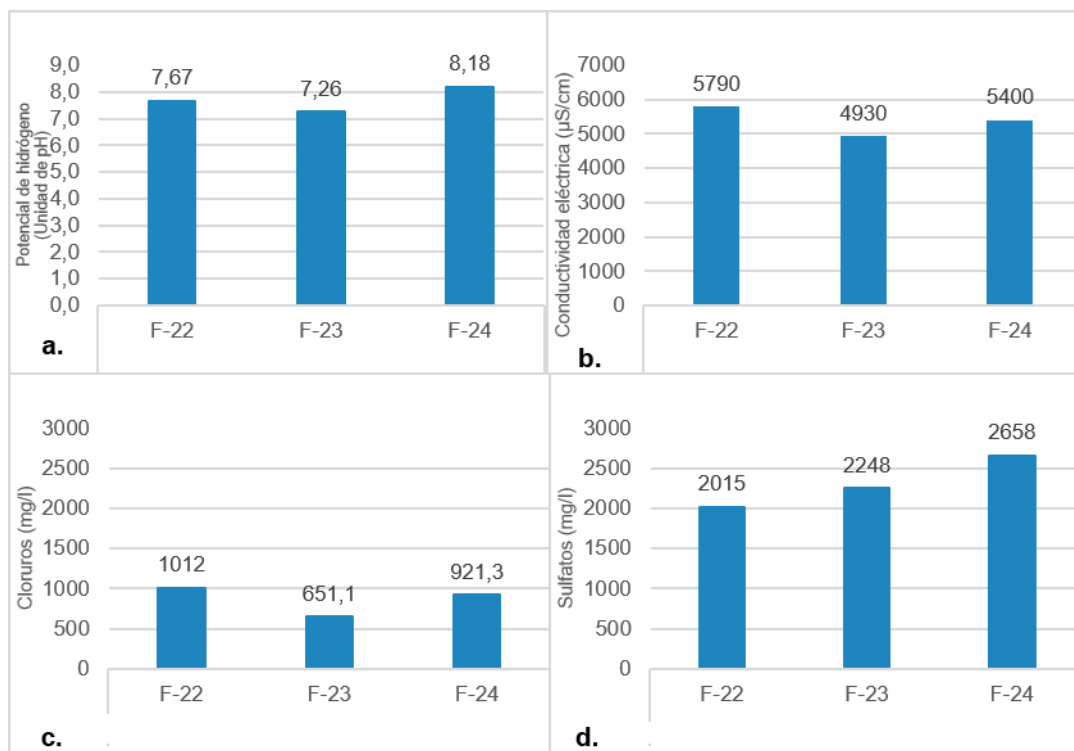


Figura 6-168. Parámetros fisicoquímicos del agua de recirculación de filtraciones del depósito de relaves Linga: **a.** Potencial de hidrógeno, **b.** Conductividad eléctrica, **c.** Cloruros y **d.** Sulfatos

En cuanto a los metales predominantes en el agua de recirculación de filtraciones se encontró calcio, sodio, magnesio, potasio, estroncio, boro y molibdeno (Figura 6-169). Cabe precisar que los elementos como el berilio, bismuto, mercurio, plata, estaño, talio y zinc presentaron en su mayoría concentraciones por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio.

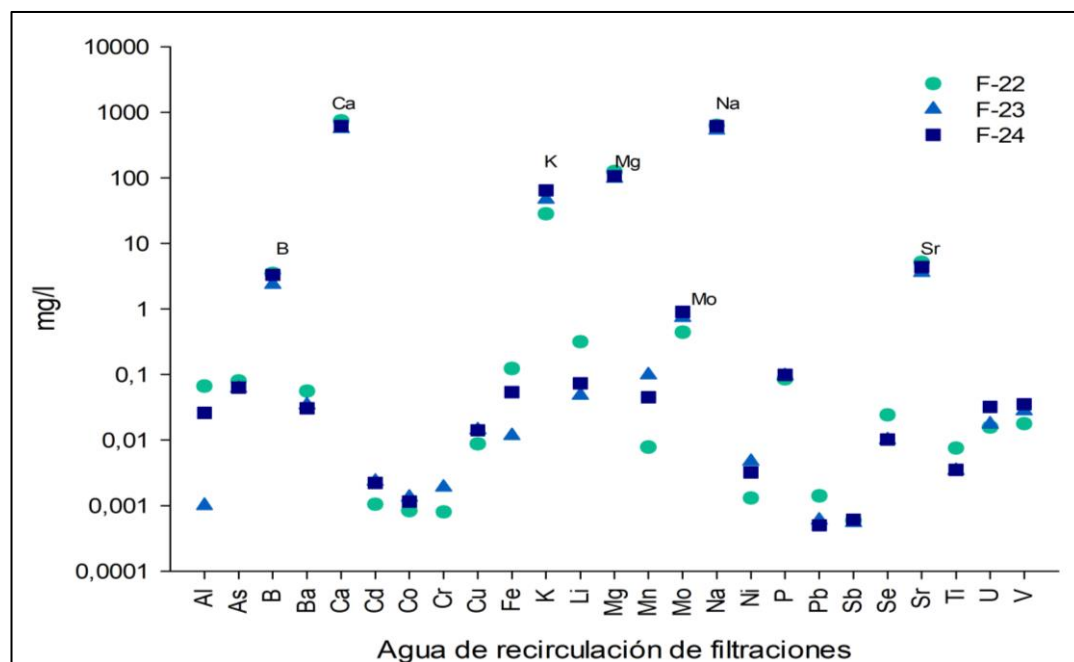


Figura 6-169. Metales totales en el agua de recirculación de filtraciones del depósito de relaves Linga - zona II

6.3.4.3 Zona III: PAD, presa Huayrondo, tajos y DDM Noreste, Sureste y Cerro Negro

Esta zona comprende la caracterización de los depósitos de desmonte de mina DDM Noreste, DDM Sureste y el acceso al DDM Cerro Negro.

A. DDM Noreste

En este depósito de desmonte se extrajeron 2 muestras compuestas (DDM-NE1 y DDM-NE2) de 5 submuestras cada una (Figura 6-170), detalladas en el Anexo 2.



Figura 6-170. Área de colecta de muestras en el DDM Noreste – zona III

a) Granulometría

En la Figura 6-171 se presenta los resultados de granulometría³⁹ de las muestras obtenidas del DDM Noreste.

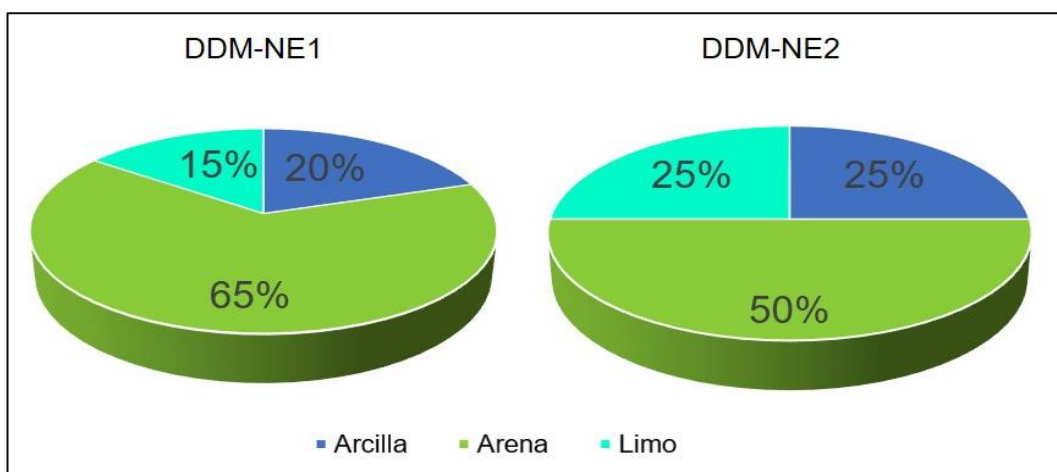


Figura 6-171. Granulometría en muestras del DDM Noreste

³⁹

Informes de ensayo N.º SAA-18/00914 AGQ PERÚ S.A.C.

b) Parámetros fisicoquímicos

En la Tabla 6-39, se presenta los resultados de parámetros fisicoquímicos para la muestra compuesta DDM-NE1 del DDM Noreste.

Tabla 6-39. Parámetros fisicoquímicos en muestra compuesta del DDM Noreste

Parámetros	Unidad	DDM-NE1
pH	Unidades de pH	6,44
Cloruros	mg/kg	20
Sulfatos	mg/kg	4200
Sulfuros	mg/kg	38800

Fuente: Informes de ensayo N.º SAA-18/00919, SAA-18/00920 AGQ, MA18100142 J. Ramón.

c) Metales

La Figura 6-172 muestra la mayor abundancia del hierro, aluminio, calcio, cobre, potasio y magnesio; en comparación al arsénico, bario, cobalto, mercurio, litio, molibdeno, manganeso, sodio, fósforo, plomo, silicio, estroncio, titanio, vanadio y zinc. Cabe precisar que los demás analitos no mencionados se encontraron por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio.

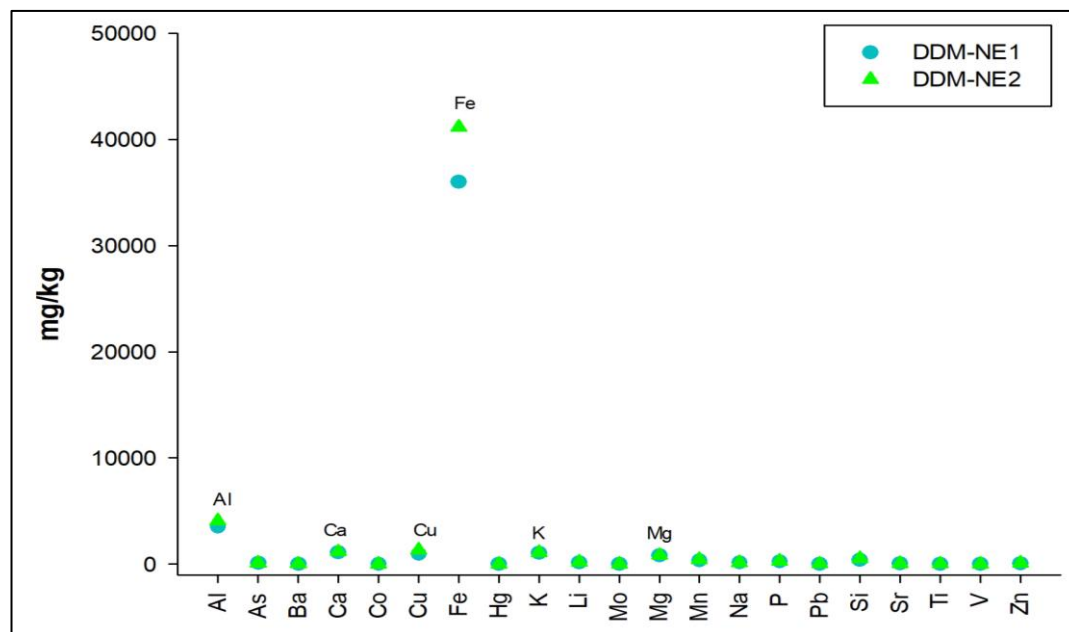


Figura 6-172. Metales en muestras compuestas del DDM Noreste

a) Análisis mineralógico

De los resultados mineralógicos, presentó mayor porcentaje el cuarzo, illita, caolinita y en menor proporción plagioclasa, pirita y montmorillonita, detallados en la Tabla 6-40.

Tabla 6-40. Análisis mineralógico en muestra compuesta del DDM Noreste (DDM-NE1)

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado (%)
Cuarzo	SiO_2	52
Illita	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})]$	31
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	5
Plagioclasa (Andesina)	$(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$	4
Pirita	FeS_2	4
Montmorillonita	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$	2

Fuente: Informe de ensayo N.º IL-001MI-732 Bizalab

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

b) Biodisponibilidad de metales - Tessier

En la Figura 6-173 se observa que el material proveniente del DDM Sureste, presentó concentraciones de cobre asociadas a la fracción 1 (intercambiable). En cuanto a los analitos que se encuentran en las fracciones 2 (enlazados a carbonatos) y 3 (enlazados a oxi-hidróxidos de Fe y Mn) y 4 (enlazada a materia orgánica) se reportó cobalto, cobre, hierro, manganeso, níquel y plomo. Además, en la fracción 4 se registró zinc.

Por otro lado, en la fracción 5 (minerales primarios y secundarios) se encontraron los 8 metales que forman parte de la metodología de Tessier. (Figura 6-173).



Figura 6-173. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras del DDM Noreste - zona III

c) Lixiviación de metales - SPLP

En la Figura 6-174 se muestra que a las condiciones de la prueba SPLP, los metales de las muestras del material de desmonte que lixivian principalmente fueron calcio y azufre en comparación al aluminio, bario, cobalto, cobre, estroncio, magnesio, manganeso,

plomo, potasio, sílice y sodio. Cabe precisar que los demás analitos no mencionados se encontraron por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio.

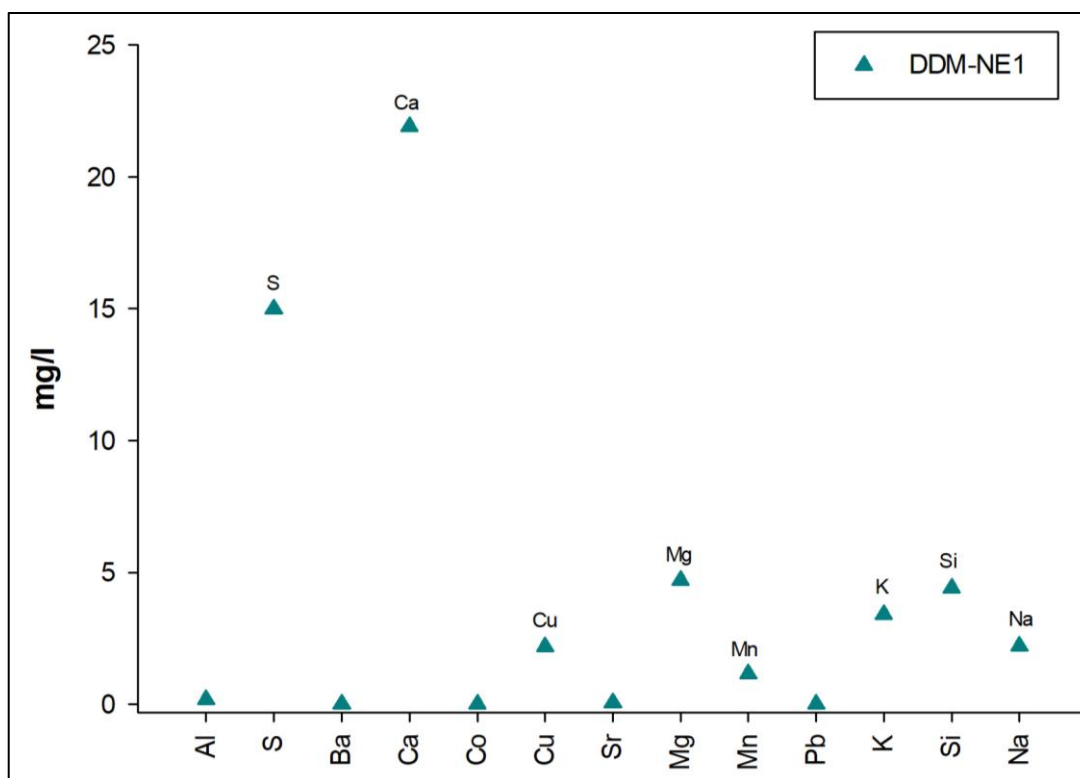


Figura 6-174. Prueba de lixiviación de metales SPLP en muestras del DDM Noreste – zona III

d) Lixiviación de aniones - SFE

En la Tabla 6-41, se presenta los resultados de la prueba SFE (prueba de lixiviación para aniones) para el punto de muestreo compuesto DDM-NE1.

Tabla 6-41. Prueba SFE en muestra compuesta de DDM Noreste

Parámetros	Unidad	DDM-NE1
Bromuros	mg/l	<0,013
Cloruros	mg/l	7,903
Fluoruros	mg/l	0,184
Fosfatos	mg PO ₄ -P/l	<0,028
Nitratos	mg NO ₃ -N/l	1,132
Nitritos	mg NO ₂ -N/l	<0,0005
Sulfatos	mg/l	371,1

Fuente: Informe de ensayo N.º MA18100139 J. Ramón

B. DDM Sureste

En este depósito de desmonte se extrajeron 2 muestras compuestas DDM-SE1 y DDM-SE2 (Figura 6-175), cuyo detalle se presenta en el Anexo 2.



Figura 6-175. Vista panorámica del área de colecta de muestras en el DDM Sureste

a) Granulometría

En la Figura 6-176, se muestra los resultados de granulometría⁴⁰ del DDM Sureste.

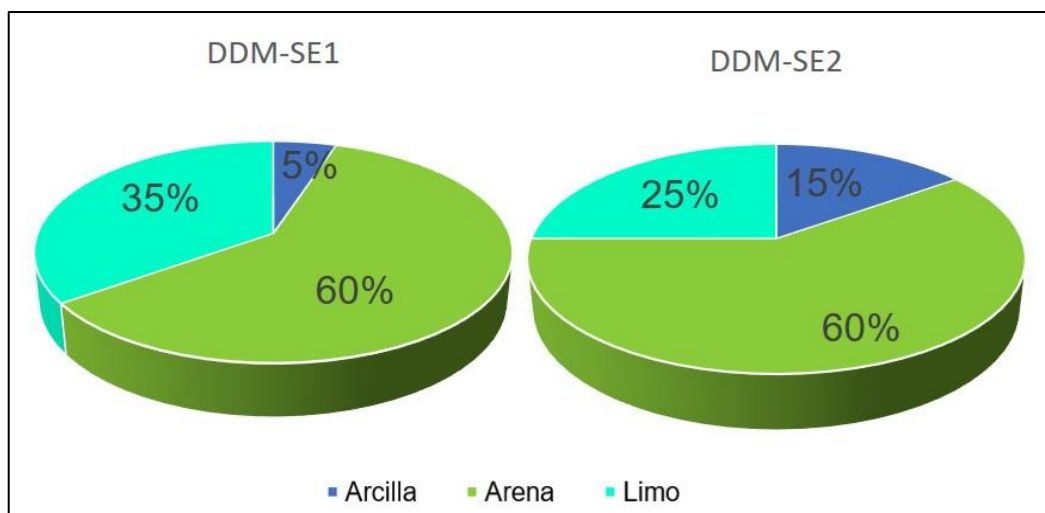


Figura 6-176. Granulometría en el área de influencia del DDM Sureste

b) Parámetros fisicoquímicos

En la Tabla 6-42, se muestra los resultados de parámetros fisicoquímicos para la muestra compuesta DDM-SE1 en el área de influencia del DDM Sureste.

Tabla 6-42. Parámetros fisicoquímicos en muestra compuesta del DDM Sureste

Parámetros	Unidad	DDM-SE1
pH	Unidades de pH	3,03
Cloruros	mg/kg	142
Sulfatos	mg/kg	11000
Sulfuros	mg/kg	51000

Fuente: Informe de ensayo N.º SAA-18/01000, SAA-18/01001 AGQ Perú; MA18100138 J. Ramón

⁴⁰ Informe de ensayo N.º SAA-18/00914 AGQ PERÚ S.A.C.

c) Metales

La Figura 6-177 muestra la mayor abundancia del hierro, aluminio, calcio, cobre, potasio y magnesio; en comparación al arsénico, bario, cobalto, cromo, manganeso, molibdeno, mercurio, sodio, plomo, litio, fósforo, silicio titanio, vanadio y zinc. Cabe precisar que los demás analitos no mencionados se encuentran por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio.

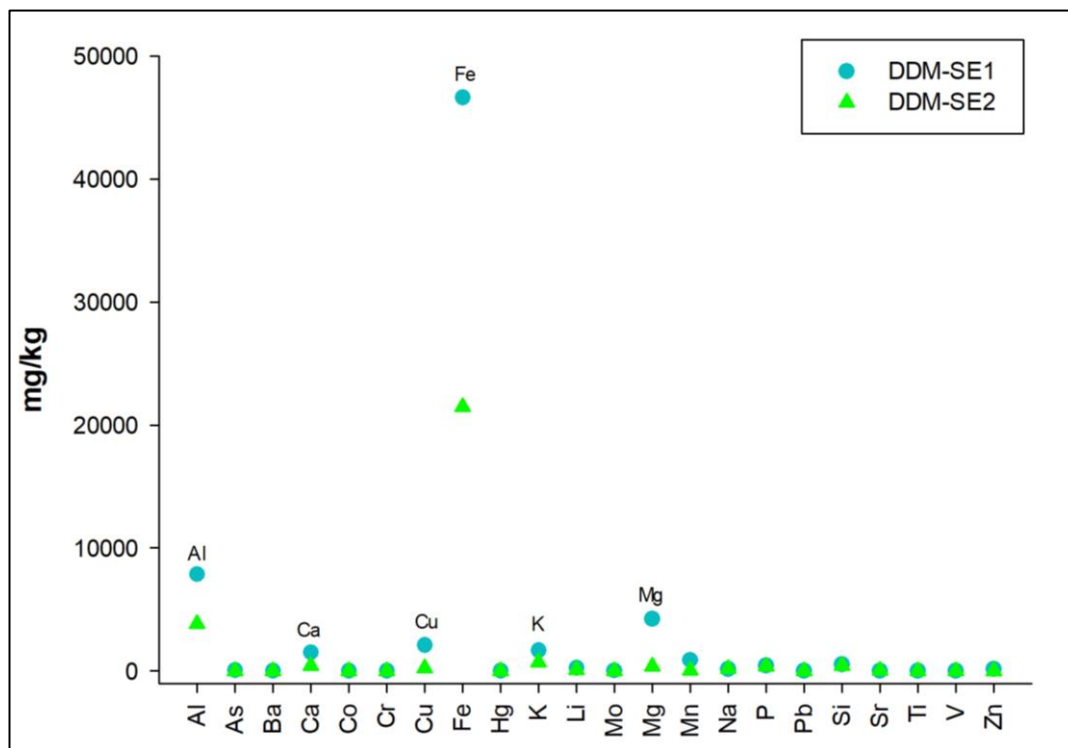


Figura 6-177. Metales en muestra compuesta del DDM Sureste

d) Análisis mineralógico

De los resultados mineralógicos presentó mayor porcentaje el cuarzo, muscovita y pirita y en menor proporción clorita, caolinita, montmorillonita y jarosita detallados en la Tabla 6-43.

Tabla 6-43. Análisis mineralógico en muestra compuesta del DDM Sureste (DDM-SE1)

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado (%)
Cuarzo	SiO_2	55
Mica (Muscovita)	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2]$	25
Pirita	FeS_2	6
Clorita (Clinocoro)	$(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	4
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	3
Montmorillonita	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$	3
Jarosita	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	2

Fuente: Informe de ensayo N.º IL-001MI-732 Bizalab

e) Biodisponibilidad de metales - Tessier

En la Figura 6-178 se observa que el material proveniente del DDM Sureste, presentó concentraciones de manganeso, cadmio, zinc, cobalto, cobre, y níquel asociadas a la fracción 1 (intercambiable). En cuanto a los analitos que se encuentran en la fracción 2 (enlazados a carbonatos) se tuvo al manganeso, hierro zinc, plomo, cobalto, cobre y níquel.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

En las fracciones 3 (enlazados a oxi-hidróxidos de Fe y Mn) y 4 (enlazada a materia orgánica) se registraron concentraciones de hierro, manganeso, zinc, cobre y níquel. Además, en la fracción 4 se registró al cadmio. Por otro lado, en la fracción 5 (minerales primarios y secundarios) se encontraron todos los metales que forman parte de la metodología de Tessier, siendo el hierro y cobre los que registraron mayor concentración (Figura 6-178).

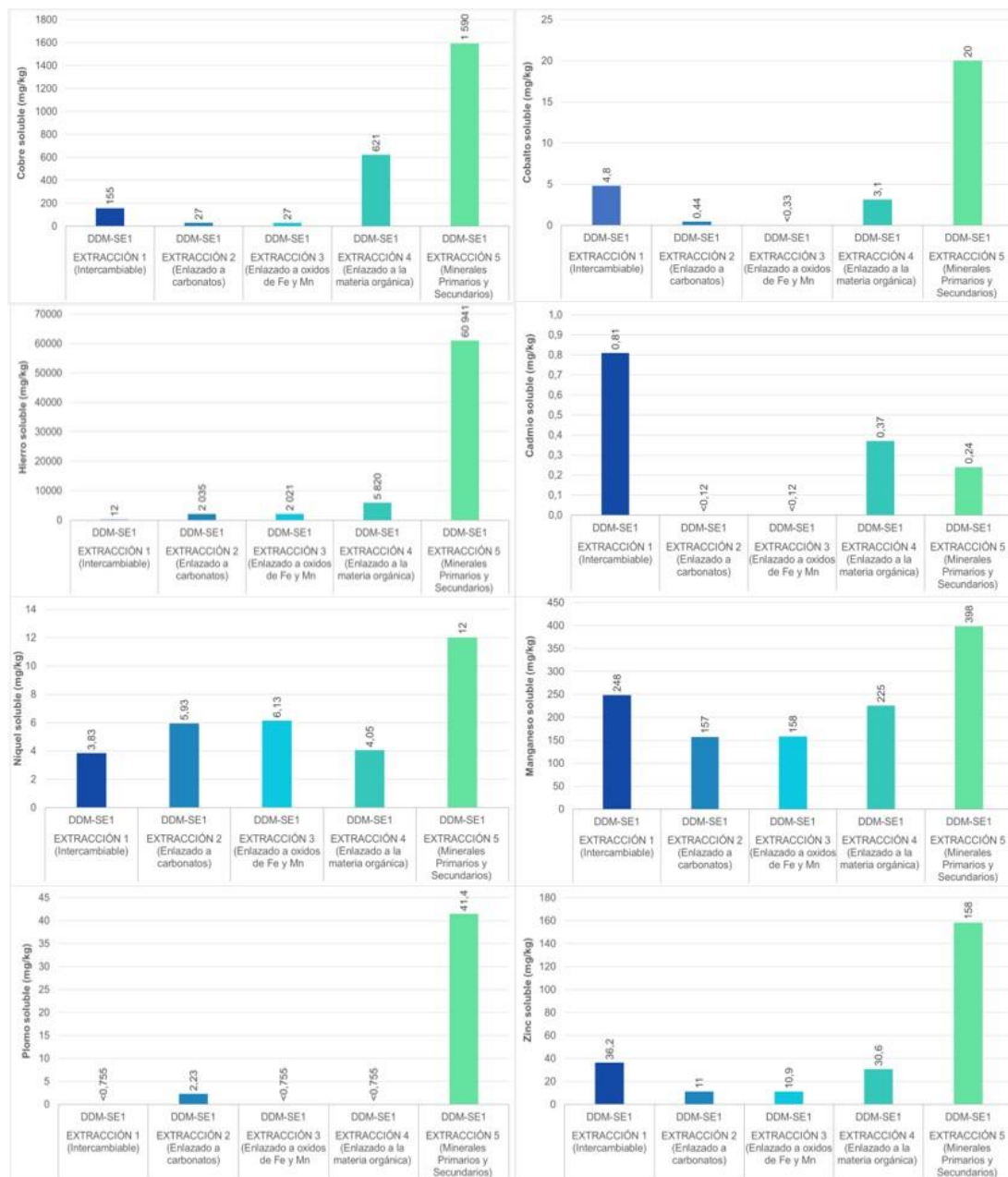


Figura 6-178. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras del DDM Noreste - zona III

e) Lixiviación de metales - SPLP

En la Figura 6-179 se muestra que a las condiciones de la prueba SPLP, la muestra analizada lixivia principalmente azufre, calcio, magnesio, aluminio, cobre, hierro y manganeso en comparación al bario, berilio, cadmio, cobalto, cromo, estroncio, níquel, plomo, potasio y zinc. Cabe precisar que los demás analitos no mencionados se encontraron por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

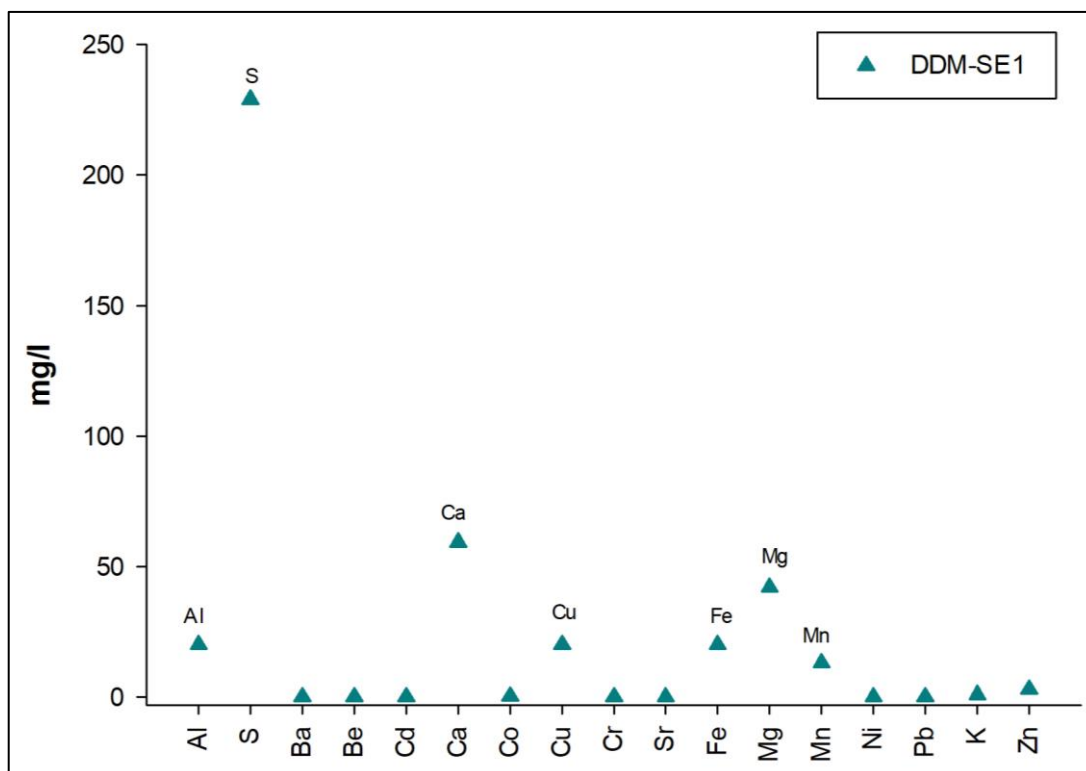


Figura 6-179. Prueba de lixiviación de metales solubles SPLP en muestras del DDM Sureste – zona III

f) Lixiviación de anions - SFE

En la Tabla 6-44 se muestra los resultados de la prueba SFE (prueba de lixiviación para aniones) para el punto DDM-SE1.

Tabla 6-44. Prueba SFE en muestra compuesta de DDM Sureste

Parámetros	Unidad	DDM-SE1
Bromuros	mg/l	<0,013
Cloruros	mg/l	47,84
Fluoruros	mg/l	4,303
Fosfatos	mg PO ₄ -P/l	<0,028
Nitratos	mg NO ₃ -N/l	0,711
Nitritos	mg NO ₂ -N/l	<0,0005
Sulfatos	mg/l	2079

Fuente: Informe de ensayo N.º MA18100139 J. Ramón

C. DDM Cerro Negro

Las muestras compuestas DDM-CN1 y DDM-CN2 fueron tomadas en el acceso al depósito de desmonte Cerro Negro (Figura 6-180), cuyo detalle se encuentra en el Anexo 2.



Figura 6-180. Vista del área de colecta de muestras en el acceso al DDM Cerro Negro

a) Granulometría

En la Figura 6-181, se muestra los resultados de granulometría⁴¹ de las muestras colectadas en el acceso al DDM Cerro Negro.

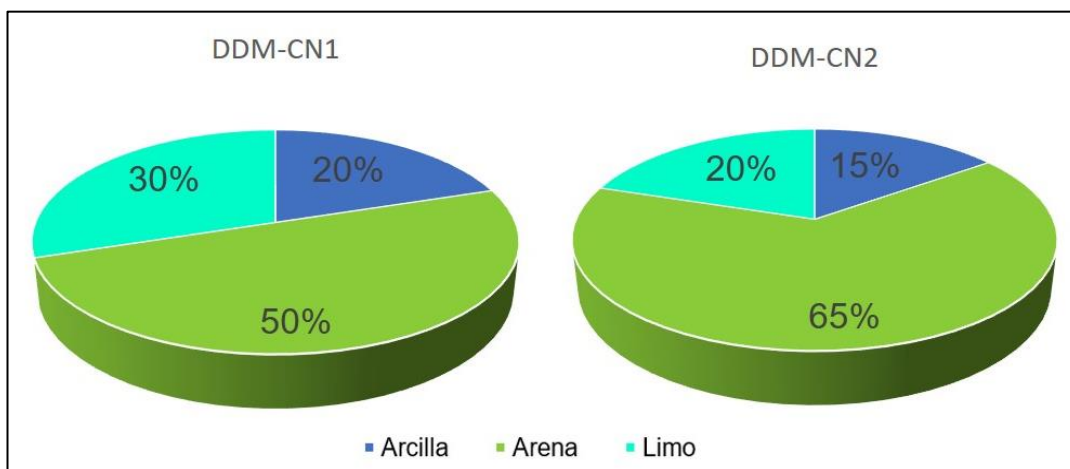


Figura 6-181. Granulometría en muestras del acceso hacia el DDM Cerro Negro

b) Parámetros fisicoquímicos

En la Tabla 6-45, se muestra los resultados de parámetros fisicoquímicos para la muestra compuesta DDM-CN1.

Tabla 6-45. Parámetros fisicoquímicos en muestra compuesta del DDM Cerro Negro

Parámetros	Unidad	DDM-CN1
pH	Unidades de pH	8,02
Cloruros	mg/kg	90
Sulfatos	mg/kg	2700
Sulfuros	mg/kg	300

Fuente: Informe de ensayo N.º SAA-18/01000, SAA-18/01001 AGQ Perú; MA18100138 J. Ramón

⁴¹

Informe de ensayo N.º SAA-18/00914 AGQ PERÚ S.A.C.

c) Metales

La Figura 6-182 muestra la mayor abundancia de hierro, aluminio, calcio, magnesio, cobre, potasio, manganeso, fósforo y sílice; en comparación al arsénico, bario, cobalto, cromo, mercurio, litio, sodio, plomo, estroncio, titanio, vanadio y zinc. Cabe precisar que los demás analitos no mencionados se encuentran por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio.

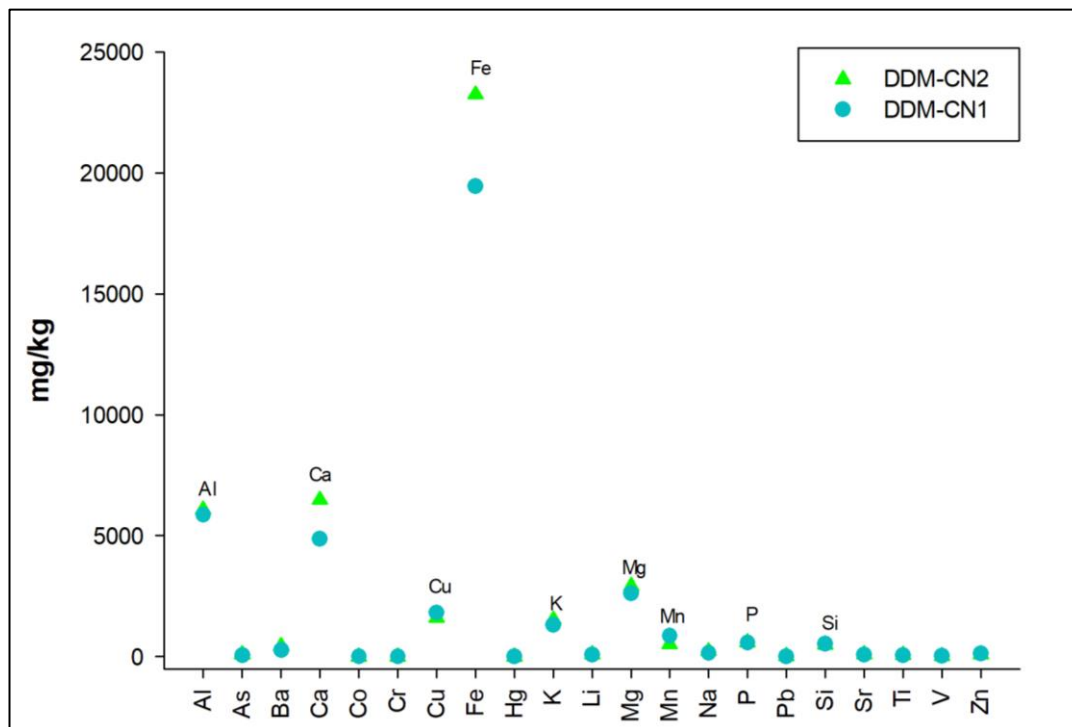


Figura 6-182. Metales en muestra compuesta del DDM Cerro Negro

d) Análisis mineralógico

De los resultados mineralógicos, presentó mayor porcentaje de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa y en menor proporción illita, montmorillonita, caolinita, calcita y hematita, detallados en la Tabla 6-46.

Tabla 6-46. Análisis mineralógico en muestra compuesta del DDM Cerro Negro (DDM-CN1)

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado (%)
Cuarzo	SiO_2	30
Feldespato – K (Ortoclasa)	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	19
Plagioclasa (Andesina)	$(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$	13
Illita	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})]$	12
Montmorillonita	$(\text{Na}, \text{Ca})_0,3(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$	12
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	8
Calcita	CaCO_3	2
Hematita	Fe_2O_3	2

Fuente: Informe de ensayo N.º IL-001MI-732 Bizalab

e) Biodisponibilidad de metales - Tessier

En la Figura 6-183 se observa que el material proveniente del DDM Cerro Negro, presentó concentraciones de manganeso asociadas a la fracción 1 (intercambiable). En cuanto a los analitos que se encontraron en la fracción 2 (enlazados a carbonatos) y 3

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

(enlazados a oxi-hidróxidos de Fe y Mn) se tuvo al cobre, cobalto, hierro, manganeso, níquel y zinc. Además, se tuvo plomo solo en la fracción 3.

En lo referente a los metales que se encuentran en la fracción 4 (enlazada a materia orgánica) se registraron concentraciones cobalto, cobre, hierro, manganeso, níquel y zinc. Por otro lado, en la fracción 5 (minerales primarios y secundarios) se encontraron todos los metales que forman parte de la metodología de Tessier, siendo el hierro y cobre los que registraron mayores concentraciones (Figura 6-183).

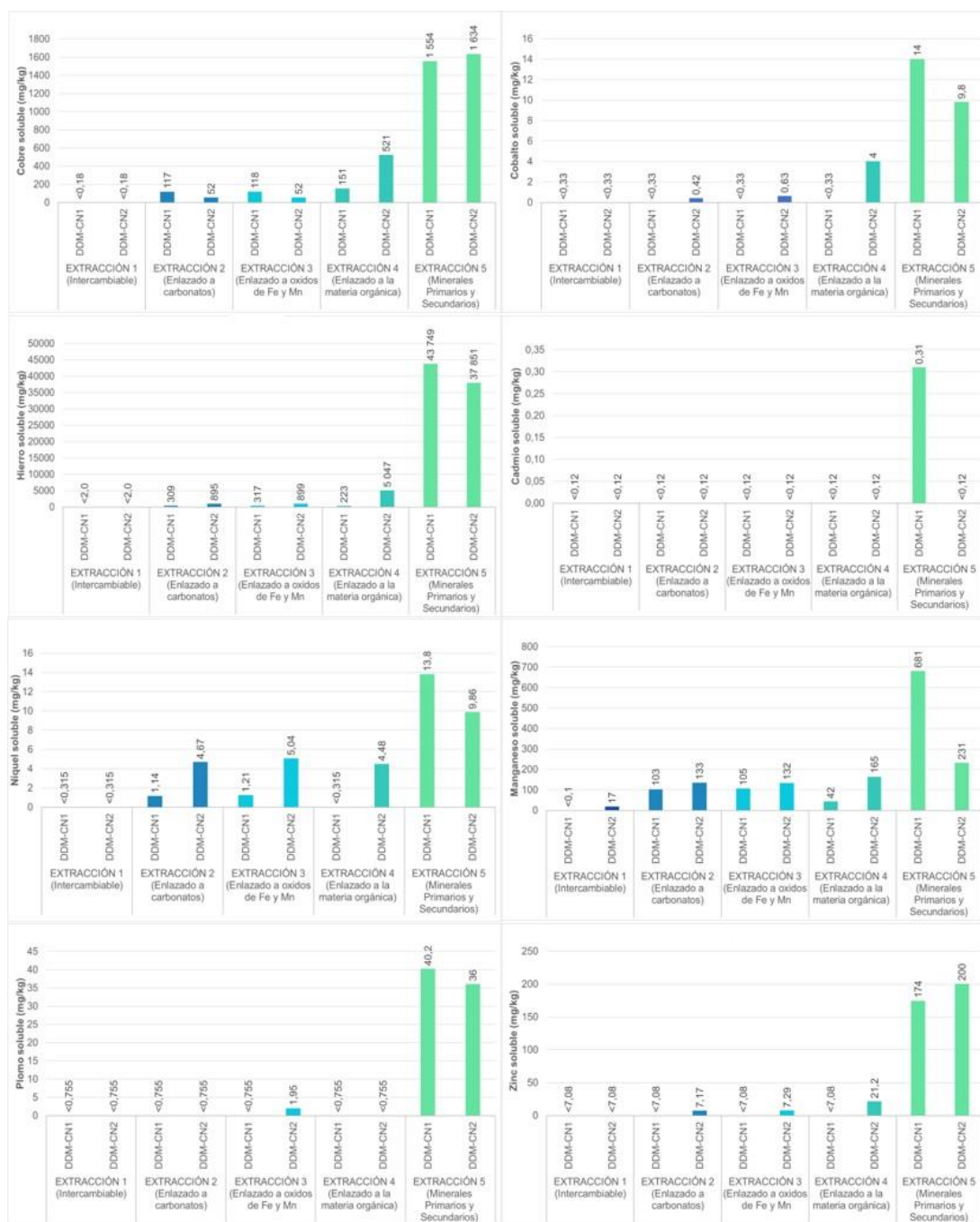


Figura 6-183. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras del acceso al DDM Cerro Negro - zona III

f) Lixiviación de metales - SPLP

En la Figura 6-184 se muestra que a las condiciones de la prueba SPLP, la muestra analizada lixivia principalmente calcio y azufre en comparación al bario, boro, cobre, estroncio, manganeso, potasio, sílice y sodio. Cabe precisar que los demás analitos no mencionados se encontraron por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio.

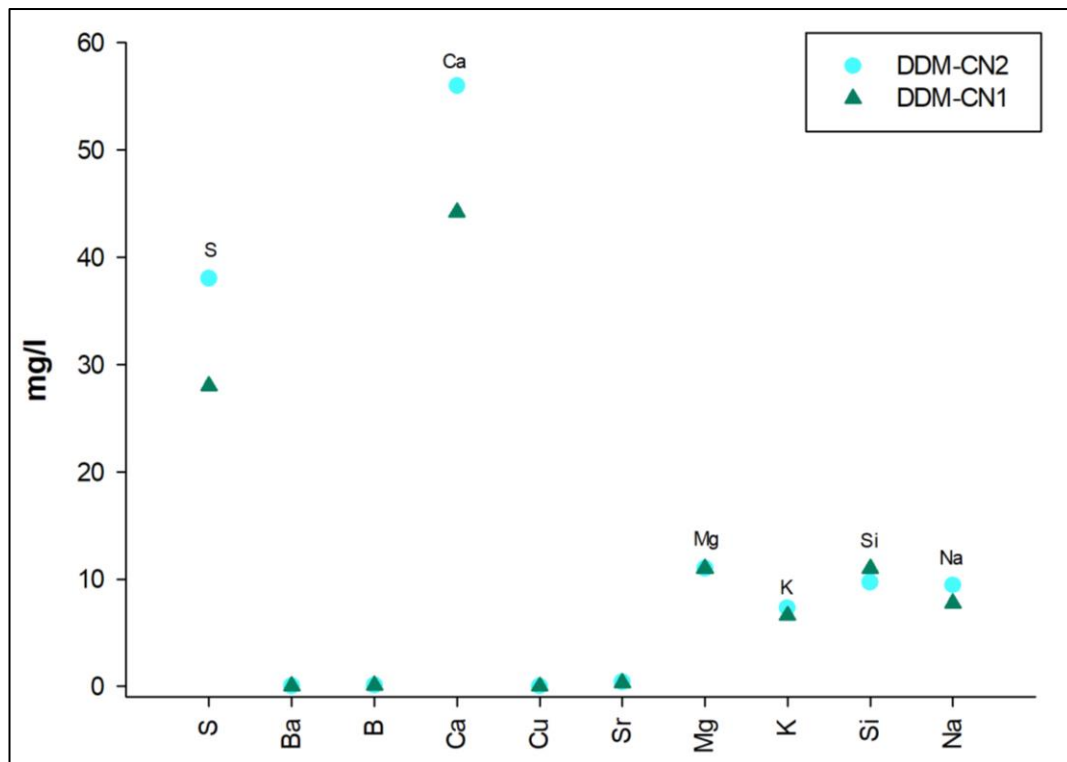


Figura 6-184. Prueba de lixiviación de metales SPLP en muestras del DDM Cerro Negro – zona III

g) Generación de acidez - ABA

De acuerdo a los resultados de la prueba estática de balance ácido-base para definir la generación de acidez de los afloramientos rocosos, indica que las muestras DDM-CN1 y DDM-CN2 según el primer criterio se encontró en la zona de incertidumbre (Figura 6-185) en tanto que según el segundo criterio de análisis la muestra DDM-CN1 es potencial generador de acidez y la muestra DDM-CN2 no es generadora de acidez (Figura 6-186).



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

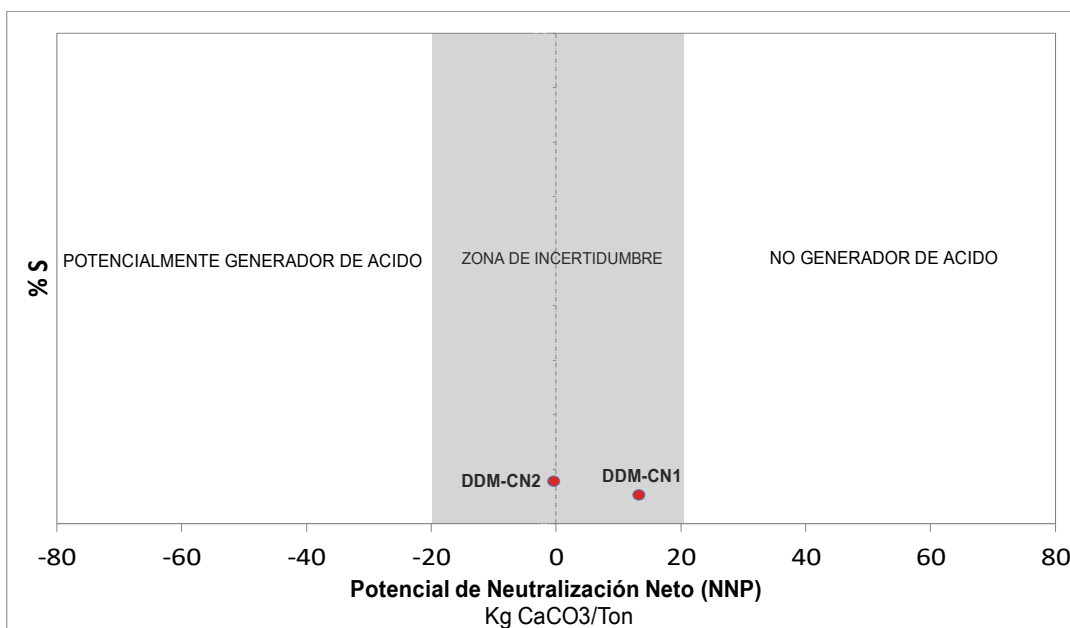


Figura 6-185. Prueba ABA en muestras del acceso al DDM Cerro Negro de la zona III (primer criterio)

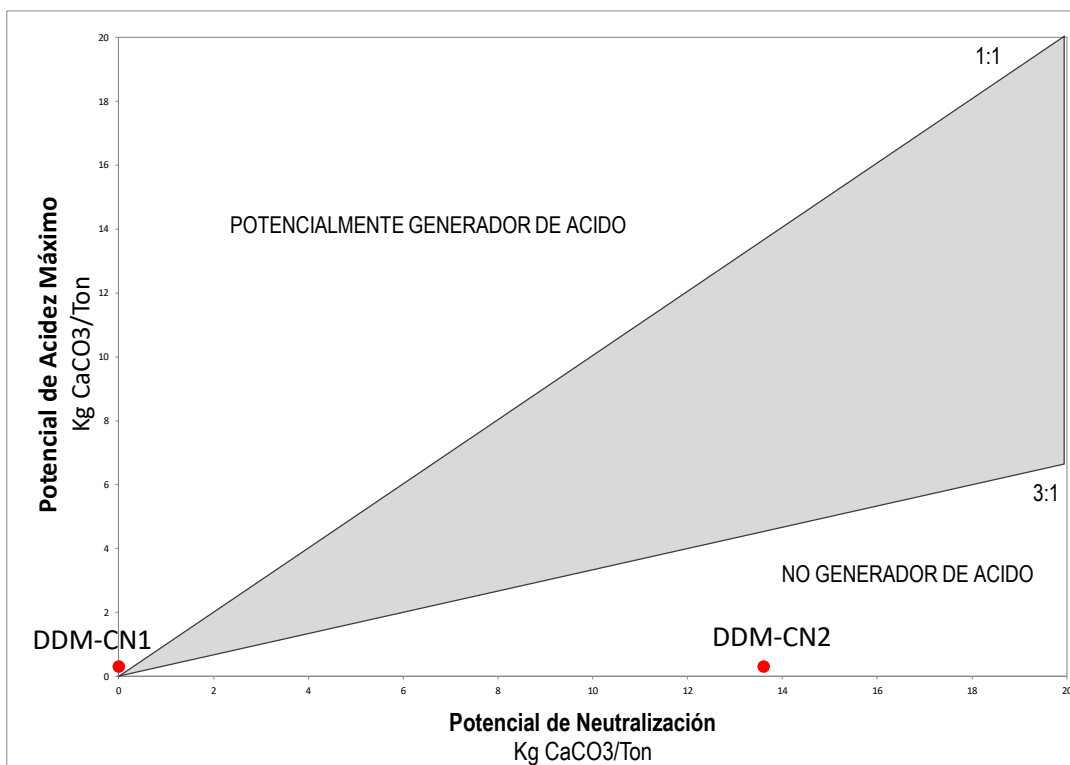


Figura 6-186. Prueba ABA en muestras del acceso al DDM Cerro Negro de la zona III (segundo criterio)

h) Lixiviación de aniones - SFE

En la Tabla 6-47 se muestra los resultados de la prueba SFE (prueba de lixiviación para aniones) para el punto DDM-CN1.

Tabla 6-47. Prueba SFE en muestras del acceso del DDM Cerro Negro de la zona III

Parámetros	Unidad	DDM-CN1
Bromuros	mg/l	<0,013

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Parámetros	Unidad	DDM-CN1
Cloruros	mg/l	34,33
Fluoruros	mg/l	1,197
Fosfatos	mg PO ₄ -P/l	<0,028
Nitratos	mg NO ₃ -N/l	1,129
Nitritos	mg NO ₂ -N/l	0,0412
Sulfatos	mg/l	436,7

Fuente: Informe de ensayo N.º MA18100139 J. Ramón

6.3.4.4 Zona IV: DDM

Esta zona consideró 2 componentes mineros DDM Oeste y Suroeste)

A. DDM Oeste

En este depósito de desmonte se extrajeron 2 muestras compuestas, DDM-O1 y DDM-O4, de 5 submuestras cada una (Figura 6-169), detalladas en el Anexo 2.



Figura 6-187. Vista del área de colecta de muestra en el DDM - Oeste

a) Granulometría

En la Figura 6-188, se muestra los resultados de granulometría⁴² en el área de influencia del DDM Oeste.

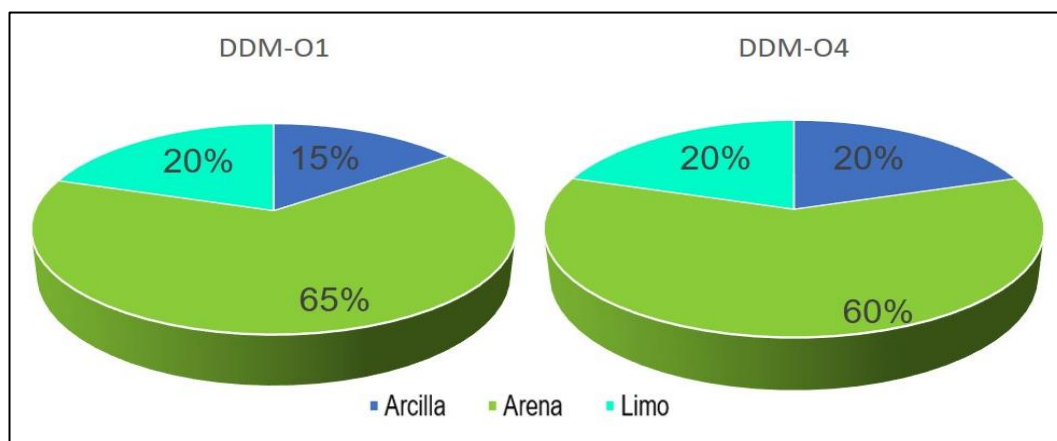


Figura 6-188. Granulometría en muestras del DDM Oeste

⁴²

Informe de ensayo N.º SAA-18/00914 AGQ PERÚ S.A.C.

b) Parámetros fisicoquímicos

En la Tabla 6-48, se muestra los resultados de parámetros fisicoquímicos para la muestra compuesta DDM-O1 provenientes del DDM Oeste.

Tabla 6-48. Parámetros fisicoquímicos en muestra compuesta del DDM Oeste

Parámetros	Unidad	DDM-O1
pH	Unidades de pH	6,17
Cloruros	mg/kg	190
Sulfatos	mg/kg	9000
Sulfuros	mg/kg	59000

Fuente: Informe de ensayo N.º SAA-18/01000, SAA-18/01001 AQG, MA18100138 J. Ramón

c) Metales

La Figura 6-189 muestra la mayor abundancia del hierro, aluminio, calcio, potasio, cobre y magnesio; en comparación al arsénico, bario, cobalto, mercurio, litio, manganeso, molibdeno, sodio, fósforo, plomo, silicio, estroncio, titanio vanadio y zinc. Cabe precisar que los demás analitos no mencionados se encuentran por debajo del límite de detección del método del laboratorio.

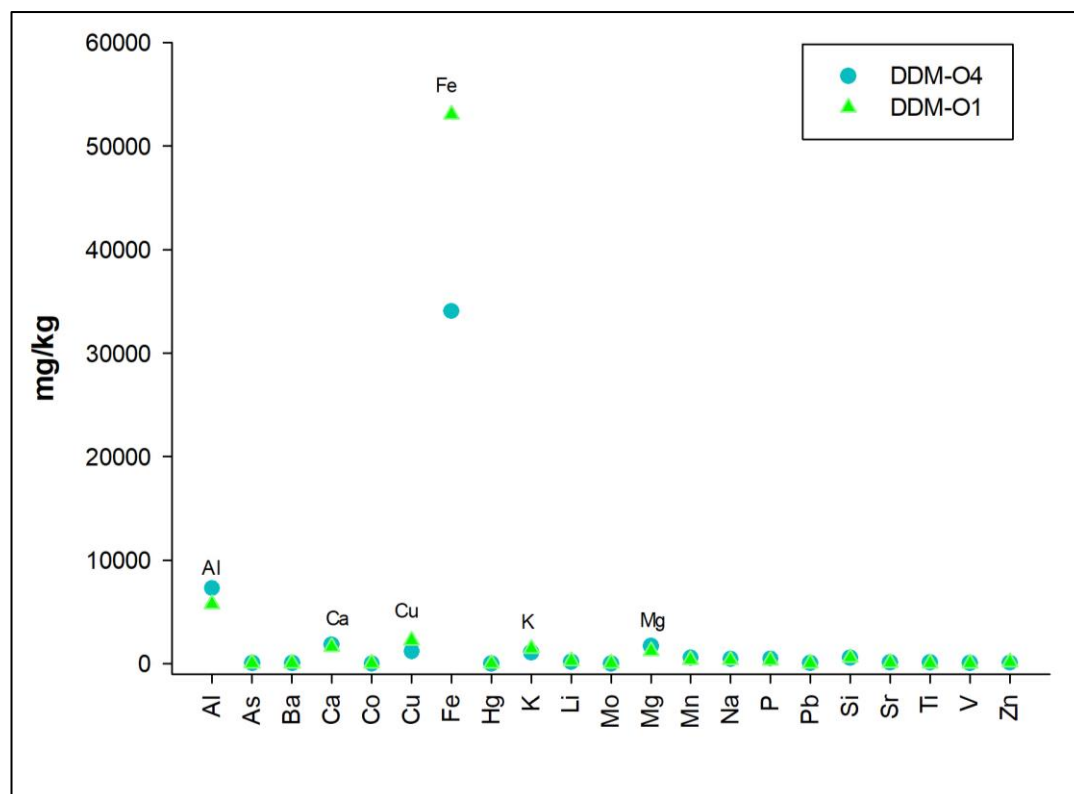


Figura 6-189. Metales en muestras compuestas del DDM Oeste

d) Análisis mineralógico

De los resultados mineralógicos, presentó mayor porcentaje el cuarzo, illita, caolinita y en menor proporción pirita y montmorillonita detallados en la Tabla 6-49.

**Tabla 6-49.** Análisis mineralógico en muestra compuesta del DDM Oeste

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado (%)
Cuarzo	SiO_2	55
Illita	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})]$	29
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	5
Pirita	FeS_2	5
Montmorillonita	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$	2
Alunita	$(\text{K}, \text{Na})\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	<L.D.
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	<L.D.

Fuente: Informe de ensayo N.º IL-001MI-732 Bizalab

e) Biodisponibilidad de metales - Tessier

En la Figura 6-190 se observa que el material proveniente del DDM Oeste, presentó concentraciones de manganeso y cobre asociadas a la fracción 1 (intercambiable). En cuanto a los analitos que se encontraron en la fracción 2 (enlazados a carbonatos) se tuvo al cobalto, cobre, manganeso, hierro, plomo y zinc.

En lo referente a los metales que se encuentran en la fracción 3 (enlazados a oxi-hidróxidos de Fe y Mn) se registraron concentraciones de cobre, hierro, manganeso, níquel y plomo. Por otro lado, en la fracción 4 (enlazada a materia orgánica) y 5 (minerales primarios y secundarios) se encontraron todos los metales que forman parte de la metodología de Tessier (Figura 6-190).

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

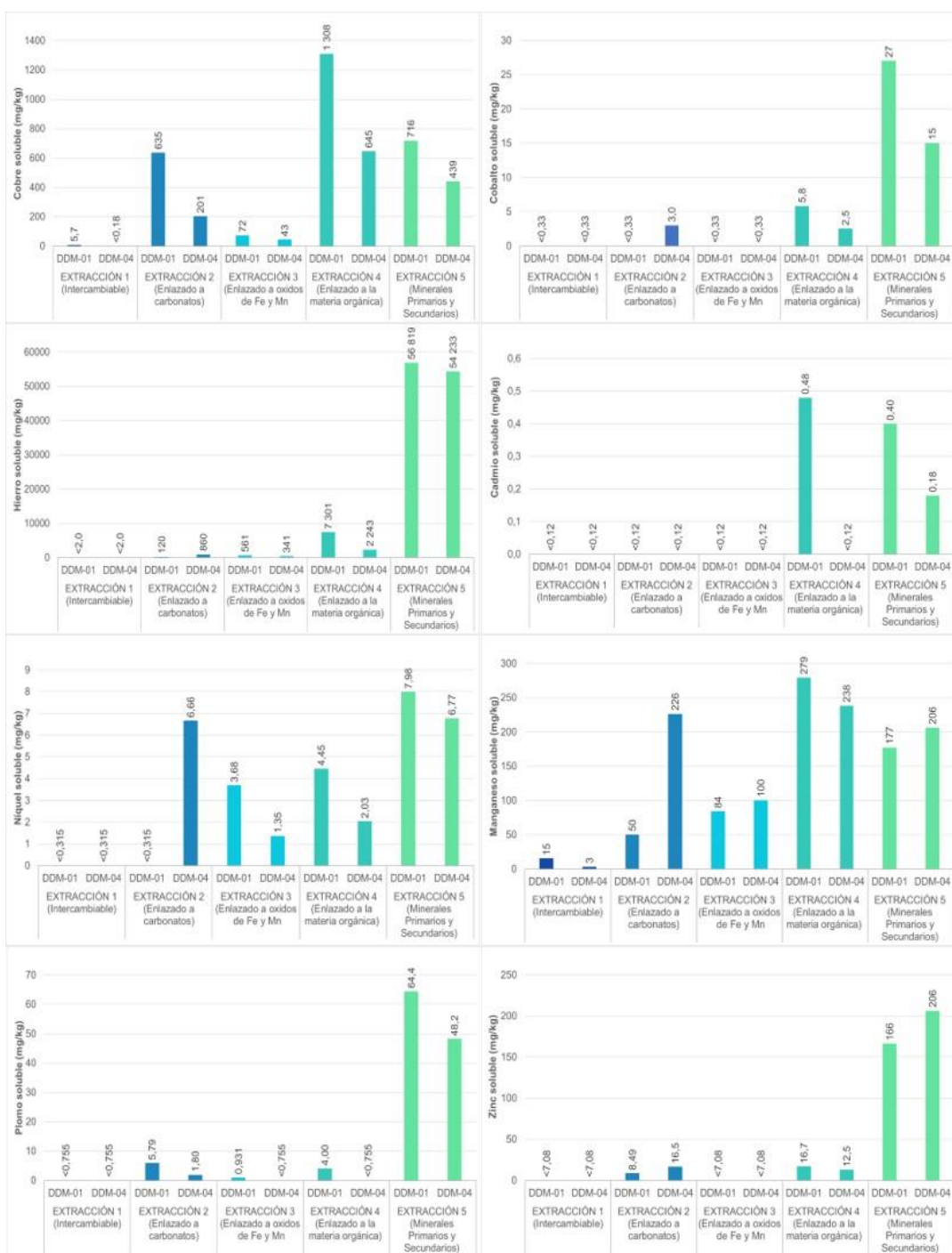


Figura 6-190. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras del DDM Oeste - Zona III

f) Lixiviación de metales - SPLP

En la Figura 6-191, se muestra que a las condiciones de la prueba SPLP el material analizado presentó altos valores de calcio, azufre, cobre, sodio, potasio y sílice. Asimismo, el aluminio, bario, boro, cadmio, cobalto, estroncio, magnesio y manganeso se encontraron en menor cantidad, en tanto que los demás analitos se reportaron por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio.

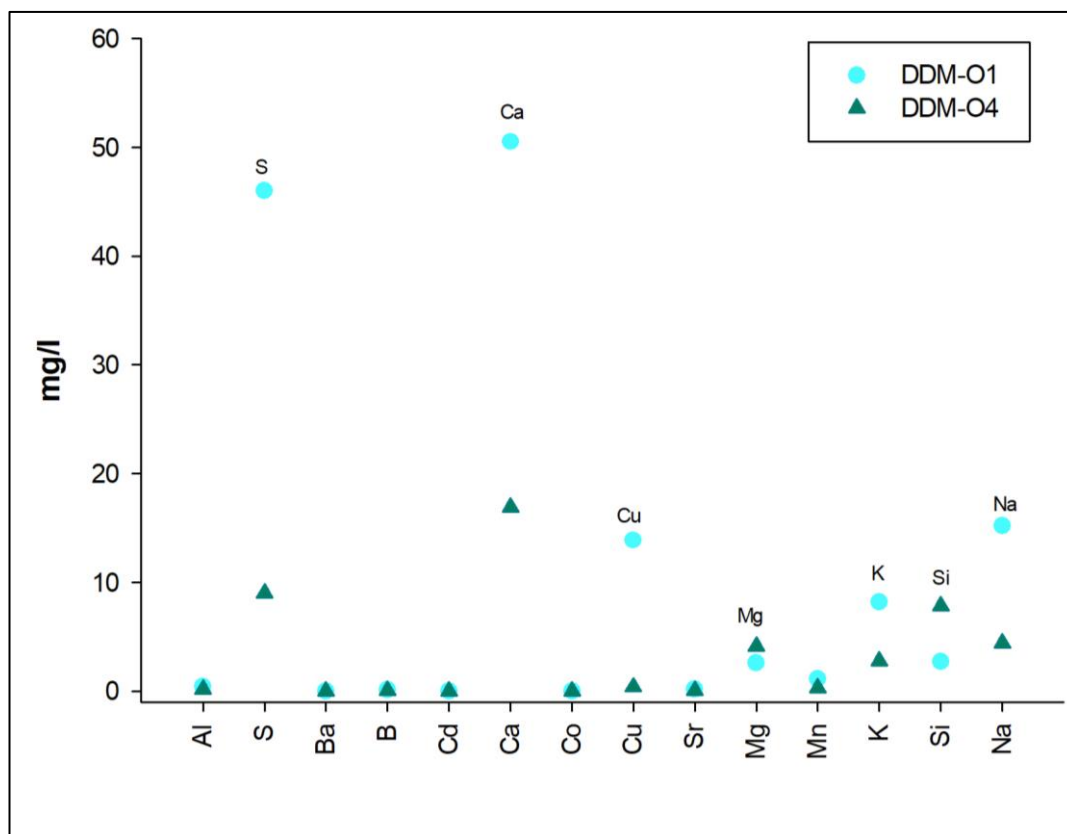


Figura 6-191. Prueba de lixiviación de metales solubles SPLP en muestras del DDM Noreste – zona IV

g) Lixiviación de aniones - SFE

En la Tabla 6-50, se muestra los resultados de la prueba SFE (prueba de lixiviación para aniones) para el punto de muestreo compuesto denominado DDM-O1.

Tabla 6-50. Prueba shake flask extraction en muestra compuesta de DDM Oeste

Parámetros	Unidad	DDM-O1
Bromuros	mg/l	<0,013
Cloruros	mg/l	68,56
Fluoruros	mg/l	0,648
Fosfatos	mg PO ₄ -P/l	0,072
Nitratos	mg NO ₃ -N/l	1,197
Nitritos	mg NO ₂ -N/l	<0,0005
Sulfatos	mg/l	884,5

Fuente: Informe de ensayo N.º MA18100139 J. Ramón

B. DDM Suroeste

En este depósito de desmonte se extrajeron 2 muestras compuestas (DDM-O2 y DDM-O3) de 5 submuestras cada una (Figura 6-192), detalladas en el Anexo 2.



Figura 6-192. Vista del área de colecta de muestras en el DDM Suroeste

g) Granulometría

En la Figura 6-193, se presenta los resultados de granulometría⁴³ en muestras del DDM Suroeste.

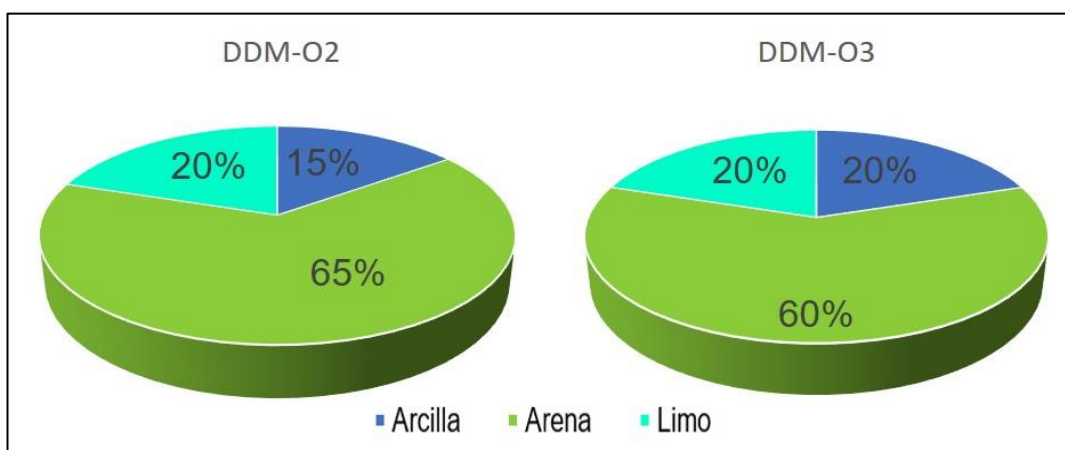


Figura 6-193. Granulometría en muestras del DDM Suroeste

h) Parámetros fisicoquímicos

En la Tabla 6-51, se muestra los resultados de parámetros fisicoquímicos para la muestra compuesta DDM-03 obtenida del DDM Suroeste.

Tabla 6-51. Parámetros fisicoquímicos en muestra compuesta del DDM Suroeste

Parámetros	Unidad	DDM-O3
pH	Unidades de pH	6,52
Cloruros	mg/kg	84
Sulfatos	mg/kg	8200
Sulfuros	mg/kg	8800

Fuente: Informe de ensayo N.º SAA-18/01000, SAA-18/01001 AGQ Perú; MA18100138 J. Ramón

i) Metales

La Figura 6-194 muestra la mayor abundancia del hierro, aluminio, calcio, cobre, potasio y magnesio; en comparación al arsénico, bario, cobalto, mercurio, litio, molibdeno, manganeso, sodio, fósforo, plomo, sílice, estroncio, titanio, vanadio y zinc. Cabe precisar que los demás analitos no mencionados se encontraron por debajo del límite de detección del método del laboratorio.

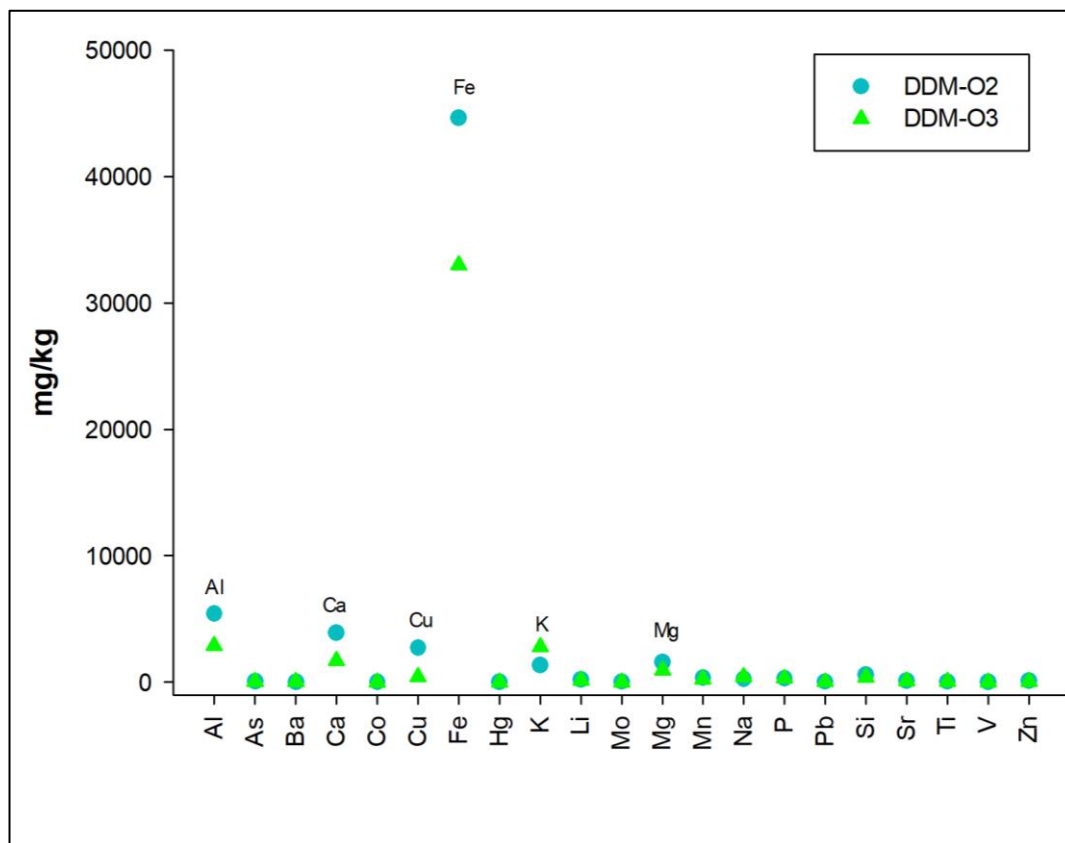


Figura 6-194. Metales totales en muestra compuesta del DDM Suroeste

j) Análisis mineralógico

De los resultados mineralógicos, presentó mayor porcentaje de cuarzo e illita y en menor proporción jarosita y montmorillonita, detallados en la Tabla 6-52.

Tabla 6-52. Análisis mineralógico en muestra compuesta del DDM Suroeste

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado (%)
Cuarzo	SiO_2	47
Illita	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})]$	43
Jarosita	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	2
Montmorillonita	$(\text{Na}, \text{Ca})_0.3(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$	2
Clorita (Clinocoro)	$(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	2
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	< L.D.
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$	< L.D.
Pirita	FeS_2	< L.D.

Fuente: Informe de ensayo N.º IL-001MI-732 Bizalab



k) Biodisponibilidad de metales - Tessier

En la Figura 6-195 se observa que el material proveniente del DDM Suroeste presentó concentraciones de manganeso asociadas a la fracción 1 (intercambiable). En cuanto a los analitos que se encuentran en la fracción 2 (enlazados a carbonatos) se tiene al cobalto, cobre, manganeso, hierro, níquel, plomo y zinc.

En lo referente a los metales que se encuentran en la fracción 3 (enlazados a oxi-hidróxidos de Fe y Mn) tenemos a cobre, manganeso, hierro, níquel y plomo. En la fracción 4 (enlazada a materia orgánica) se registraron cobalto, cobre, manganeso, hierro, níquel, plomo y zinc. Por otro lado, en la fracción 5 (minerales primarios y secundarios) se encontraron todos los metales que forman parte de la metodología de Tessier, siendo el hierro y cobre los que registraron mayor concentración (Figura 6-195).

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

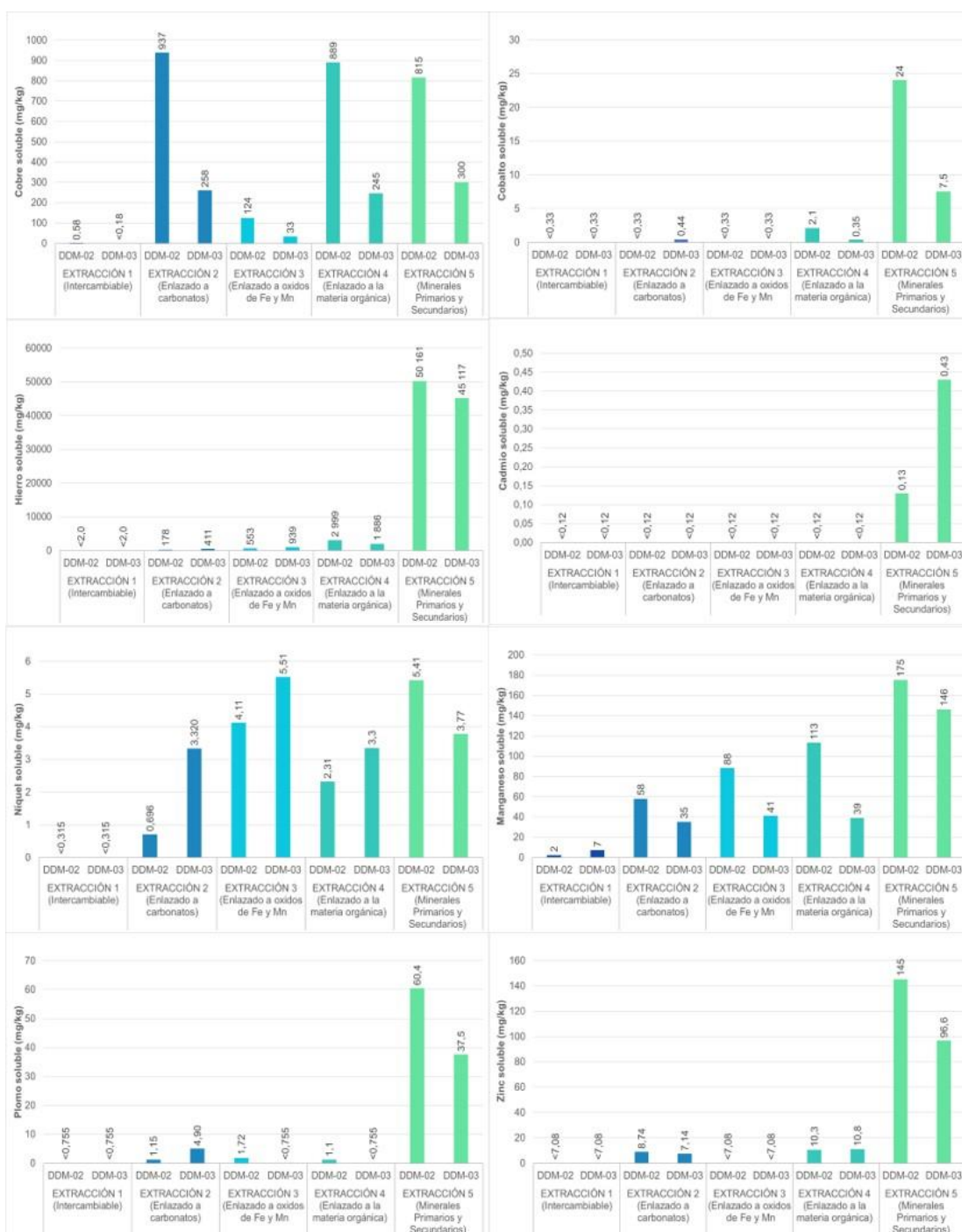


Figura 6-195. Extracción secuencial de metales según la metodología de Tessier en muestras del DDM Suroeste - zona VI

I) Lixiviación de metales - SPLP

En la Figura 6-196 se muestra que a las condiciones de la prueba SPLP la muestra analizada lixivia principalmente calcio, azufre. Asimismo, el bario, boro, cadmio, cobalto, cobre, estroncio, magnesio, manganeso, molibdeno, potasio, sílice, sodio y titanio. Cabe precisar que los demás analitos no mencionados se encontraron por debajo del límite de detección del método de ensayo del laboratorio.

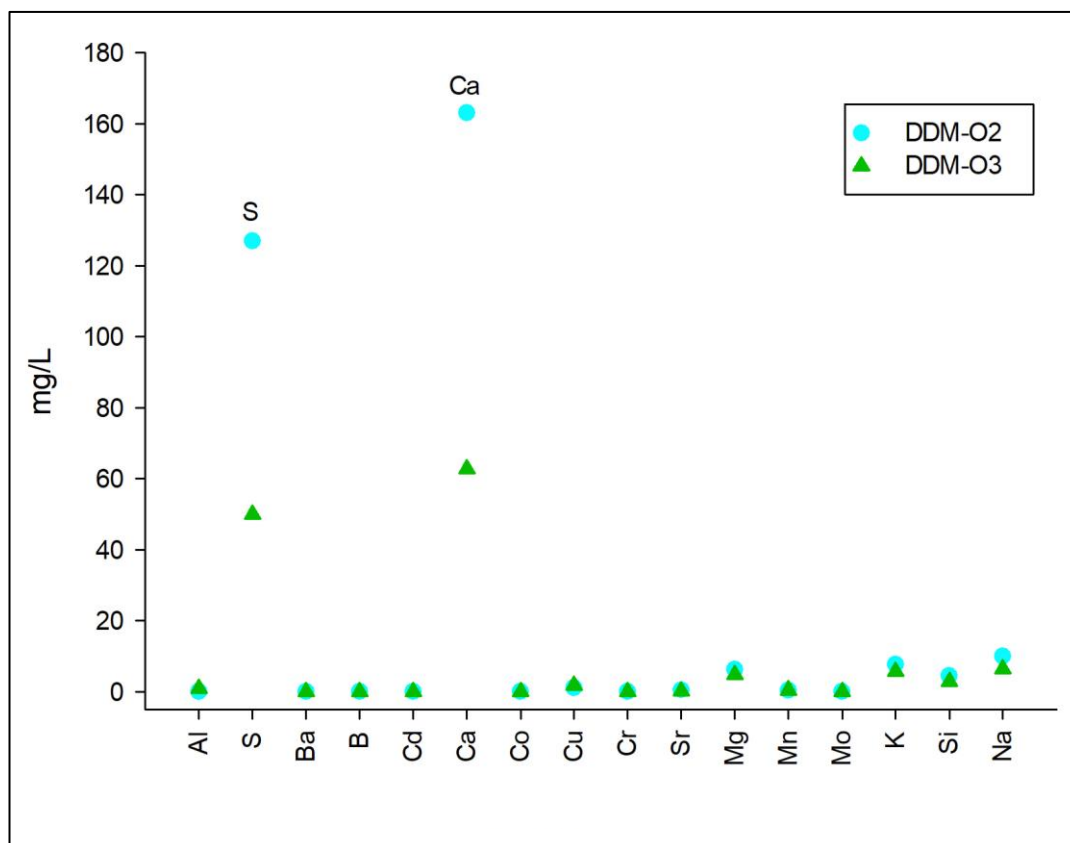


Figura 6-196. Prueba de lixiviación de metales solubles SPLP en muestras del DDM Suroeste – zona VI

m) Lixiviación de metales - SFE

En la Tabla 6-53 se presenta los resultados de la prueba SFE (prueba de lixiviación para aniones) para el punto de muestreo compuesto denominado DDM-O3.

Tabla 6-53. Prueba SFE en muestra compuesta de DDM Suroeste

Parámetros	Unidad	DDM-O3
Bromuros	mg/l	<0,013
Cloruros	mg/l	36,18
Fluoruros	mg/l	0,632
Fosfatos	mg PO ₄ -P/l	<0,028
Nitratos	mg NO ₃ -N/l	1,327
Nitritos	mg NO ₂ -N/l	<0,0005
Sulfatos	mg/l	947,2

Fuente: Informe de ensayo N.º MA18100139 J. Ramón

6.3.5 Prospección geofísica

Se realizó un total de 17 líneas de tomografía geoelectrica, 8 en la Zona I, 6 en la Zona II y 3 en la Zona III, cuya distribución se observa en la Figura 6-197, el detalle de su ubicación y descripción se presenta en el Anexo 4.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

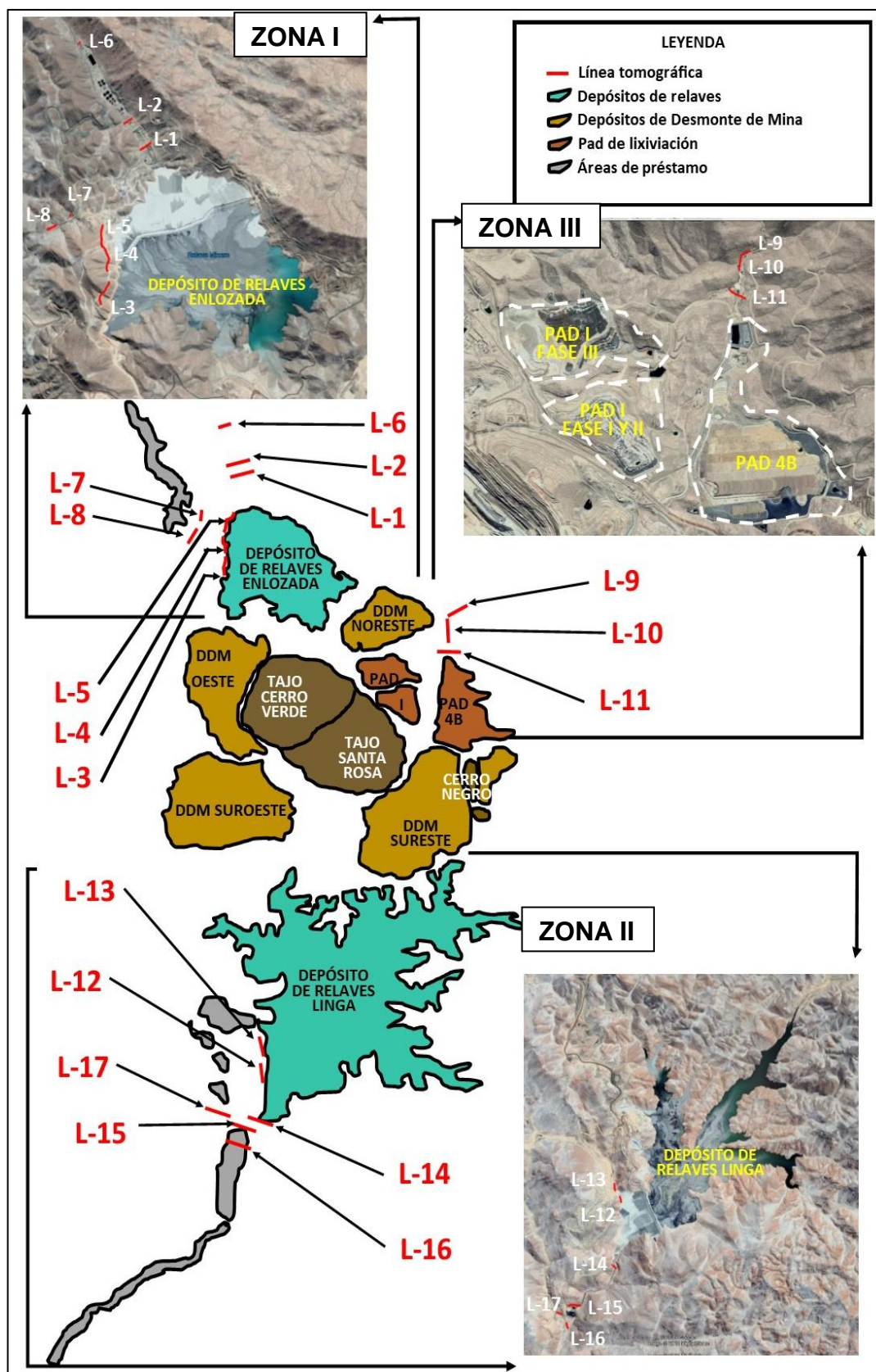


Figura 6-197. Ubicación de las líneas tomográficas en las zonas I, II y III de evaluación



6.3.5.1 Zona I: Depósito de relaves Enlozada

En esta zona se realizó 8 líneas tomográficas distribuidas de la siguiente manera:

- Al norte del depósito de relaves Enlozada 3 líneas tomográficas: 1 ubicada aguas arriba (L-1) y 2 aguas abajo del *seepage*⁴⁴ Enlozada (L-2 y L-6).
- Al oeste del depósito de relaves Enlozada en el estribo izquierdo 5 líneas tomográficas: 3 aledañas al depósito (L-3, L-4 y L-5) y 2 aledañas a la carretera Panamericana Sur (L-7 y L-8).

A continuación, se describen las interpretaciones obtenidas a partir de los perfiles de tomografía geoeléctrica de esta zona.

a. Tomografía geoeléctrica L-1

Ejecutada aguas arriba del *seepage* Enlozada, con una longitud de 190 m, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 40 m.

En la Figura 6-198 se presenta la sección de la línea donde se observa que en el margen izquierdo del perfil y a una distancia de 25 m, se muestra una gran zona con existencia de agua o humedad cuyos valores de resistividad van de 7,9 $\Omega\text{hm.m}$ a 106 $\Omega\text{hm.m}$, y en algunas zonas con probable existencia de lixiviados; (valores de resistividad de 0,1 $\Omega\text{hm.m}$ a 7,9 $\Omega\text{hm.m}$). Esta estructura se extiende en forma horizontal a lo largo de la sección (profundidad de 28 m).

De igual modo se muestran otras filtraciones a lo largo del perfil (casi superficiales), a distancias de 50 m, 97 m, 120 m, 127 m, y 160 m.

44

La denominación «*seepage*» es equivalente a «sumidero de colección de filtraciones».

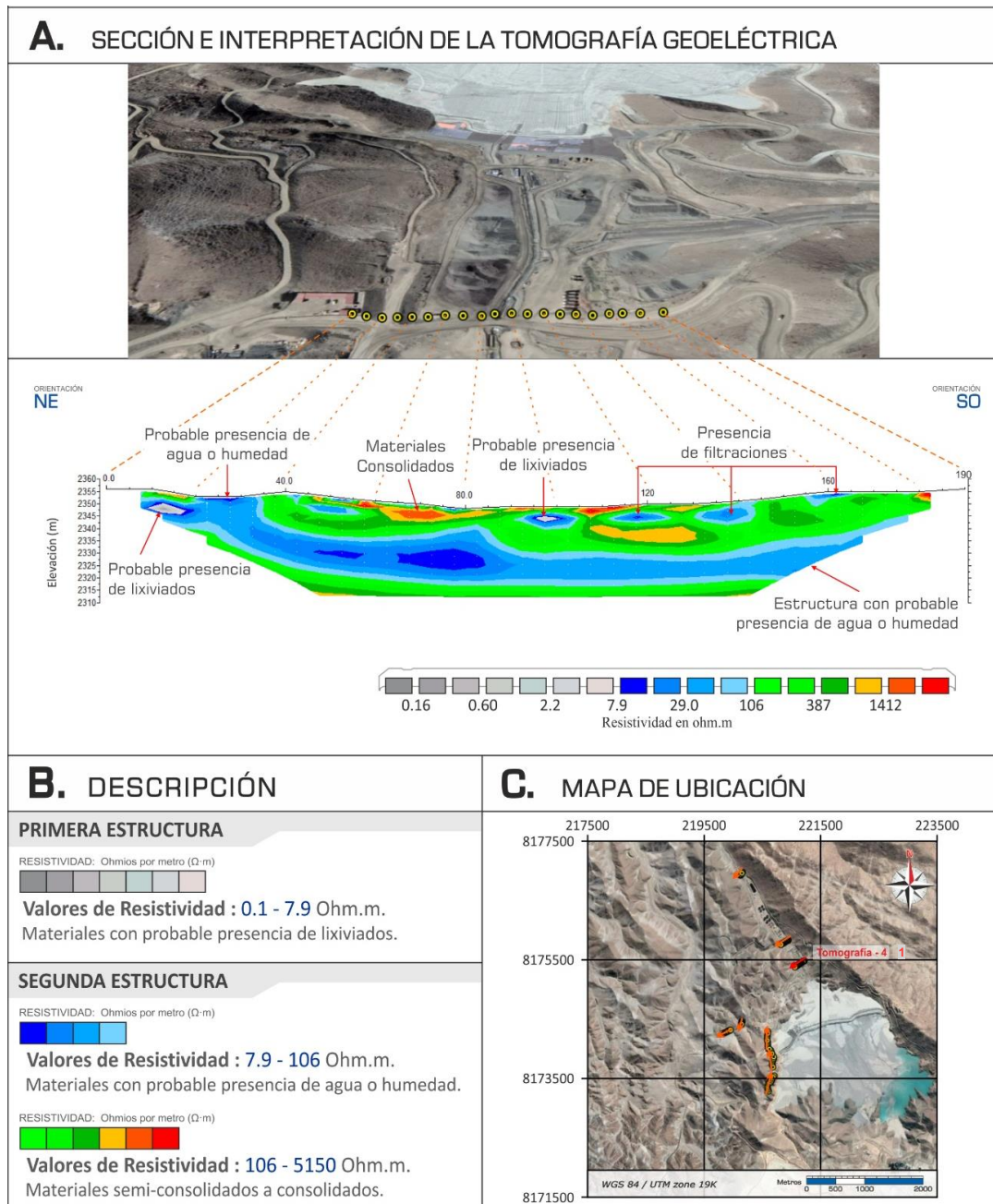


Figura 6-198. Sección de la línea tomográfica L-1

b. Tomografía geoelectrica L-2

Ejecutada aguas abajo del *seepage* Enlozada, con una longitud de 130 m, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 40 m.

En este perfil a una distancia de 10 m, 27 m, 45 m, 72 m se presentan zonas con valores de resistividad bajos de 0,44 $\Omega m.m$ a 12,5 $\Omega m.m$, que indicarían probable existencia de lixiviados, cuyas profundidades están en el orden de 3 m, 5 m, 10 m, 15 m, respectivamente (Figura 6-199). Esta zona con estas características se presenta en forma horizontal (en forma transversal a la quebrada).

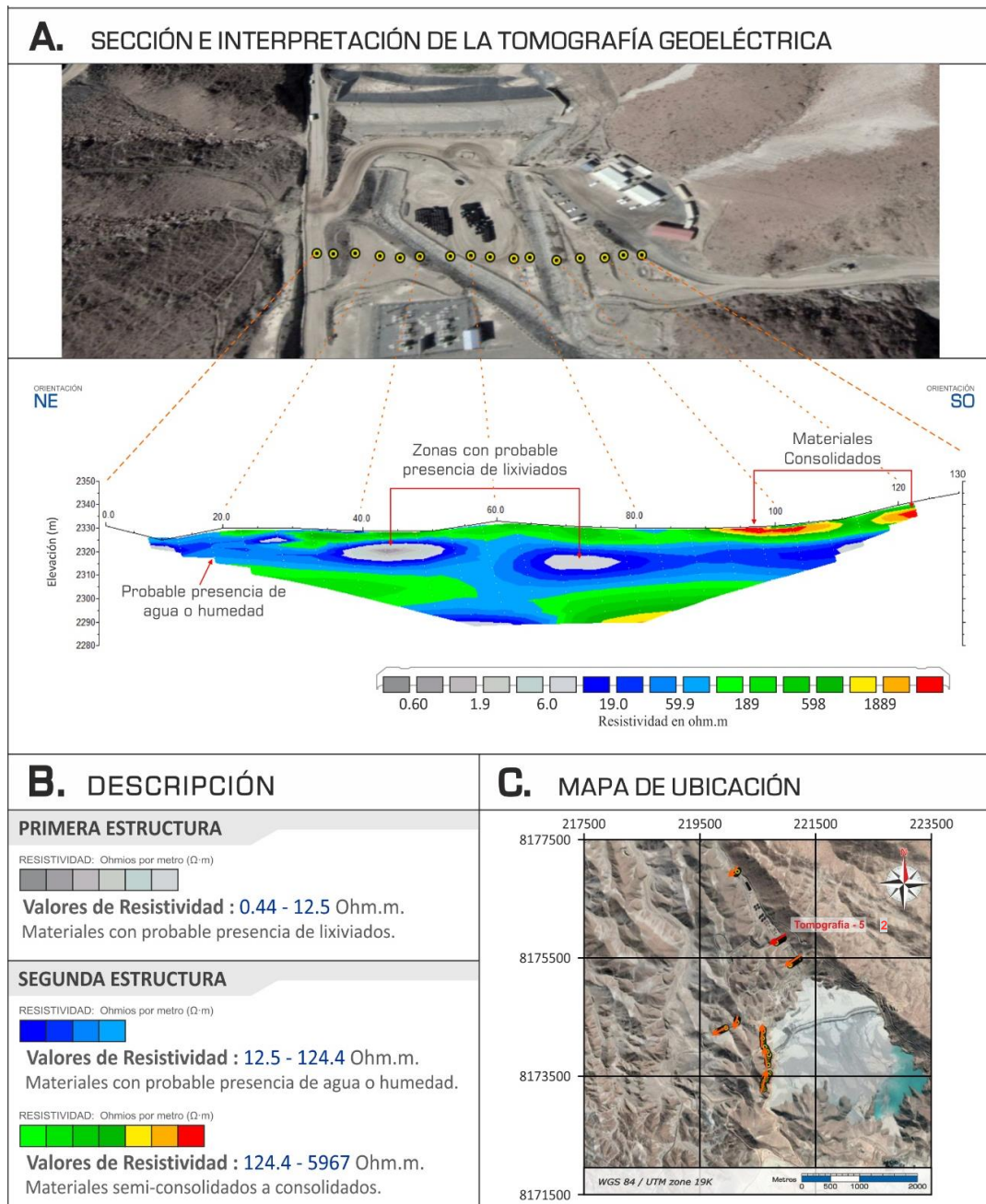


Figura 6-199. Sección de la línea tomográfica L-2

c. Tomografía geoelectrica L-6

Ubicada al noroeste del depósito de relaves Enlozada, cercano a la garita Halcón 21, con una longitud de 60 m, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 40 m.

En la Figura 6-200 se presenta el perfil que muestra en profundidad una zona con valores de resistividad de 0,73 $\Omega m.m$ a 10 $\Omega m.m$. Esta zona se presenta a una profundidad promedio de 5 m, con una extensión en forma longitudinal de 25 m.

De igual modo al contorno de esta zona se presenta otra zona con valores de resistividad de 10 $\Omega m.m$ a 87,9 $\Omega m.m$, que indicarían presencia de agua o humedad.

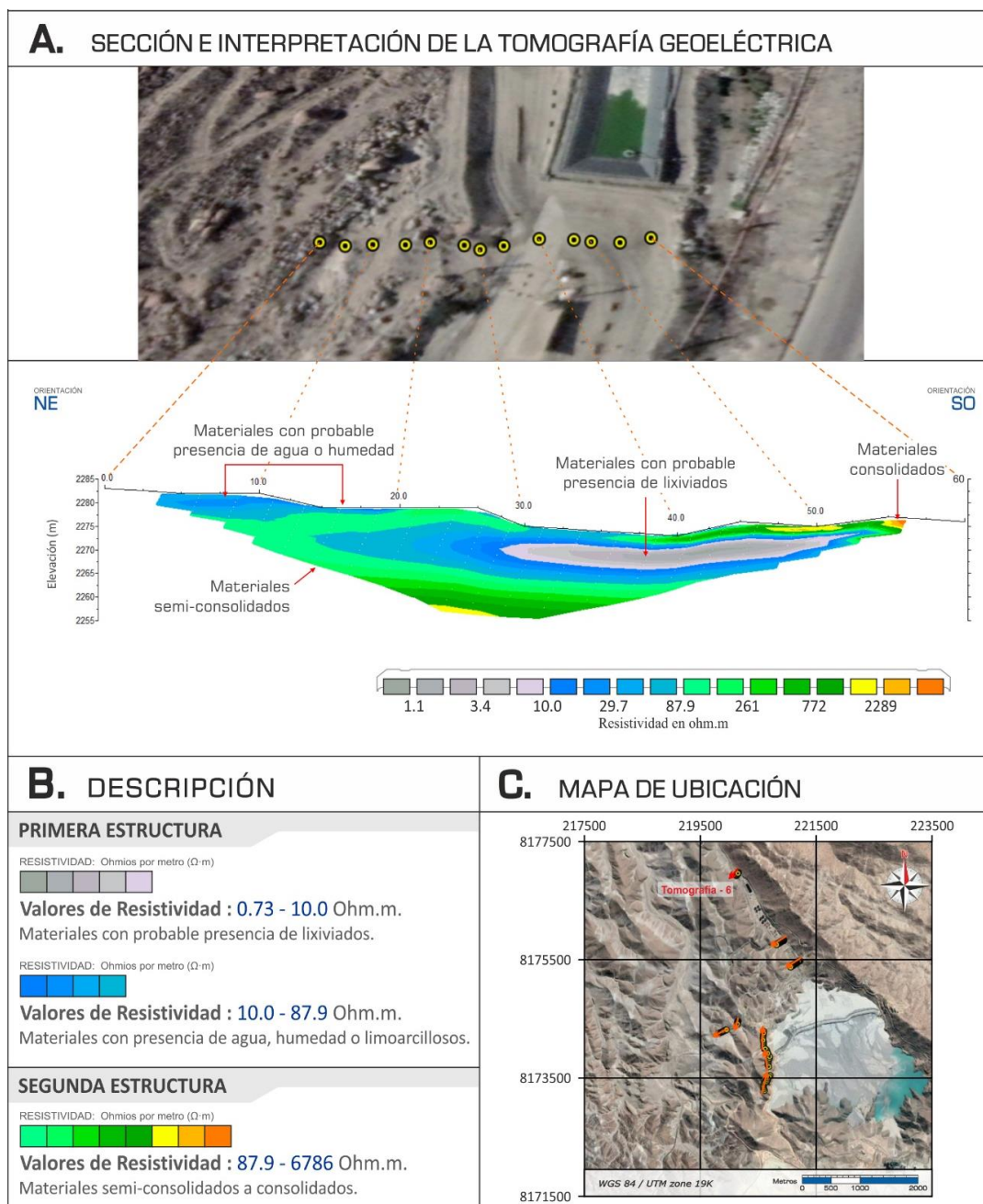


Figura 6-200. Sección de la línea tomográfica L-6

d. Tomografía geoelectrica – L-3

Esta sección se ubicó en el estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada, con una longitud de 330 m, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 130 m (Figura 6-201).

En esta sección, a una distancia de 150 m del perfil y a una profundidad promedio de 80 m, se muestra una zona con valores de resistividad (136 $\Omega m.m$ a 230 $\Omega m.m$), que indicarían existencia de agua o humedad.

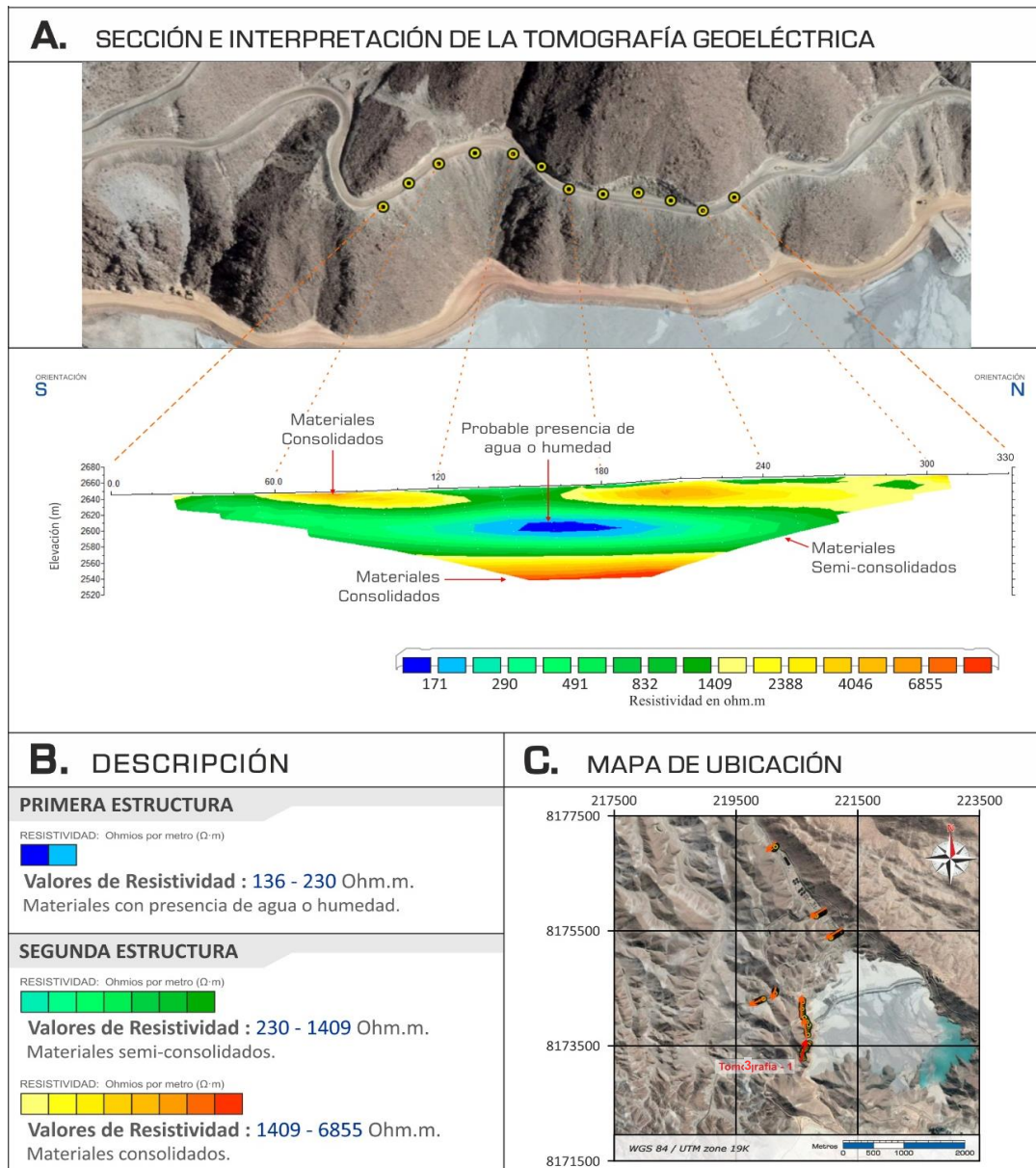


Figura 6-201. Sección de la línea tomográfica L-3

e. Tomografía geoelectrica – L-4

Ubicada en el estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada, con una longitud de 390 m, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 130 m (Figura 6-202).

Esta sección, a una distancia de 240 m del perfil y a una profundidad promedio de 70 m, se muestra una zona con valores bajos de resistividad (4,8 $\Omega \cdot m$ a 10,7 $\Omega \cdot m$), cuyos valores indicarían una probable filtración de lixiviados y con existencia de agua o humedad (valores de resistividad de 10,7 $\Omega \cdot m$ a 153 $\Omega \cdot m$).

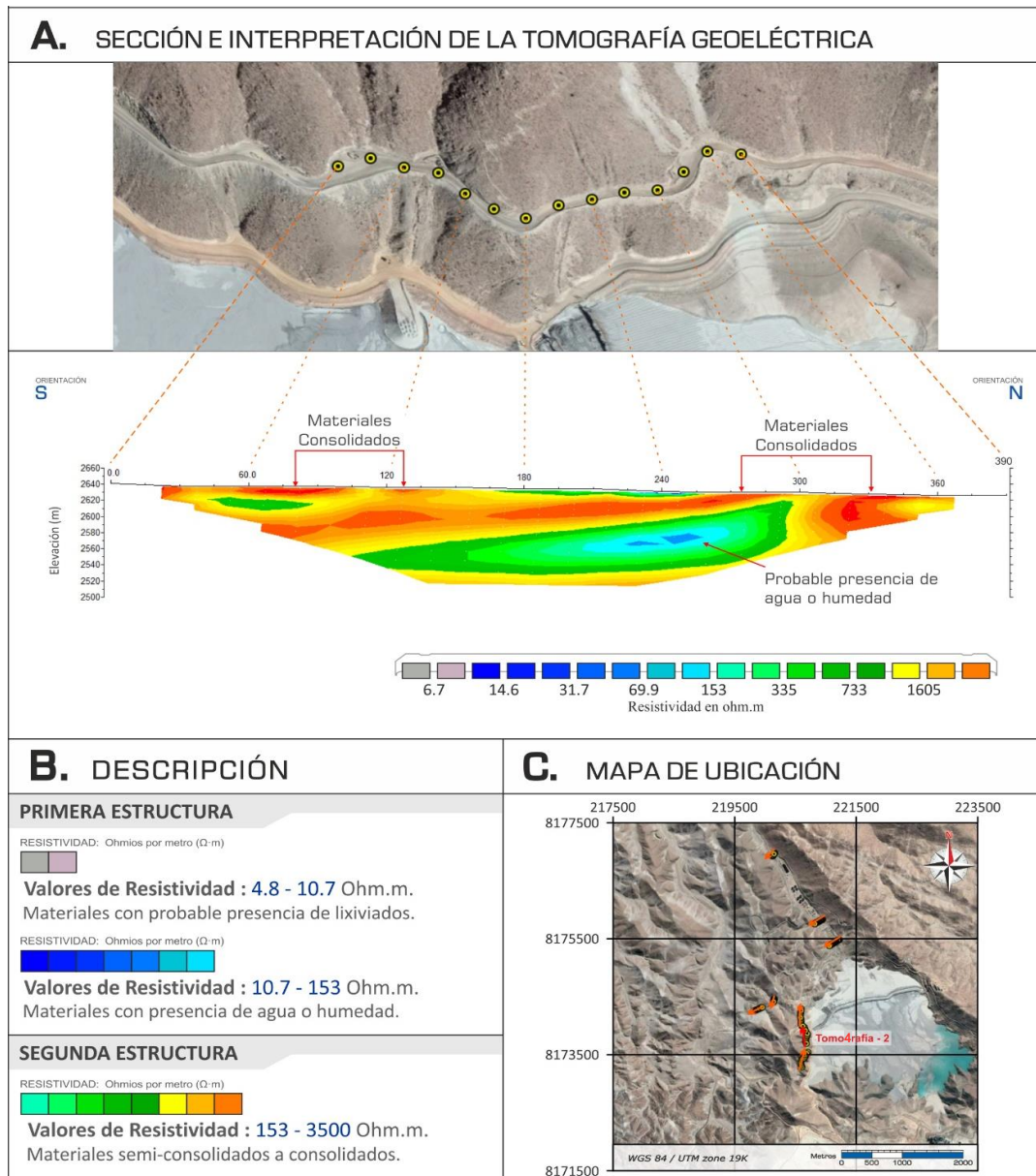


Figura 6-202. Sección de la línea tomográfica L-4

f. Tomografía geoeléctrica – L-5

Ubicada en el estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada, con una longitud de 300 m, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 130 m (Figura 6-203).

En este perfil, a una distancia de 30 m del perfil y una profundidad promedio de 25 m se presenta una zona, con valores de resistividad de 9,2 $\Omega m.m$ a 214 $\Omega m.m$, cuyos valores indicarían probable existencia de agua o humedad. Esta estructura con estas características continúa en forma horizontal hacia la parte central del perfil.

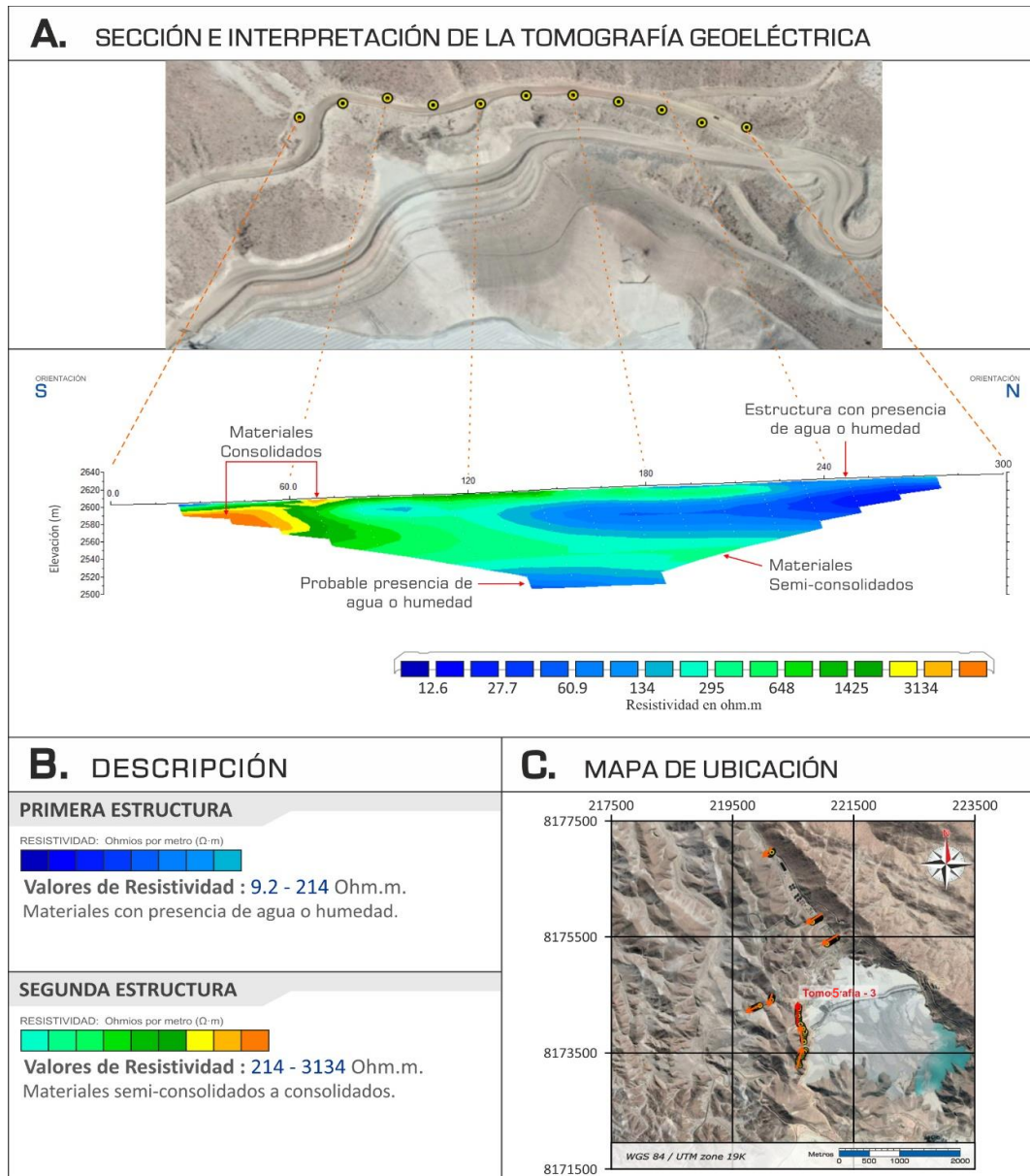


Figura 6-203. Sección de la línea tomográfica L-5

g. Tomografía geoelectrica L-7

Ubicada en el estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada, aledaña a la carretera Panamericana Sur, con una longitud de 55 m, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 20 m.

En la Figura 6-204 se muestra el perfil que en profundidad presenta una zona con filtraciones con valores de resistividad de 7,13 $\Omega \cdot m$ a 10 $\Omega \cdot m$, el cual indicaría probable presencia de lixiviados (en su parte central), asimismo esta zona está conformada con una estructura que presentan valores de resistividad de 10 $\Omega \cdot m$ a 93,3 $\Omega \cdot m$, que indicarían probable existencia de agua o humedad, esta zona se presenta a una profundidad promedio de 10 m, con una extensión en forma longitudinal de 35 m.

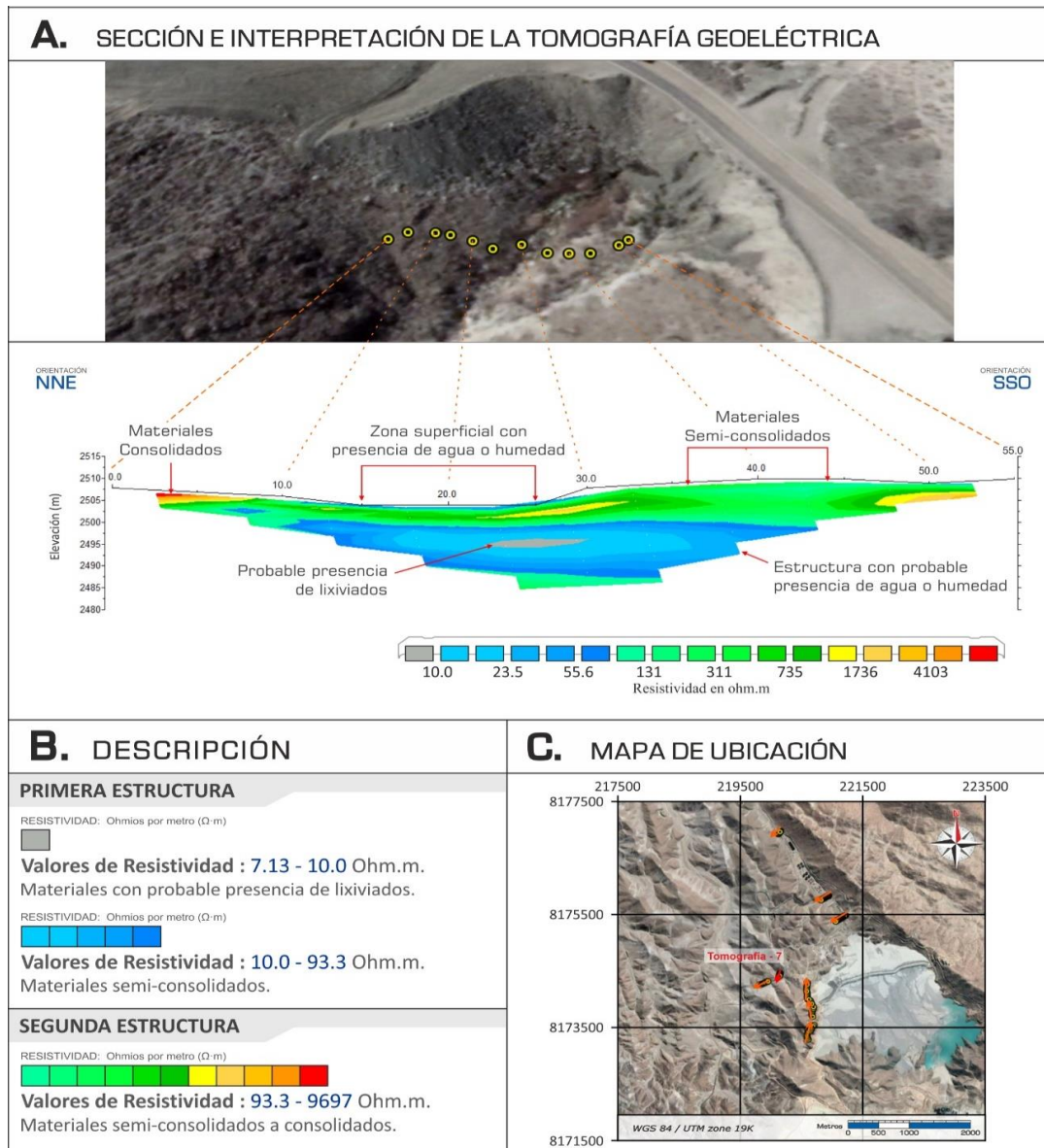


Figura 6-204. Sección de la línea tomográfica L-7

h. Tomografía geoelectrica L-8

Ubicada en el estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada, aledaña a la carretera Panamericana Sur, con una longitud de 150 m, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 50 m (Figura 6-205).

Este perfil muestra en el margen izquierdo una zona con valores de resistividad de 5,2 $\Omega m.m$ a 115 $\Omega m.m$ (distancia de 15 m y a una profundidad promedio de 10 m), que indicarían existencia de agua o humedad.

De igual modo al contorno de esta zona se presenta otra zona con valores de resistividad de 10 $\Omega m.m$ a 87,9 $\Omega m.m.$, que indicarían existencia de agua o humedad.

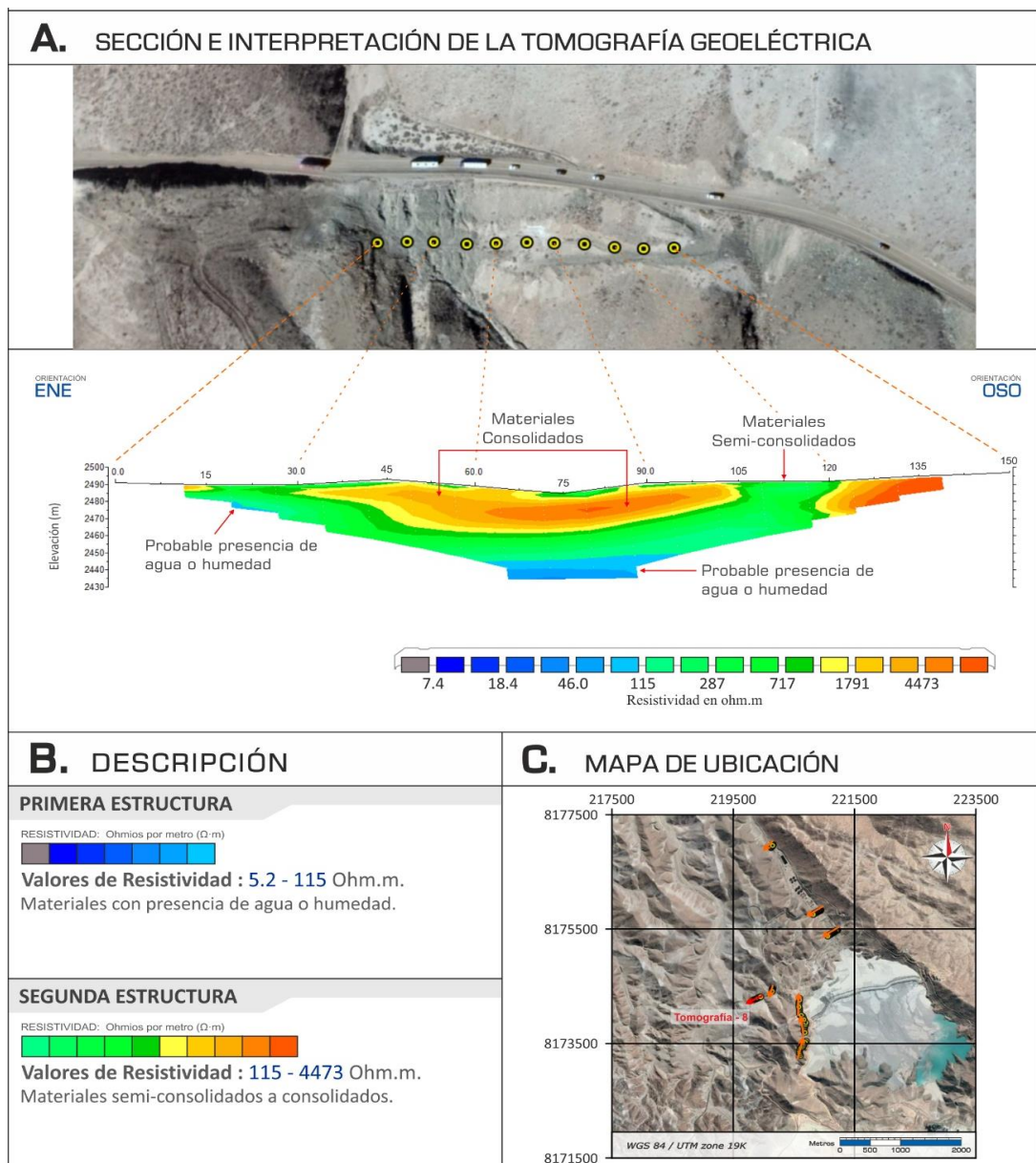


Figura 6-205. Sección de la línea tomográfica L-8

6.3.5.2 Zona II: Depósito de relaves Linga

En esta zona se realizaron 6 líneas tomográficas distribuidas de la siguiente manera:

- En el estribo derecho y al pie del depósito de relaves Linga 2 Líneas (L-12 y L-13)
- Al suroeste del depósito de relaves Linga, 1 línea ubicada cercana a la filtración F-22 (L-14).
- Seepage Linga, 2 líneas, aguas arriba (L-15) y aguas abajo (L-16).
- Al sur oeste del depósito relaves Linga, en la margen derecha del seepage Linga 1 línea (L-17).

A continuación, se describen las interpretaciones obtenidas a partir de los perfiles de tomografía geoelectrica de esta zona.

a. Tomografía geoeléctrica L-12

Ubicada en el estribo derecho y al pie del depósito de relaves Linga, con una longitud de 55 metros, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 20 m (Figura 6-206).

En el margen izquierdo del perfil (hasta una distancia de 20 m del perfil), se presenta una zona casi superficial con valores de resistividad de 9 $\Omega\text{m.m}$ a 89,4 $\Omega\text{m.m}$, cuyos valores indicarían probable existencia de agua o humedad. Los valores muy bajos de resistividad (de 2,64 $\Omega\text{m.m}$ a 9 $\Omega\text{m.m}$), indicarían probable existencia de lixiviados.

De igual modo se presenta otra zona superficial a una distancia de 25 m del perfil, (con las mismas características resistivas que la anterior zona), el cual se extiende en forma longitudinal hacia el lado derecho y continúa en profundidad.

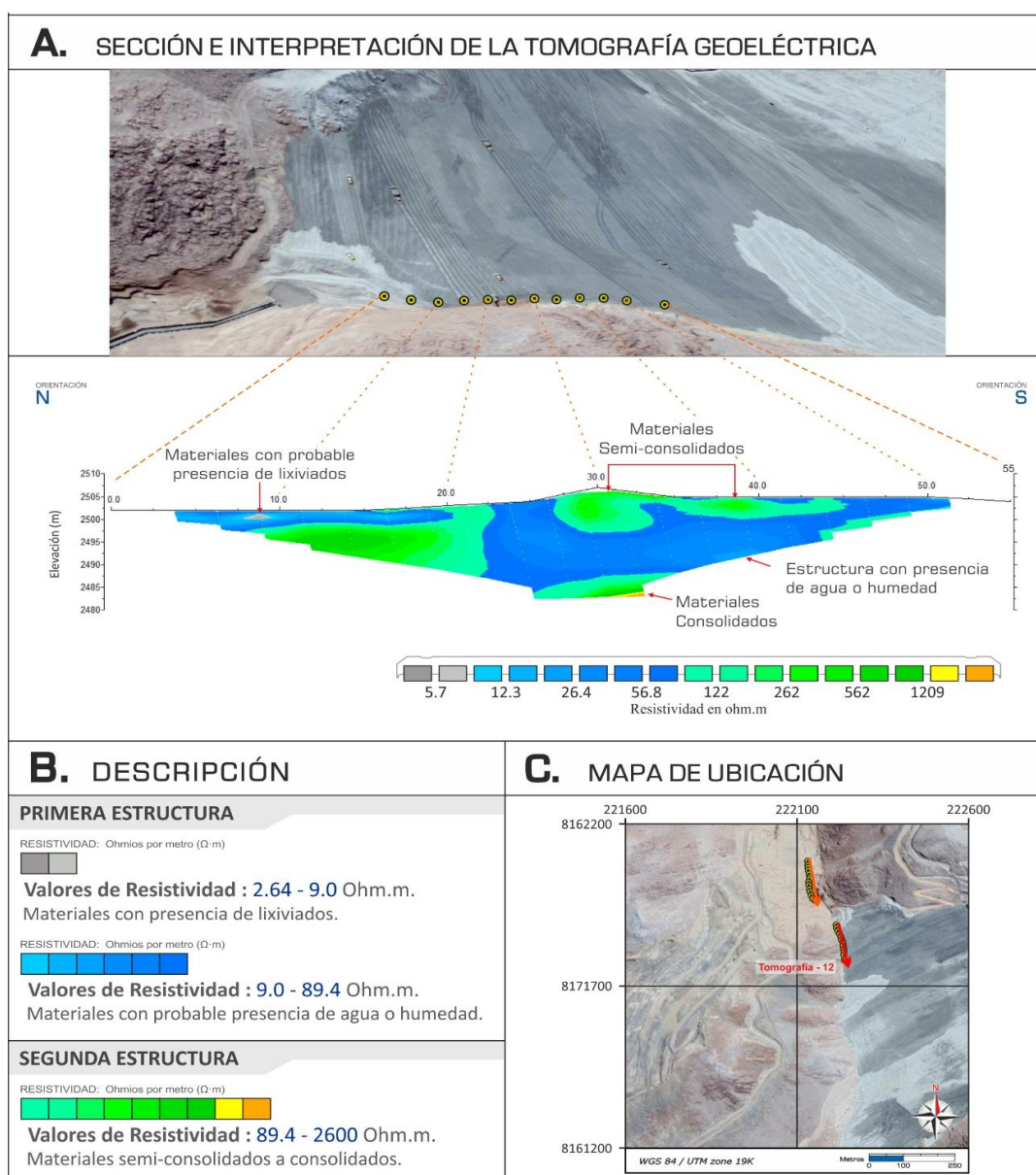


Figura 6-206. Sección de la línea tomográfica L-12

b. Tomografía geoelectrica L-13

Ubicada en el estribo derecho del depósito de relaves Linga, cercano al Dren B-2, con una longitud de 130 m, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 40 m (Figura 6-207).

Este perfil, muestra en el margen izquierdo del perfil (distancia de 25 m del perfil), y a una profundidad promedio de 10 m, una zona (de forma ovalada) con valores bajos de resistividad; 29 Ω m.m a 157 Ω m.m, que indicarían la existencia de una filtración.

De igual modo se presenta otra zona, a una distancia de 60 m del perfil (profundidad de 5 m) y con las mismas características de resistividad que la anterior zona.

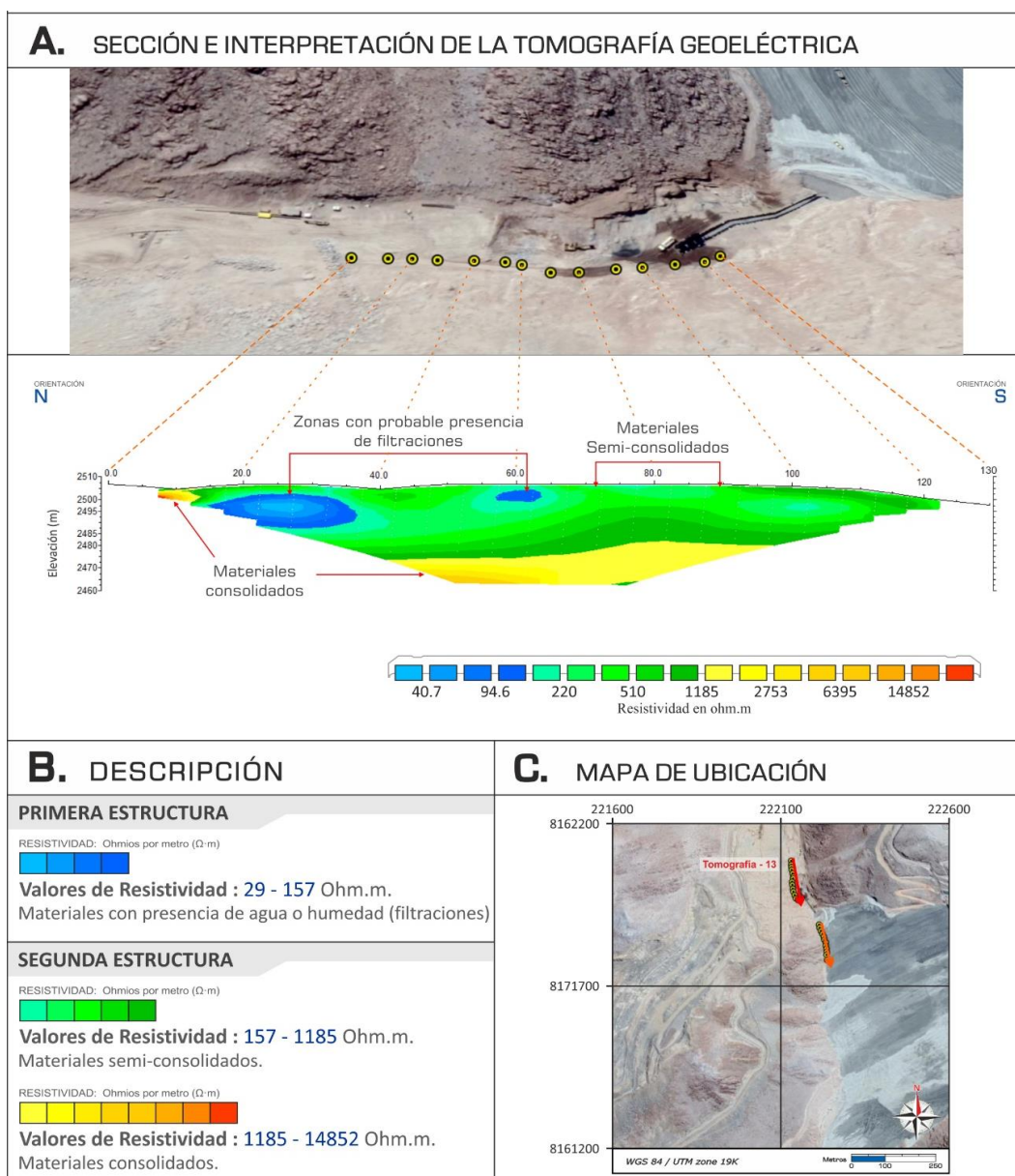


Figura 6-207. Sección de la línea tomográfica L-13

c. Tomografía geoelectrica L-14

Ubicada al suroeste del depósito de relave Linga, cercano al Dren B-1, con una longitud de 104 m, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 32 m.

Este perfil en toda su extensión superficial, muestra una zona con valores bajos de resistividad; 5,2 Ω m.m a 126,7 Ω m.m, cuyos valores indicarían presencia de agua o humedad. Los valores muy bajos de resistividad (5,2 Ω m.m), indicarían probable existencia de lixiviados. Esta estructura con estas características tiene un espesor promedio de 15 m (Figura 6-208).

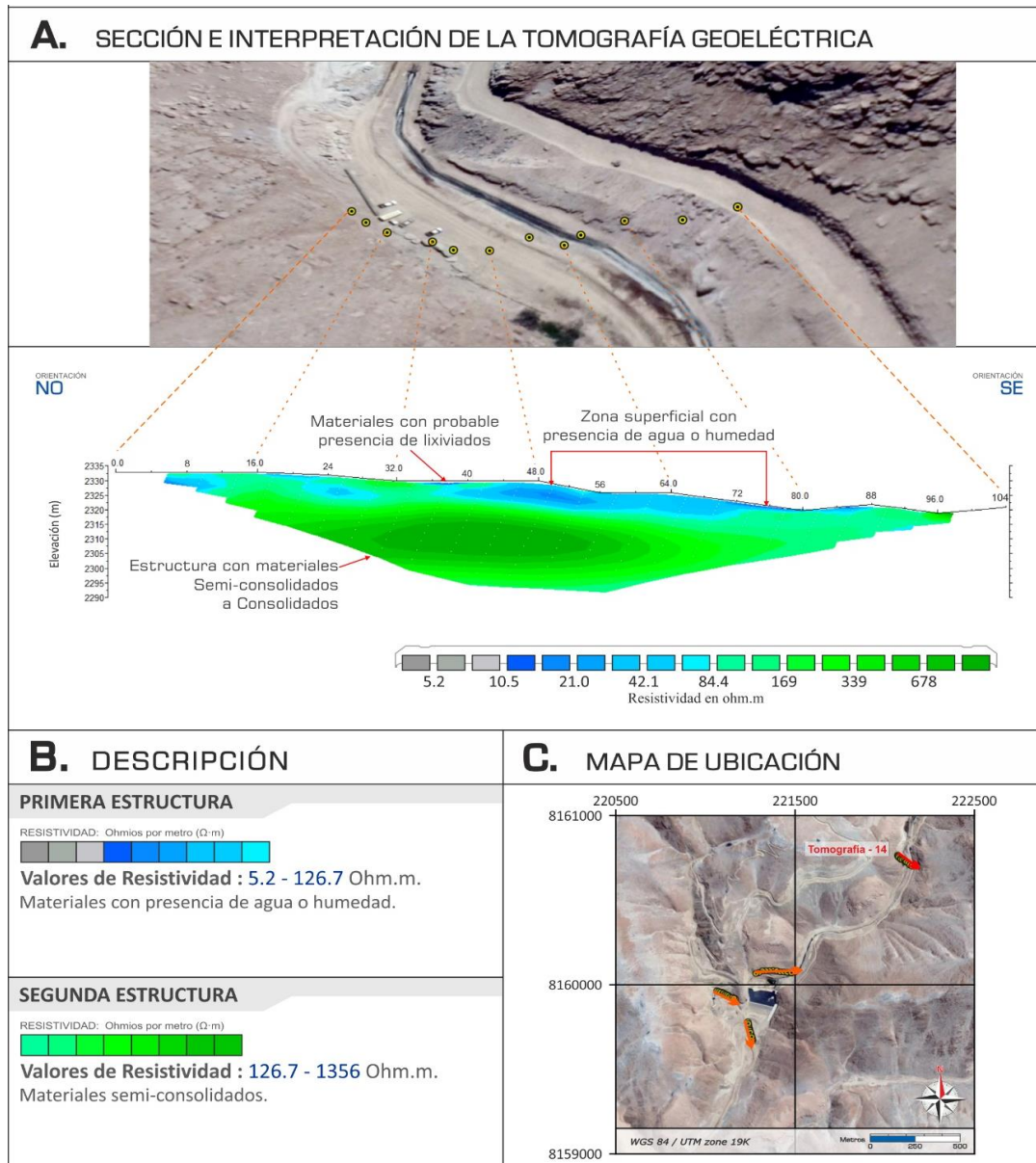


Figura 6-208. Sección de la línea tomográfica L-14

d. Tomografía geoelectrica L-15

Ubicada aguas arriba del *seepage* Linga, con una longitud de 220 m, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 80 m (Figura 6-209).

En el margen derecho del perfil (distancia de 160 m a 200 m del perfil), y a una profundidad promedio de 15 m, se presenta una estructura con valores bajos de resistividad; de 8,73 Ω m.m a 127 Ω m.m, cuyos valores indicarían existencia de agua o humedad. Esta estructura se presenta desde el margen derecho hacia la parte central del perfil y hasta una profundidad promedio de 40 m.

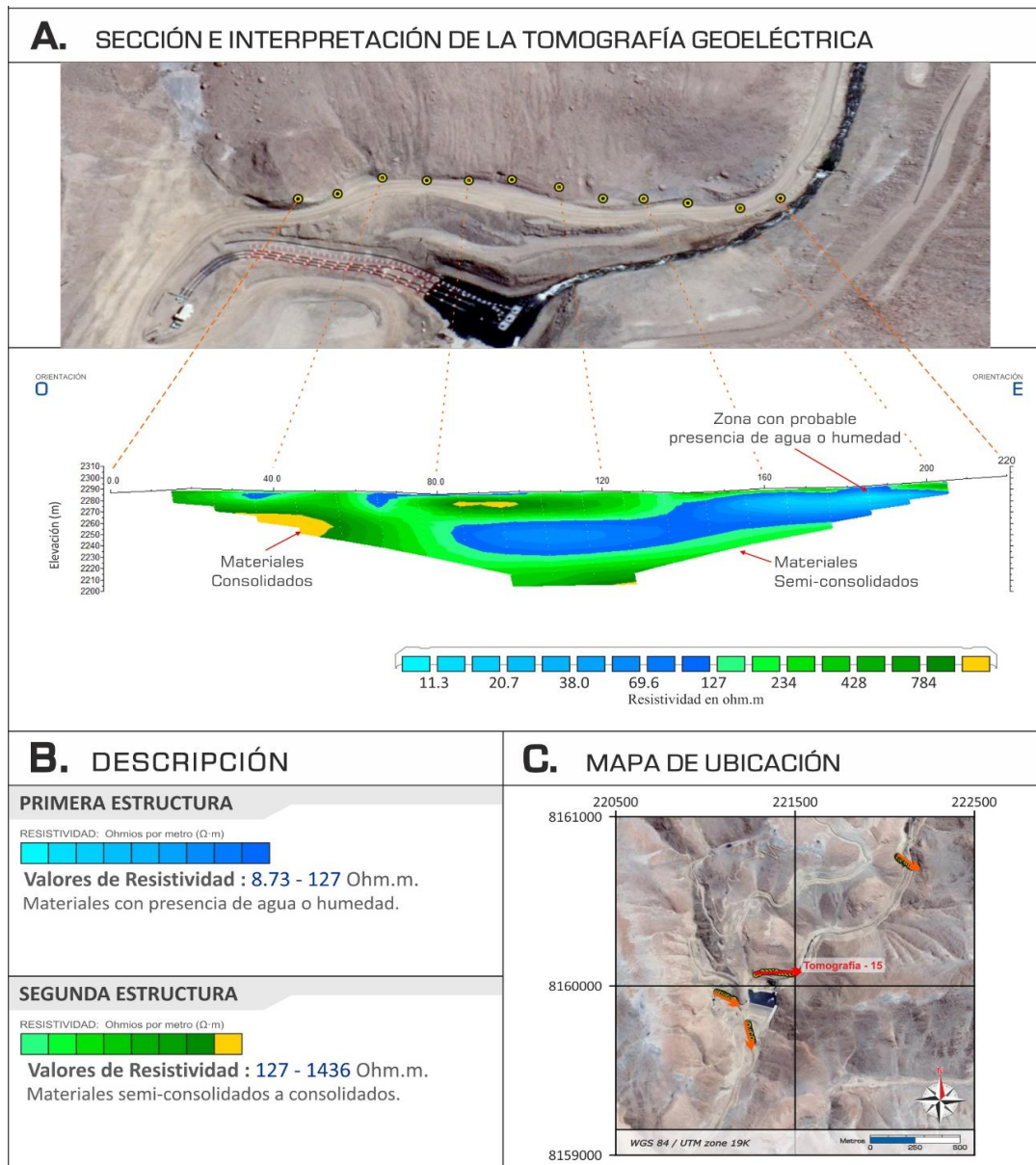


Figura 6-209. Sección de la línea tomográfica L-15

e. Tomografía geoelectrica L-16

Ubicada aguas abajo del *seepage* Linga, con una longitud de 110 m, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 40 m (Figura 6-210).

Esta sección muestra una zona intermedia en forma longitudinal, el cual se presenta a una profundidad promedio de 10 m y con un espesor promedio de 20 m, con valores bajos de resistividad de 8,8 $\Omega m.m$ a 90,7 $\Omega m.m$, cuyos valores indicarían existencia de agua o humedad. Asimismo, presenta una zona central con valores muy bajos de resistividad (de 3,9 $\Omega m.m$ a 8,8 $\Omega m.m$), que indicarían probable existencia de lixiviados.

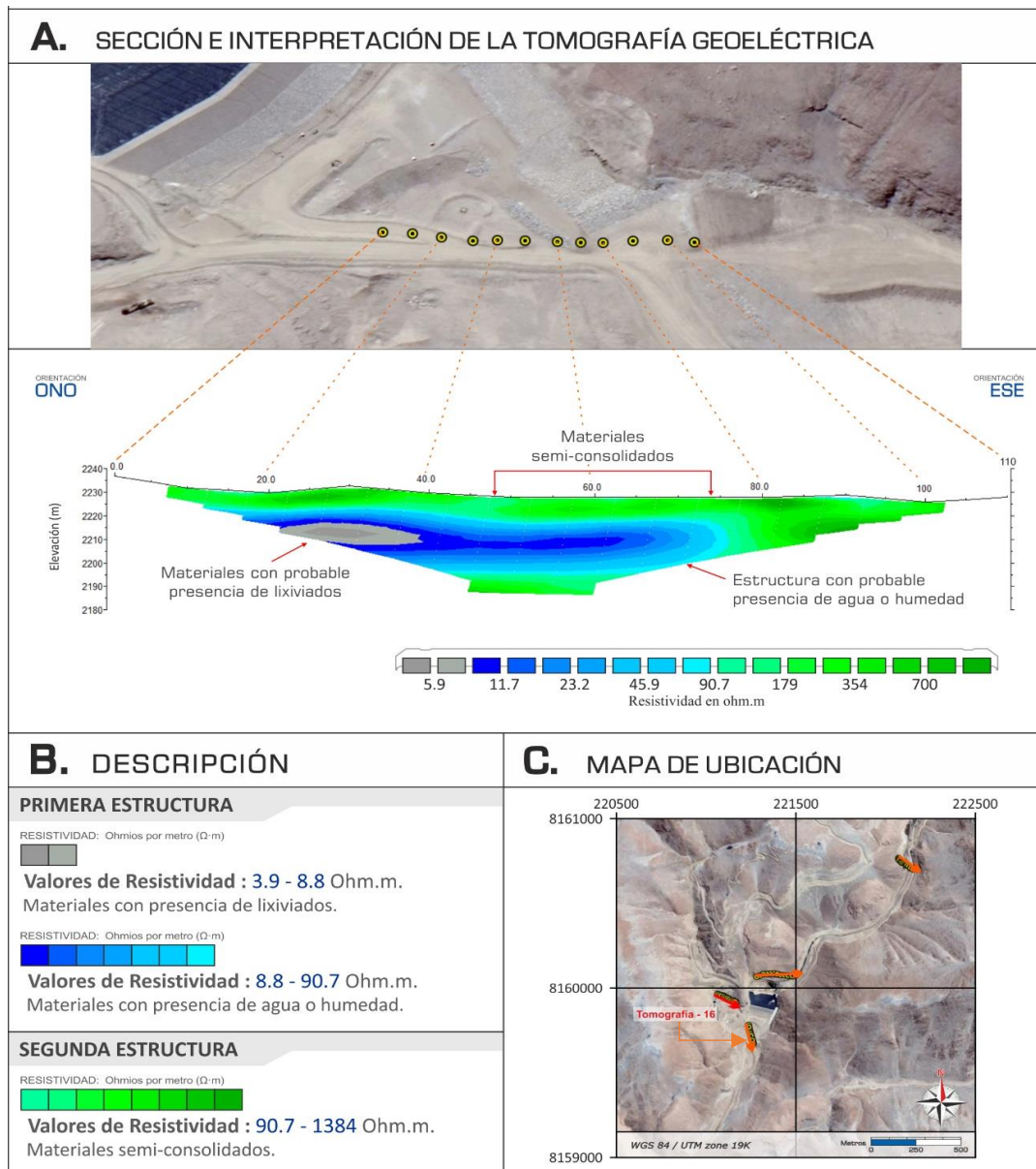


Figura 6-210. Sección de la línea tomográfica L-16

f. Tomografía geoelectrica L-17

Ubicada al sur oeste del depósito de relaves Linga y cercano al piezómetro ASB-55 (MAS-194), con una longitud de 110 m, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 40 m (Figura 6-211).

Este perfil, muestra una estructura a una profundidad promedio de 30 m (margen izquierdo del Perfil), con valores bajos de resistividad del orden de 3,6 $\Omega m.m$ a 10,45 $\Omega m.m$. cuyos valores indicarían probable existencia de lixiviados.

De igual modo a este nivel, se presenta otra estructura longitudinal con valores de resistividad de 10,45 $\Omega m.m$ a 125 $\Omega m.m$, que indicarían existencia de agua o humedad.

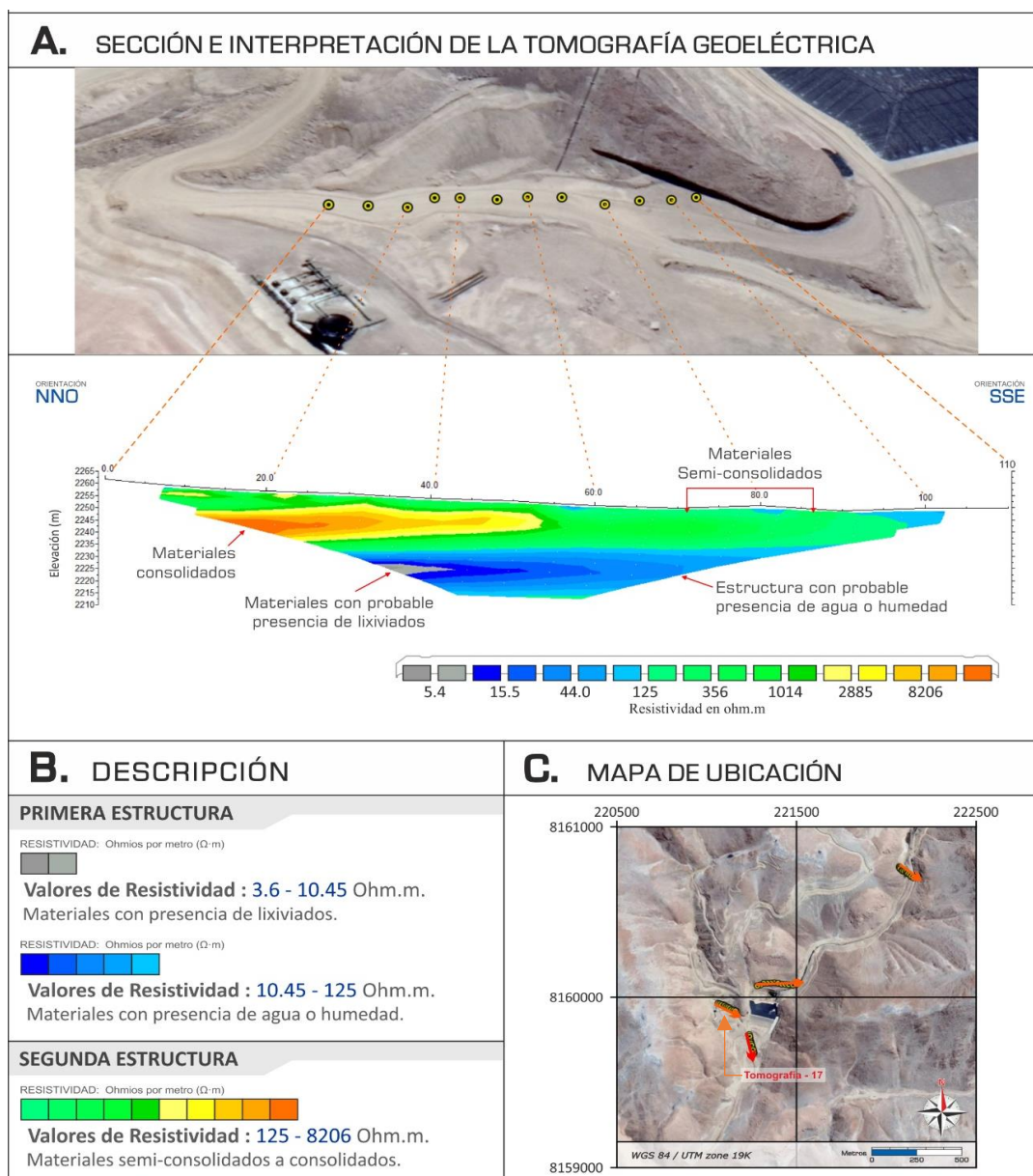


Figura 6-211.. Sección de la línea tomográfica L-16

6.3.5.3 Zona III: PAD, presa Huayrondo, tajos y DDM

En esta zona se realizaron 3 líneas tomográficas distribuidas de la siguiente manera:

- 1 línea aguas arriba de la presa Huayrondo (L-11)
- 2 líneas aguas abajo de la presa Huayrondo (L-9 y L-10)

A continuación, se describen las interpretaciones obtenidas a partir de los perfiles de tomografía geoelectrica de esta zona.

a. Tomografía geoelectrica L-11

Ubicada aguas arriba de la presa Huayrondo, con una longitud de 200 m, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 80 m (Figura 6-212).

Este perfil, en el margen izquierdo del perfil (hasta una distancia de 50 m del perfil), y a una profundidad promedio de 20 m, se presenta una zona con valores bajos de resistividad; de 16 $\Omega\text{m.m}$ a 124,6 $\Omega\text{m.m}$, cuyos valores indicarían probable existencia de agua o humedad.

De igual modo, se presenta otra zona casi superficial, (distancia de 90 m a 120 m), con las mismas características, el cual se extiende en forma longitudinal hacia el margen derecho del perfil.

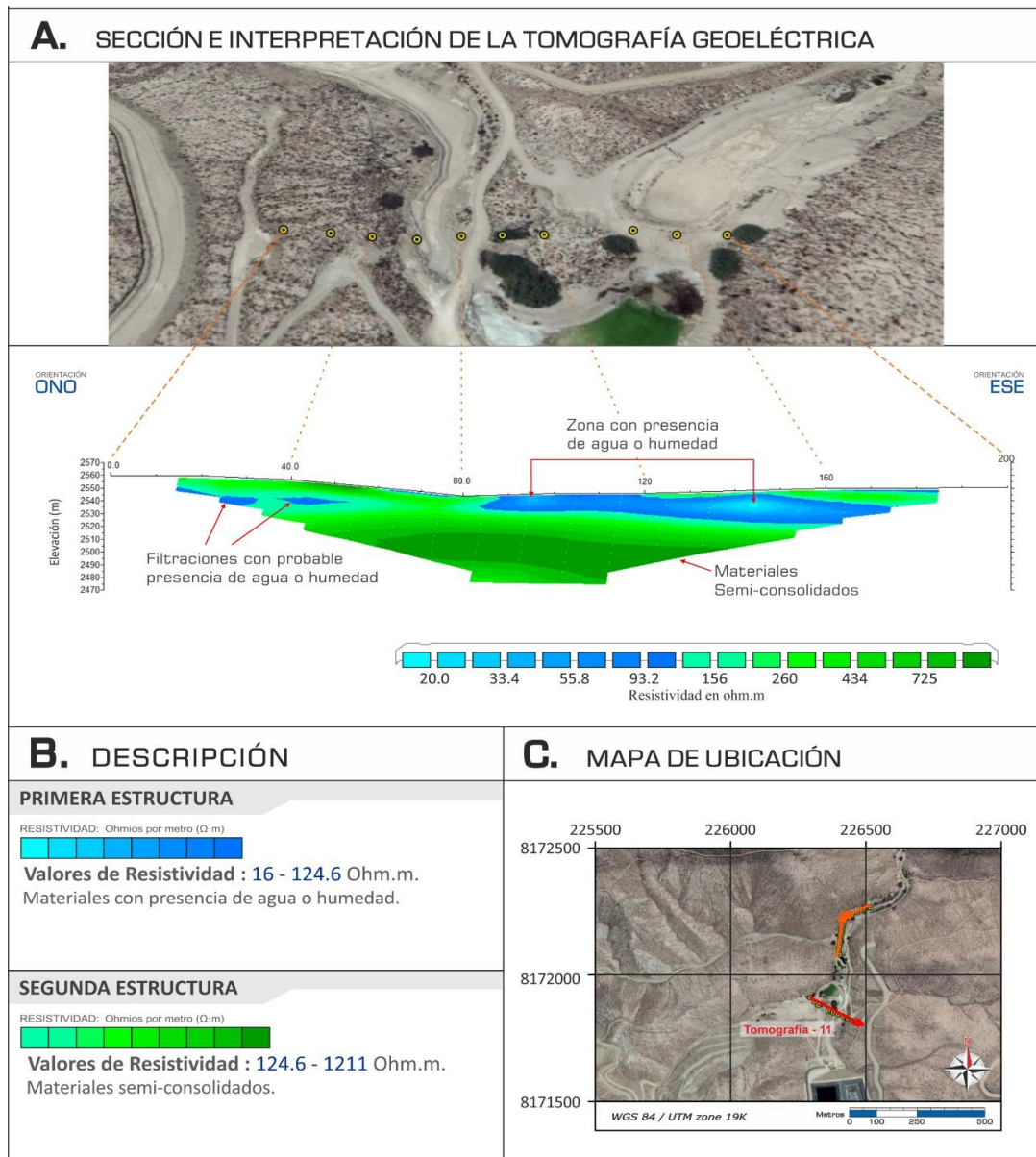


Figura 6-212. Sección de la línea tomográfica L-11

b. Tomografía geoelectrica L-10

Ubicada aguas abajo de la presa Huayrondo, con una longitud de 140 m, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 40 m (Figura 6-213).

En el margen izquierdo del perfil (distancia de 20 m del perfil), y a una profundidad promedio de 2 m, se presenta una estructura con valores bajos de resistividad; 8,1 $\Omega\text{m.m}$ a 126 $\Omega\text{m.m}$, cuyos valores indicarían existencia de agua o humedad. Esta

estructura con estas características se presenta a lo largo del perfil y en profundidad (profundidad de 40 metros).

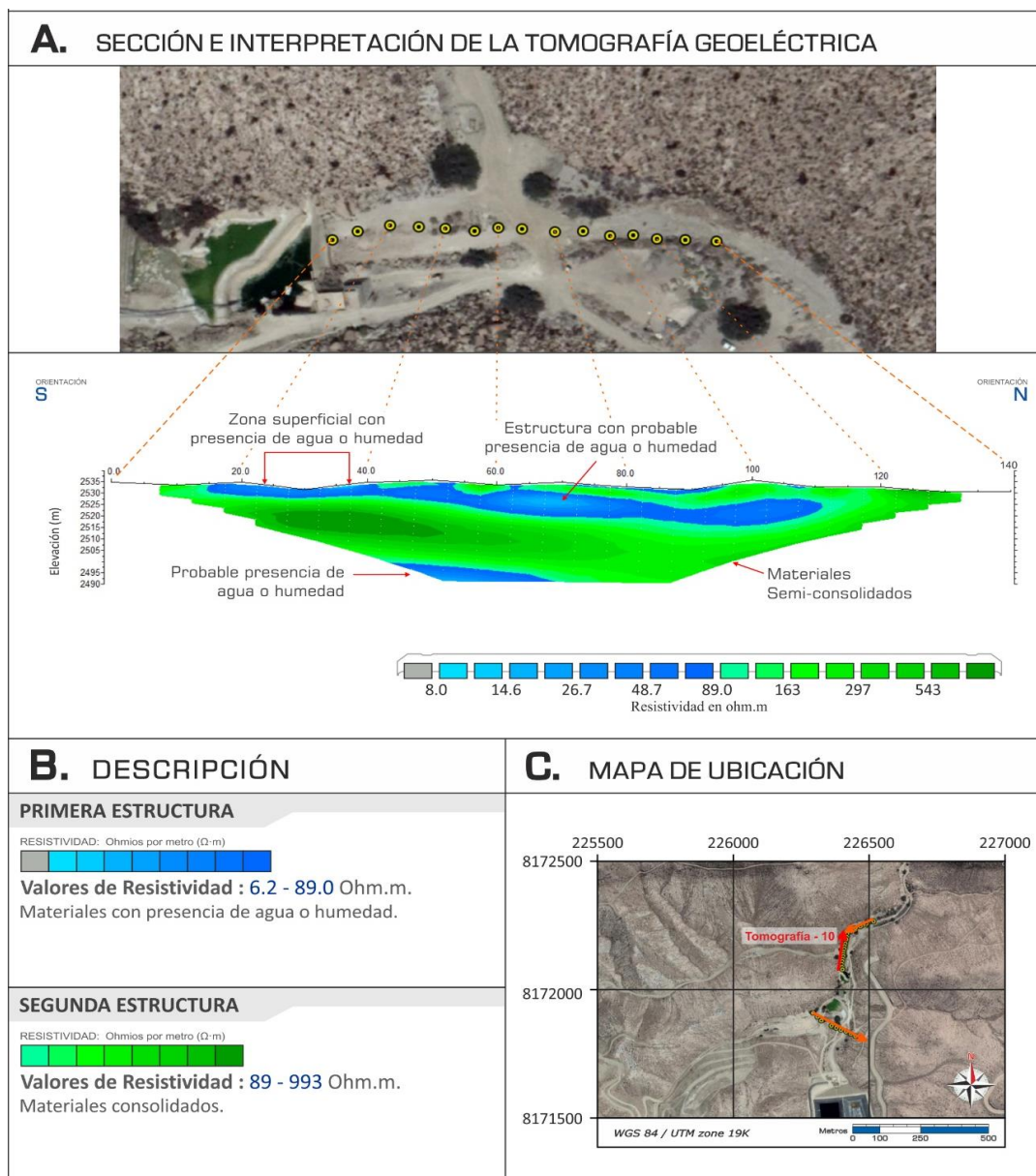


Figura 6-213. Sección de la línea tomográfica L-10

c. Tomografía geoelectrica L-9

Ubicada aguas abajo de la presa Huayrondo, cercana al piezómetro ASB-23 (S-5A), con una longitud de 40 m, alcanzando una profundidad promedio de investigación de 14 m (Figura 6-214).

Este perfil muestra una estructura casi superficial (profundidad promedio de 2 m), con valores bajos de resistividad; 5,5 $\Omega m.m$ a 9,9 $\Omega m.m$ cuyos valores indicarían probable existencia de lixiviados, además la presencia de otra zona con valores de resistividad de 9,9 $\Omega m.m$ a 104,8 $\Omega m.m$, con probable existencia de agua o humedad. Esta estructura se presenta a lo largo del perfil.

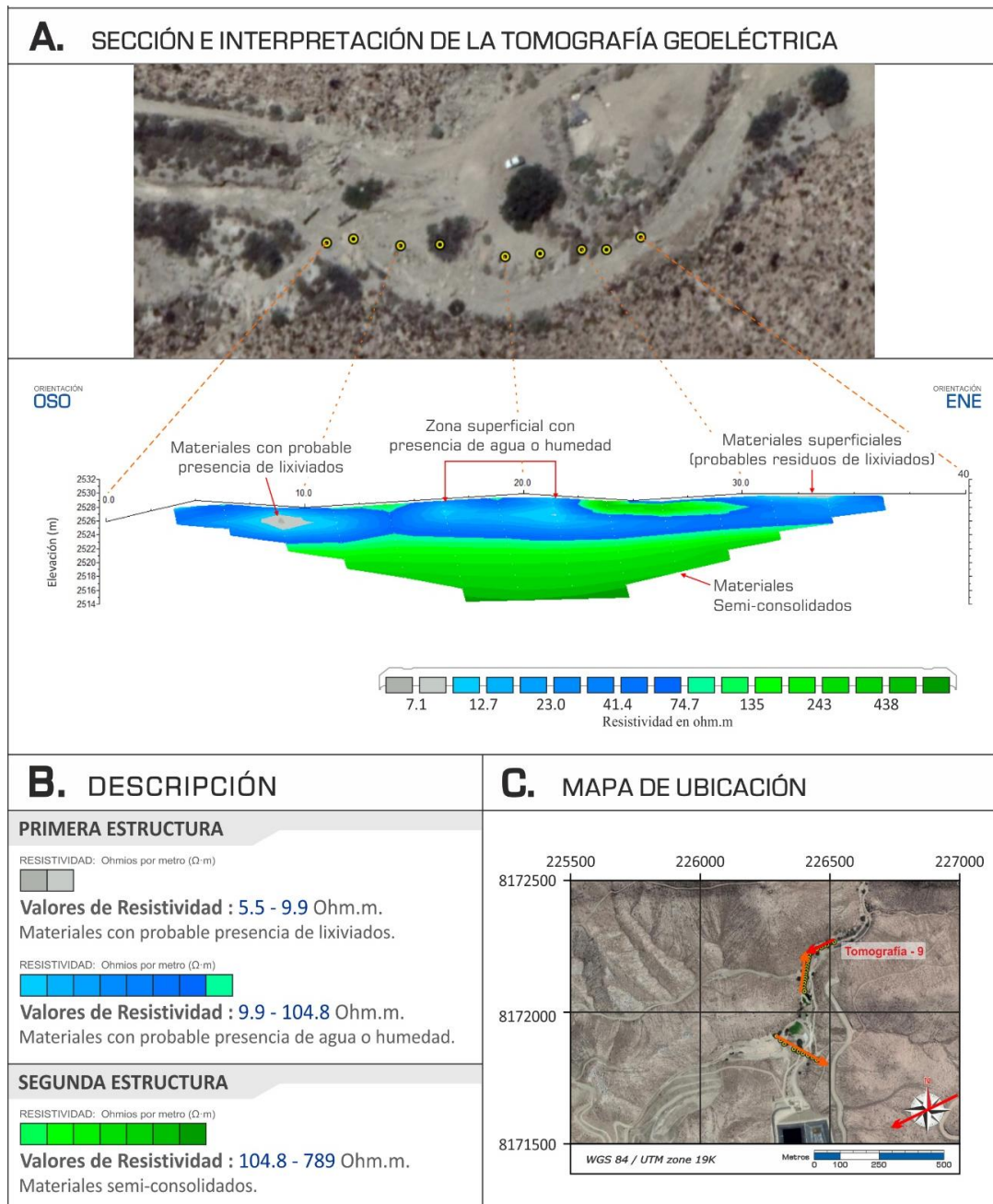


Figura 6-214. Sección de la línea tomográfica L-9

6.3.6 Hidroquímica

En esta sección se presenta la hidroquímica del agua subterránea en 4 zonas evaluadas, agua del sobrenadante de los depósitos de relaves y agua de recirculación de filtraciones en las zonas I y II.

6.3.6.1 Hidroquímica del agua subterránea

A continuación se detallan los resultados de la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas en 37 piezómetros de la zona I (48 muestras), 17 en la zona II (18 muestras), 13 en la zona III (23 muestras), y 5 en la zona IV (5 muestras).

**a. Parámetros de campo****Potencial de hidrógeno (pH)**

En las aguas subterráneas de la zona I, los valores de pH variaron entre 7,09 unidades de pH (ASB-08) y 9,56 unidades de pH (ASB-101), en la zona II variaron entre 6,77 unidades de pH (ASB-53) y 9,20 unidades de pH (ASB-116), en la zona III variaron entre 2,65 unidades de pH (ASB-16) y 8,08 unidades de pH (ASB-58), y en la zona IV variaron entre 6,84 unidades de pH (ASB-71) y 9,67 unidades de pH (ASB-63).

Temperatura

En las aguas subterráneas de la zona I, la temperatura varió entre 18,2 °C (ASB-91) y 26 °C (ASB-115), en la zona II varió entre 19,9 °C (ASB-111) y 25,3 °C (ASB-52), en la zona III varió entre 18,9 °C (ASB-25) y 24,1 °C (ASB-58), y en la zona IV varió entre 20,9 °C (ASB-71) y 23,6 °C (ASB-43).

Conductividad eléctrica

En las aguas subterráneas de la zona I, la conductividad eléctrica varió entre 620 µS/cm (ASB-110) y 7630 µS/cm (ASB-03), en la zona II varió entre 630 µS/cm (ASB-74) y 50900 µS/cm (ASB-40), en la zona III varió entre 729 µS/cm (ASB-21) y 30100 µS/cm (ASB-16), y en la zona IV varió entre 2500 µS/cm (ASB-43) y 2790 µS/cm (ASB-64).

b. Diagramas hidroquímicos

La información que proporcionaron los diagramas hidroquímicos se detalla a continuación:

✓ Diagrama de Stiff

Los diagramas de Stiff (Figuras 6-215 a 6-218) muestran que las concentraciones de iones mayoritarios (Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) en las aguas subterráneas de los piezómetros de las 4 zonas fueron desde 0 hasta 1600 meq-l y se dividieron en 4 rangos:

- De 0 a 20 meq-l: 16 muestras en la Zona I (ASB-02, ASB-46, ASB-78, ASB-85, ASB-90, ASB-91, ASB-92, ASB-101, ASB-102, ASB-106, ASB-107, ASB-108, ASB-109, ASB-110, ASB-113 y ASB-117), 5 muestras en la zona II (ASB-54, ASB-74, ASB-111, ASB-114 y ASB-116), 9 muestras en la zona III (ASB-20, ASB-21, ASB-24A, ASB-25, ASB-56, ASB-58, ASB-61, ASB-67 y ASB-68); y 1 muestra en la zona IV (ASB-63).

- De 0 a 70 meq-l: 22 muestras en la Zona I (ASB-03, ASB-05, ASB-08, ASB-14, ASB-15, ASB-26, ASB-78, ASB-79, ASB-80, ASB-82, ASB-83, ASB-94, ASB-95, ASB-96, ASB-97, ASB-98, ASB-99, ASB-103, ASB-112, ASB-115, ASB-118 y ASB-120), 3 muestras en la zona II (ASB-48, ASB-55 y ASB-119), 5 muestras en la zona III (ASB-17, ASB-19, ASB-23, ASB-60 y ASB-88); y 4 muestras en la zona IV (ASB-43, ASB-64, ASB-71 y ASB-75).

- De 0 a 700 meq-l: 5 muestras en la zona II (ASB-40, ASB-50, ASB-51, ASB-52, ASB-53) y 2 muestras en la zona III (ASB-22 y ASB-62).

- De 0 a 1600 meq-l: 1 muestra en la zona III (ASB-16).



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

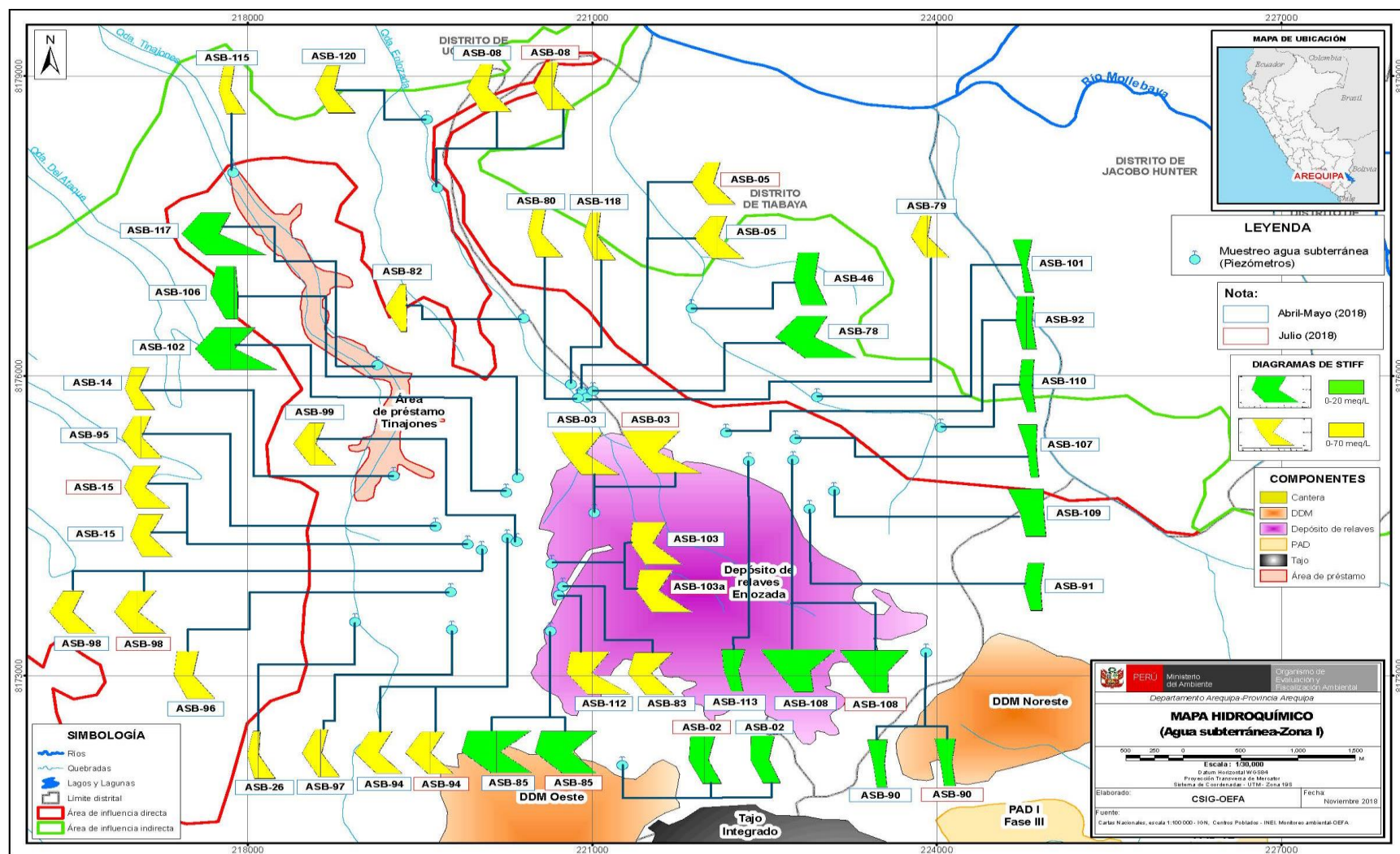


Figura 6-215. Diagramas de Stiff del agua subterránea en los piezómetros evaluados en la zona I



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

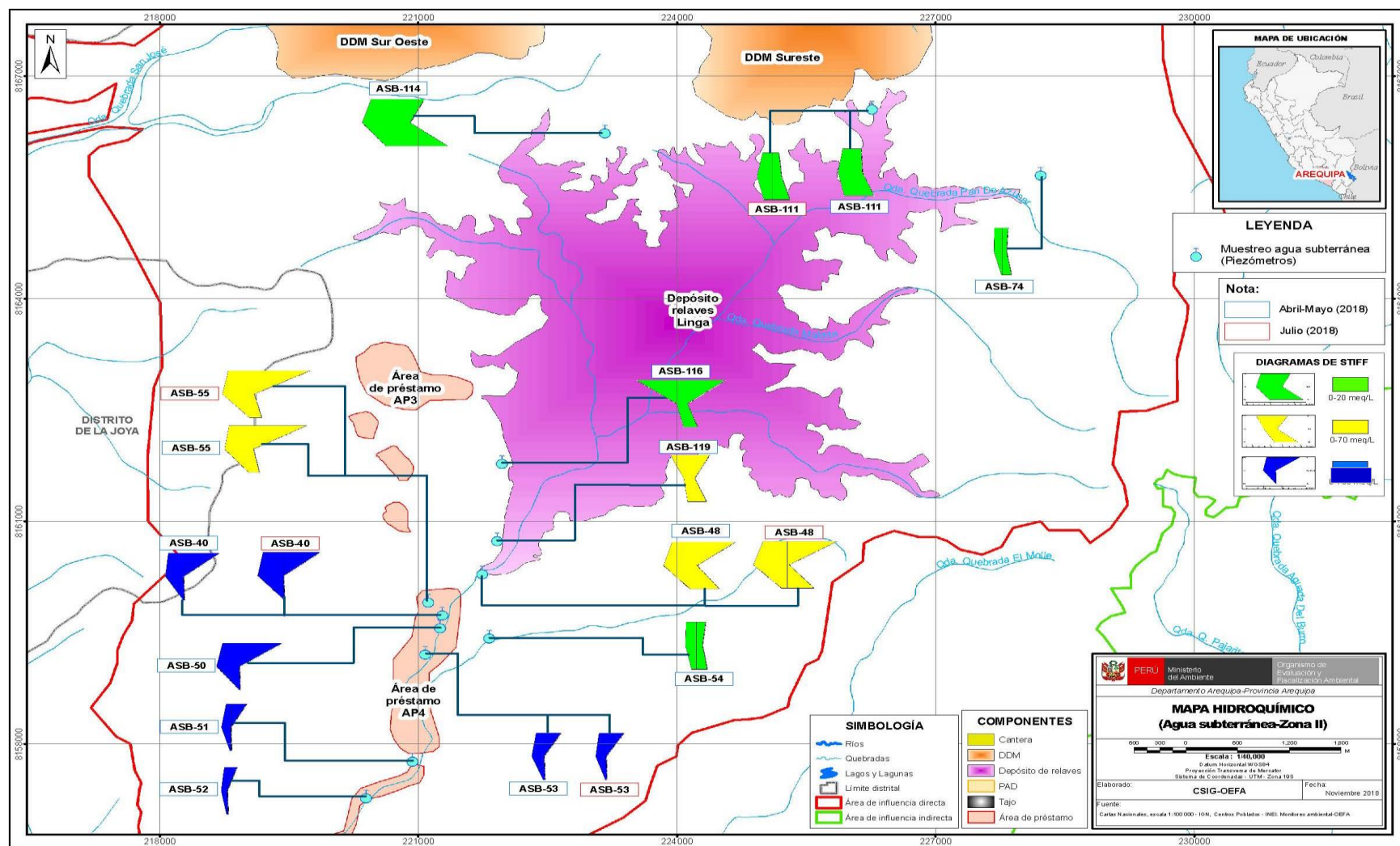


Figura 6-216. Diagramas de Stiff del agua subterránea en los piezómetros evaluados en la zona II



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

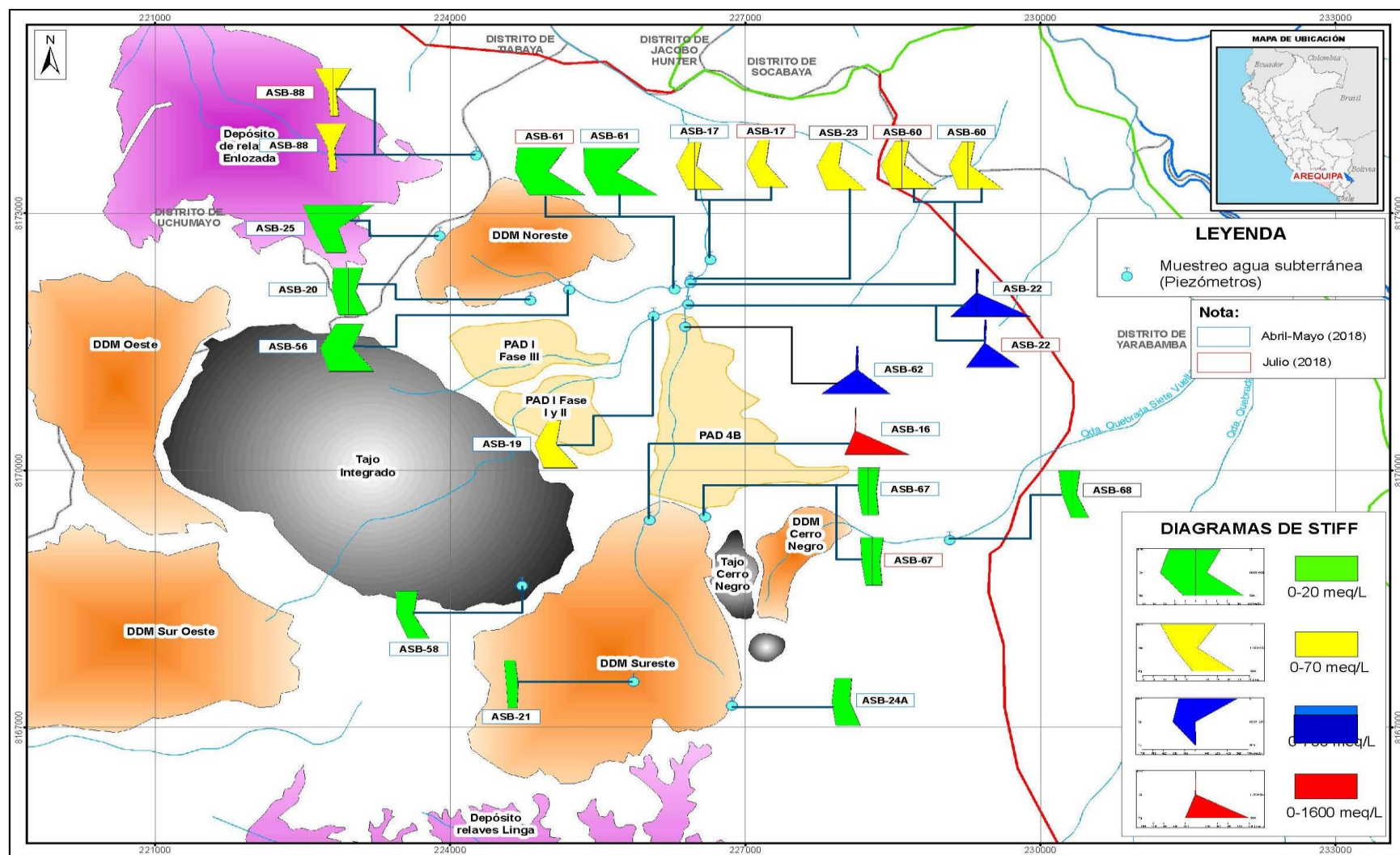


Figura 6-217. Diagramas de Stiff del agua subterránea en los piezómetros evaluados en la zona III

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

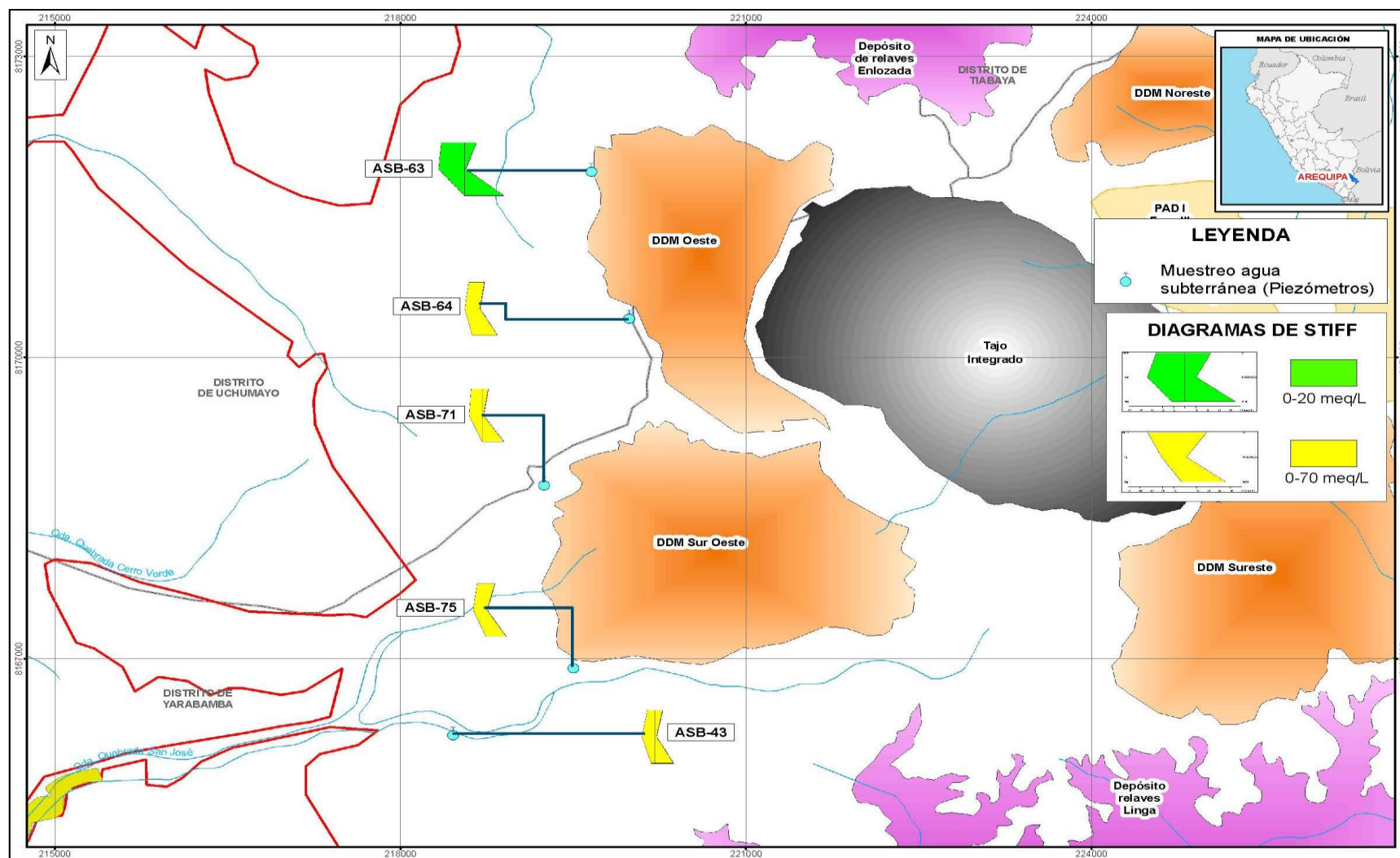


Figura 6-218. Diagramas de Stiff del agua subterránea en los piezómetros evaluados en la zona IV

✓ Diagrama de Piper

El diagrama de Piper (Figura 6-219 a) indica que las aguas subterráneas de los piezómetros de la zona I se agruparon en 4 facies hidroquímicas: La primera de tipo sulfatada cálcica y agrupó 29 puntos (ASB-02, ASB-05, ASB-08, ASB-14, ASB-15, ASB-26, ASB-46, ASB-78, ASB-79, ASB-80, ASB-83, ASB-85, ASB-91, ASB-92, ASB-94, ASB-95, ASB-96, ASB-97, ASB-98, ASB-99, ASB-102, ASB-103, ASB-106, ASB-110, ASB-112, ASB-115, ASB-117, ASB-118 y ASB-120).

La segunda de tipo clorurada sódica potásica y agrupó 6 puntos (ASB-90, ASB-101, ASB-107, ASB-108, ASB-109 y ASB-113), la tercera de tipo sulfatada sódico potásica (ASB-03), y la cuarta de tipo bicarbonatada cálcica (ASB-82).

El diagrama de Piper (Figura 6-219 b) indica que las aguas subterráneas de los piezómetros de la zona II se agruparon en 3 facies hidroquímicas: La primera de tipo sulfatada cálcica y agrupó 4 puntos (ASB-54, ASB-74, ASB-111 y ASB-114), la segunda facie fue de tipo clorurada sódica potásica y agrupó 2 puntos (ASB-116 y ASB-119); y la tercera de tipo clorurada cálcica y agrupó 7 puntos (ASB-40, ASB-48, ASB-50, ASB-51, ASB-52, ASB-53 y ASB-55).

El diagrama de Piper (Figura 6-219 c) indica que las aguas subterráneas de los piezómetros de la zona III se agruparon en 4 facies hidroquímicas. La primera de tipo sulfatada cálcica y agrupó 11 puntos (ASB-17, ASB-19, ASB-20, ASB-23, ASB-24A, ASB-56, ASB-58, ASB-60, ASB-61, ASB-67 y ASB-68), la segunda de tipo clorurada sódico potásica y agrupó 2 puntos (ASB-25 y ASB-88), la tercera de tipo bicarbonatada sódico potásica (ASB-21); y la cuarta de tipo sulfatada magnésica y agrupó 3 puntos (ASB-16, ASB-22 y ASB-62).

El diagrama de Piper (Figura 6-219 d) indica que las aguas subterráneas de los piezómetros de la zona IV presentaron facies hidroquímicas de tipo sulfatada cálcica que agrupó 5 puntos (ASB-43, ASB-63, ASB-64, ASB-71 y ASB-75).

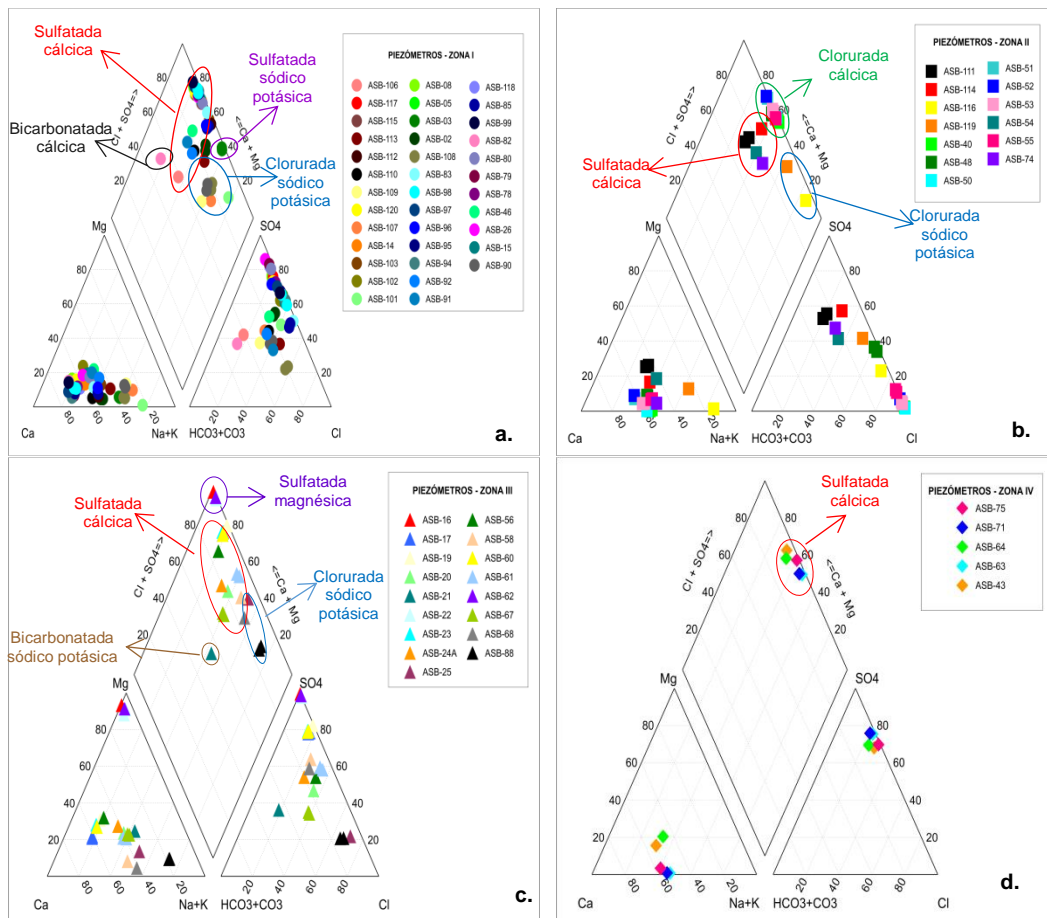


Figura 6-219. Diagramas de Piper de los piezómetros evaluados en la **a.** zona I; **b.** zona II; **c.** zona III y **d.** zona IV

6.3.6.2 Hidroquímica de agua del sobrenadante de los depósitos de relaves y agua de recirculación de filtraciones

La evaluación hidroquímica consideró un total de 22 muestras: 11 en la zona I, y 11 en la zona II, que comprendieron el agua del sobrenadante (8 muestras) y agua de recirculación de filtraciones (3 muestras) por zona.

a. Parámetros de campo

Potencial de hidrógeno (pH)

En la zona I, los valores de potencial de hidrógeno variaron entre 7,19 unidades de pH (F-25) y 11,88 unidades de pH (DRE-AG-03A); y en la zona II variaron entre 7,26 unidades de pH (F-23) y 10,63 unidades de pH (DRL-AG-03A).

Temperatura

En la zona I, la temperatura varió entre 15,8 °C (DRE-AG-04A) y 23,2 °C (F-03); y en la zona II varió entre 15,4 °C (DRL-AG-01A) y 20,7 °C (F-22).

Conductividad eléctrica

En la zona I, la conductividad eléctrica varió entre 3350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (F-03) y 5690 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (DRE-AG-02A); y en la zona II varió entre 4170 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (DRL-AG-01B) y 5790 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (F-22).



b. Diagramas hidroquímicos

La información que proporcionaron los diagramas hidroquímicos se detalla a continuación.

✓ Diagrama de Stiff

Los diagramas de Stiff (Figura 6-220) muestran que las concentraciones de iones mayoritarios (Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) en las muestras de agua en la zona I, y zona II fueron desde 0 hasta 60 meq/L y se dividieron en 2 rangos:

- De 0 a 40 meq/L: 9 muestras en la zona I (F-03, DRE-AG-01A, DRE-AG-01B, DRE-AG-02A, DRE-AG-02B, DRE-AG-03A, DRE-AG-03B, DRE-AG-04 y DRE-AG-04B); y 8 muestras en la zona II (DRL-AG-01A, DRL-AG-01B, DRL-AG-02A, DRL-AG-02B, DRL-AG-03A, DRL-AG-03B, DRL-AG-04A y DRL-AG-04B).
- De 0 a 60 meq/L: 2 muestras en la zona I (F-14 y F-25), y 3 muestras en la zona II (F-22, F-23 y F-24).



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

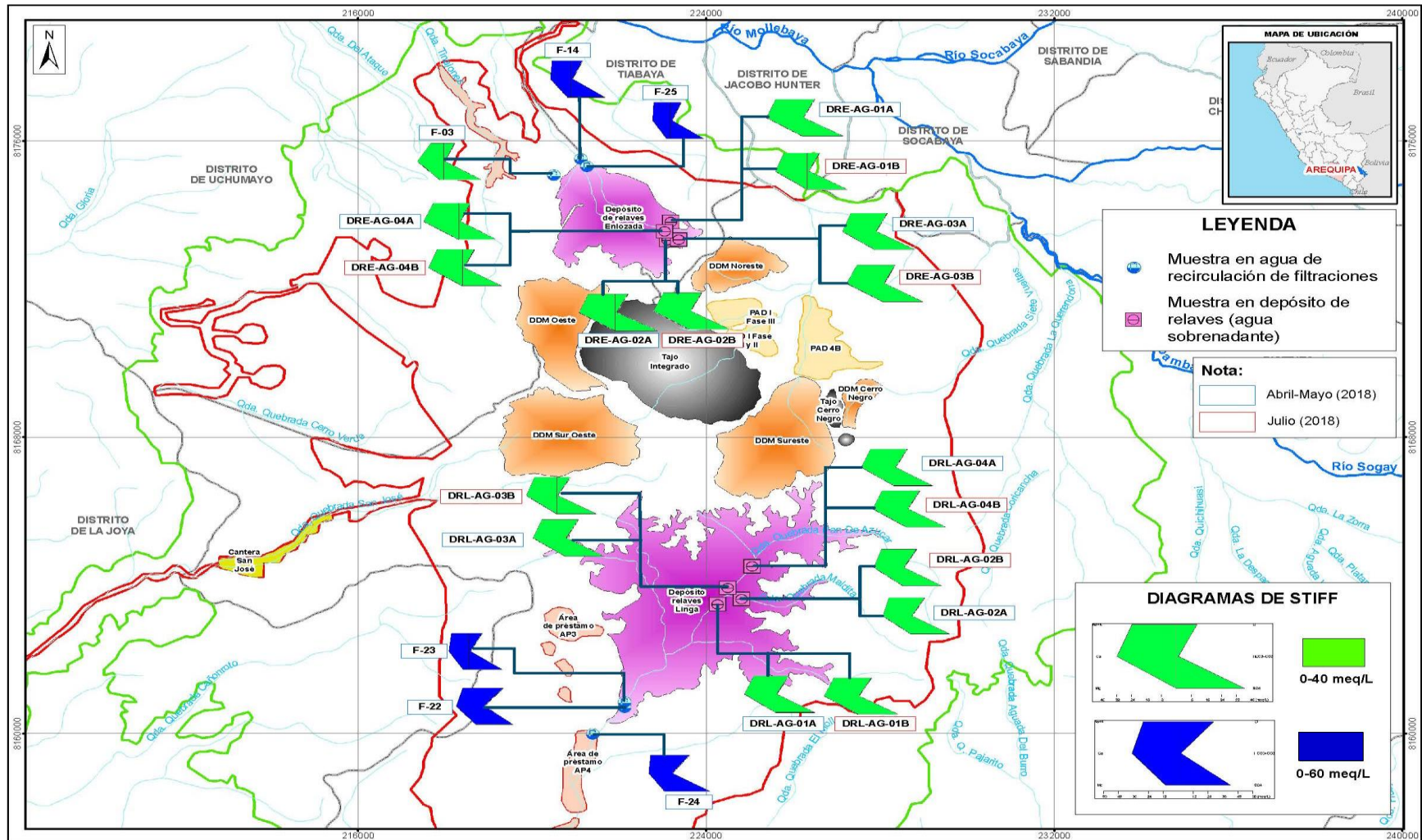


Figura 6-220. Diagramas de Stiff de las muestras de agua evaluadas en componente minero en la zona I y zona II

✓ Diagrama de Piper

El diagrama de Piper (Figura 6-221) indica que las muestras del sobrenadante en superficie (DRL-AG-01A, DRL-AG-02A, DRL-AG-03A, DRL-AG-04A, DRE-AG-01A, DRE-AG-02A, DRE-AG-03A, DRE-AG-04A) y fondo (DRL-AG-01B, DRL-AG-02B, DRL-AG-03B, DRL-AG-04B, DRE-AG-01B, DRE-AG-02B, DRE-AG-03B, DRE-AG-04B), así como las muestras de recirculación (F-22, F-23, F-24, F-03, F-14, F-25) de las zonas I y II se agruparon en una facie hidroquímica de tipo sulfatada cálcica.

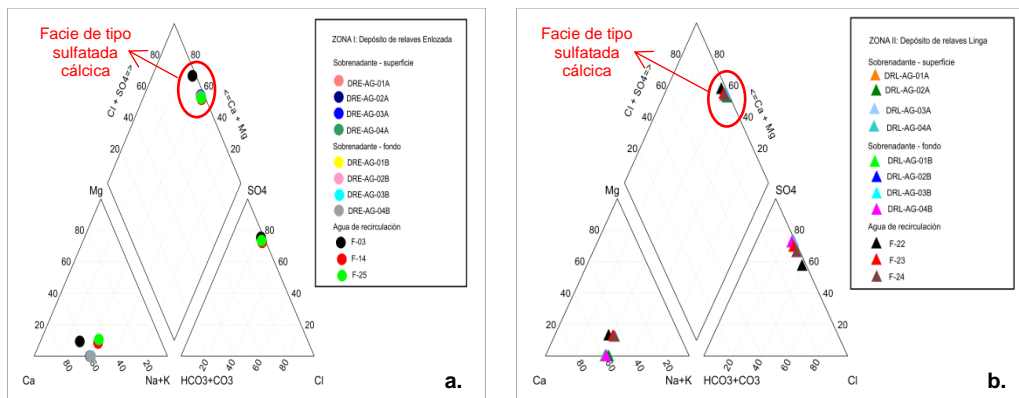


Figura 6-221. Diagramas de Piper de las muestras de agua en la **a.** zona I – depósito de relaves Enlozada y **b.** zona II – depósito de relaves Linga

6.3.7 Caracterización de suelo

En la Tabla 6-54 y Figura 6-222 se presentan los resultados de metales obtenidos en suelos (SU-02, SU-04, SU-06, SU-07 y SU-09) aledaños a las estaciones de monitoreo de calidad de aire, adicionalmente, se incluye una muestra de suelo colectada en una zona aledaña a las canteras de explotación de material no metálicos (SU-10).

Las mayores concentraciones de metales como aluminio, calcio, magnesio, potasio, sodio, manganeso y titanio fueron reportadas en el punto SU-10 (Canteras); cobre, hierro, molibdeno, zinc, estroncio y silicio en el punto SU-07, en los alrededores del Chancador Mirador (área de operaciones mineras); y fósforo en el punto SU-09 (San José). El detalle de los resultados se encuentra en los Anexos 3 y 7.

Tabla 6-54. Concentración de metales en suelo aledaño a estaciones de monitoreo de aire y canteras de explotación de materiales no metálicos

Parámetro	Unidad	San José	Chancador Mirador	Batolito de la Caldera	Banco Minero	Corazón de Jesús	Canteras
		SU-09	SU-07	SU-06	SU-02	SU-04	SU-10
Aluminio (Al)	mg/kg (PS)	6579	10102	8067	3963	8507	14999
Calcio (Ca)	mg/kg (PS)	2340	3324	2092	2001	5068	20532
Cobre (Cu)	mg/kg (PS)	81,4	3692	140,1	86,7	53	77,5
Estroncio (Sr)	mg/kg (PS)	37,1	80,5	23	10,1	53,5	76,8
Fosforo (P)	mg/kg (PS)	876,4	810,3	811,7	782,5	649,2	582,8
Hierro (Fe)	mg/kg (PS)	12918	26314	15277	10850	15434	22673
Magnesio (Mg)	mg/kg (PS)	3177	4324	4104	2612	2759	10065
Manganeso (Mn)	mg/kg (PS)	178	484	265	123	191	503
Molibdeno (Mo)	mg/kg (PS)	< 0,6	177,9	< 0,6	< 0,6	< 0,6	< 0,6
Potasio (K)	mg/kg (PS)	2134	2477	2872	1699	1497	6034
Silicio (Si)	mg/kg (PS)	453,1	599,6	426,7	355,5	437,6	541,1
Sodio (Na)	mg/kg (PS)	421	484	365	332	572	1337
Titanio (Ti)	mg/kg (PS)	1076	374,4	1233	885,6	1140	1578
Zinc (Zn)	mg/kg (PS)	33,6	140,3	44	32,7	68,1	69,9

PS: Peso seco

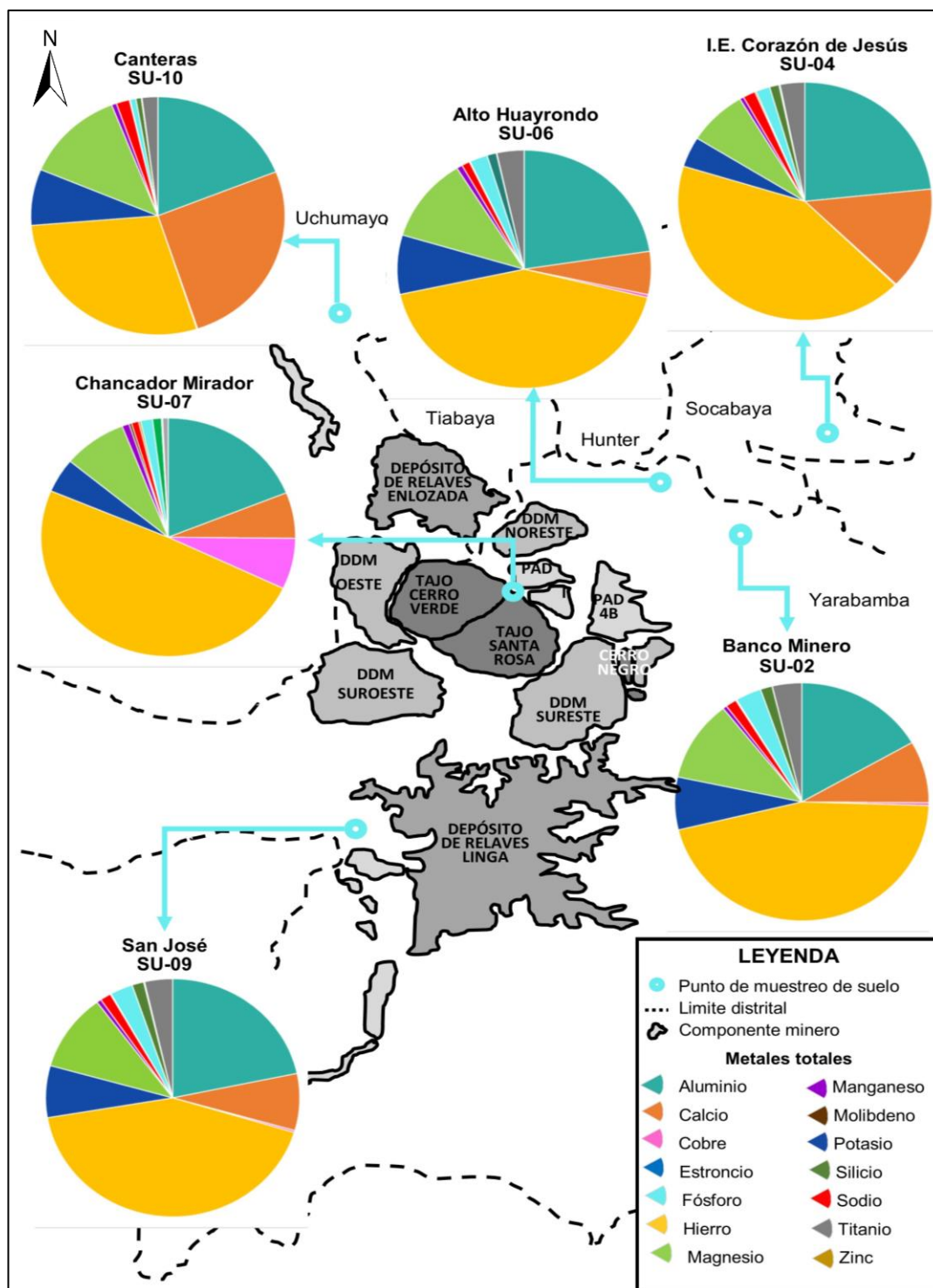


Figura 6-222. Esquema de concentración de metales en suelo aledaño a estaciones de monitoreo de aire y canteras de explotación de materiales no metálicos

6.3.8 Caracterización de polvo sedimentado

En la Tabla 6-55 y Figura 6-223 se presentan los resultados de metales en muestras de polvo sedimentado obtenidos en superficie de paneles solares (SU-08) y techos de policarbonato de las viviendas (SU-08-1), en los alrededores de la estación de monitoreo de calidad de aire (CA-08) en el Pueblo Joven Cerro Verde.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Los metales predominantes en las muestras fueron hierro, aluminio, calcio, magnesio, manganeso, potasio, titanio, sodio y fósforo en comparación al resto de elementos evaluados. El detalle de los resultados se encuentra en los Anexos 3 y 7.

Tabla 6-55. Concentración de metales y metaloides en polvo sedimentado en los alrededores de la estación de calidad de aire CA-08 del Pueblo Joven Cerro Verde

Parámetro	Unidad	Techos de viviendas	Paneles solares
		SU-08-1	SU-08
Aluminio (Al)	mg/kg (PS)	13056	12311
Calcio (Ca)	mg/kg (PS)	12211	18364
Cobre (Cu)	mg/kg (PS)	519,3	435,2
Estroncio (Sr)	mg/kg (PS)	89,6	100,2
Fosforo (P)	mg/kg (PS)	1140	1535
Hierro (Fe)	mg/kg (PS)	24856	22629
Magnesio (Mg)	mg/kg (PS)	6839	6818
Manganeso (Mn)	mg/kg (PS)	418	420
Molibdeno (Mo)	mg/kg (PS)	30,4	17,4
Potasio (K)	mg/kg (PS)	3711	4732
Silicio (Si)	mg/kg (PS)	579,2	592,5
Sodio (Na)	mg/kg (PS)	1078	2807
Titanio (Ti)	mg/kg (PS)	1335	1253
Zinc (Zn)	mg/kg (PS)	223,1	230,6

PS: Peso seco

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

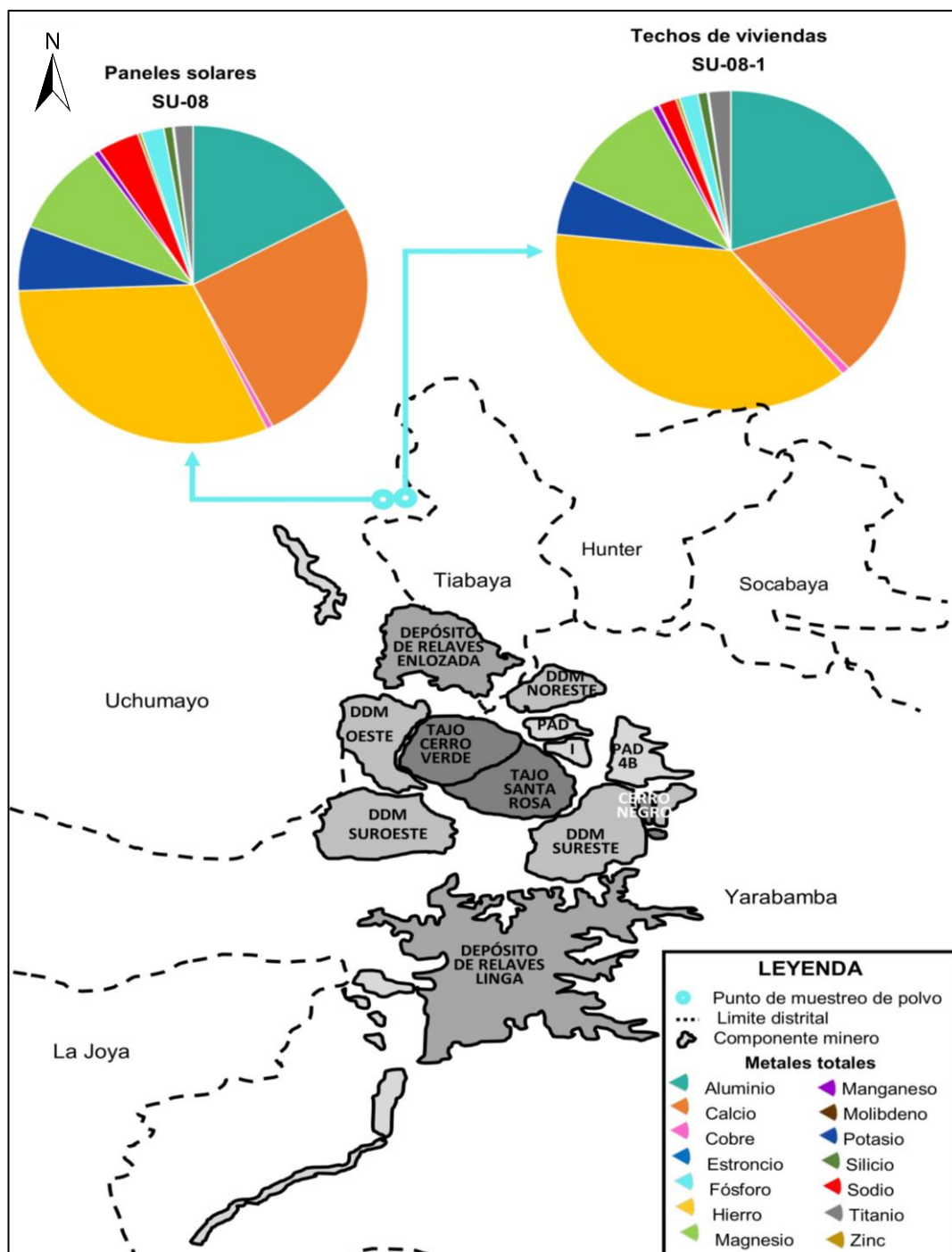


Figura 6-223. Concentración de metales y metaloides en polvo sedimentado en los alrededores de la estación de calidad de aire CA-08 del Pueblo Joven Cerro Verde



7. DISCUSIÓN

Río Chili y tributarios

En el río Chili, aguas arriba de la ciudad de Arequipa (AS-17), todos los parámetros evaluados cumplieron con los ECA para agua Cat. 3 (Figura 6-1). Asimismo, las comunidades hidrobiológicas de perifiton presentaron mayor riqueza (27 especies, destacando Bacillariophyta) y los macroinvertebrados bentónicos (predominando *Metrichia* sp.) y peces (*Trichomycterus punctulatus* «bagre») fueron más abundantes en comparación a los puntos aguas abajo de la ciudad de Arequipa, estos resultados se vieron reflejados en una calidad ecológica «moderada» según el ABI (Figura 6-17).

Los puntos ubicados en el río Chili, que comprende la zona urbana y aguas abajo de la ciudad de Arequipa (AS-16, AS-02 y AS-04), solo presentaron valores de pH alcalinos que excedieron los ECA para agua Cat. 3. Sus tributarios, como la quebrada Uchumayo (AS-10) presentó una concentración de fluoruros que superó el ECA para agua Cat. 3; asimismo, el río Mollebaya (AS-09) registró valores de conductividad eléctrica, cloruros y boro que excedieron el estándar referido.

Los valores de pH registrados en el río Chili y la quebrada Uchumayo variaron entre 7,94 y 8,99 unidades de pH, observándose tendencias alcalinas similares según los monitoreos realizados por SMCV, ANA y OEFA del 2009 al 2018 (Figura 7-1). La alta concentración de fluoruros en la quebrada Uchumayo estaría relacionada al entorno geológico, rocas volcánicas (tobas), que mediante procesos de disolución estarían liberando fluoruros y otros iones (Trejo-Vázquez *et al.*, 1997); sin embargo, a pesar de encontrarse entre zonas agrícolas se encontraron más especies «facultativas» e incluso «sensibles» de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos como la especie *Progomphus* sp. del orden Odonata, asimismo, registró una calidad ecológica «buena» según el ABI (Figura 6-17), cabe precisar que esta quebrada presentó un menor caudal en comparación al río Chili.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

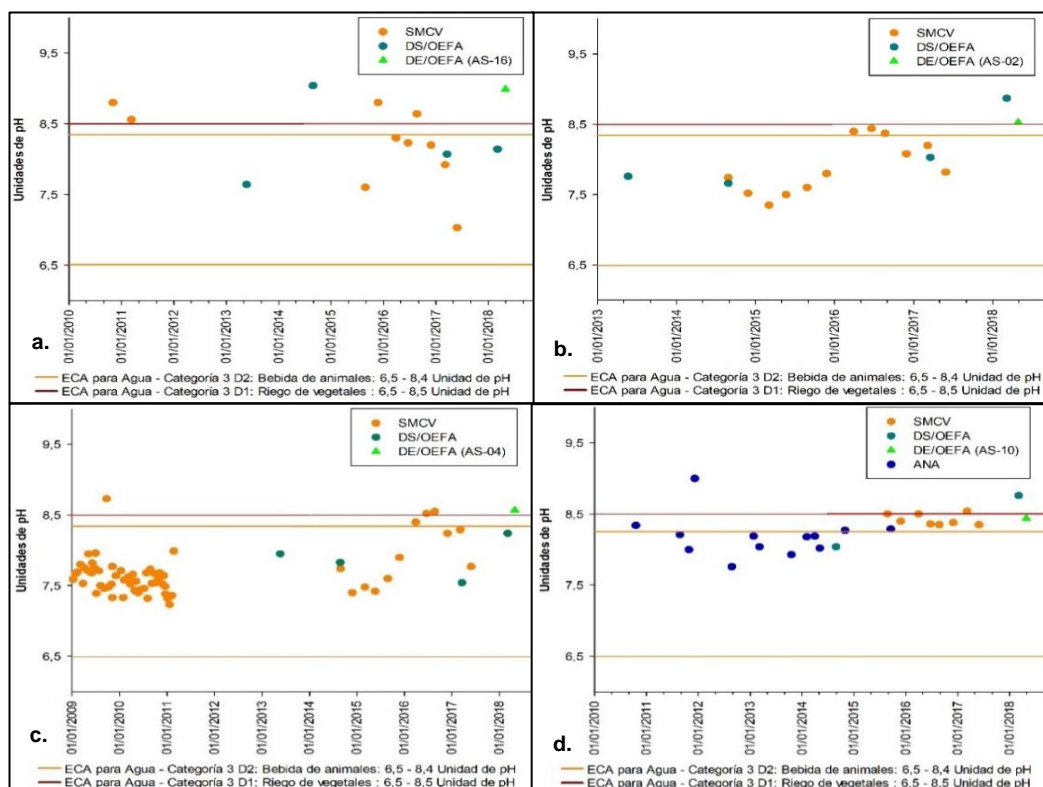


Figura 7-1. Potencial de hidrógeno registrado en el río Chili: **a.** AS-16 **b.** AS-02 y **c.** AS-04; y quebrada Uchumayo **d.** AS-10 entre el 2009 y 2018.

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental del proyecto «Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde aprobado mediante Resolución Directoral N.º 403-2012-MEM-AAM.

Informes de monitoreo de agua superficial realizados por la Autoridad Nacional del Agua.

Informes de monitoreo OEFA.

La existencia de cloruros y boro en el río Mollebaya en concentraciones por encima del ECA para agua Cat. 3 se debe principalmente a que, en zonas aledañas a este cuerpo de agua, afloran manantiales y se encuentran pozos con aguas de tipo cloruradas sódicas y cálcicas, y con altas concentraciones de boro, procedentes de la interacción de rocas volcánicas (flujos de lava) – agua (Sulca, 2012; INGEMMET, 2018), Figuras 7-2 al 7-4.

Estas condiciones geológicas y las actividades agropecuarias que se desarrollan en la zona (ANA, 2014⁴⁵), podrían contribuir al incremento de estos parámetros en el río Mollebaya. Sin embargo, presentó una calidad ecológica «moderada» destacando la presencia de la especie *Physa sp.*, la cual está relacionada a altas concentraciones de calcio (Figura 6-16), elemento fundamental para la construcción de sus conchillas (Domínguez y Fernández, 2009); además, de la presencia de peces (*Poecilia reticulata* «gupi»).

El punto HB-02 en el río Chili aguas abajo de la confluencia con el río Mollebaya registró la mayor riqueza de macroinvertebrados bentónicos (20 especies), y la presencia de *Trichomycterus punctulatus* «bagre», obteniendo una calidad ecológica «buena» según ABI, esto debido al aporte del río Mollebaya.

⁴⁵

Informe Técnico N.º 007-2014-PMGRH-Cuenca Quilca-Chili/LGEQ. Cuarto monitoreo participativo en la cuenca Quilca-Chili, periodo 2014; Pág. 13. «En el río Tingo Grande que tributa por la margen izquierda del río Chili, presenta los parámetros conductividad, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, boro, calcio y sodio exceden el ECA para agua categoría 3 a causa de desarrollo de actividades agropecuarias de la zona».



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

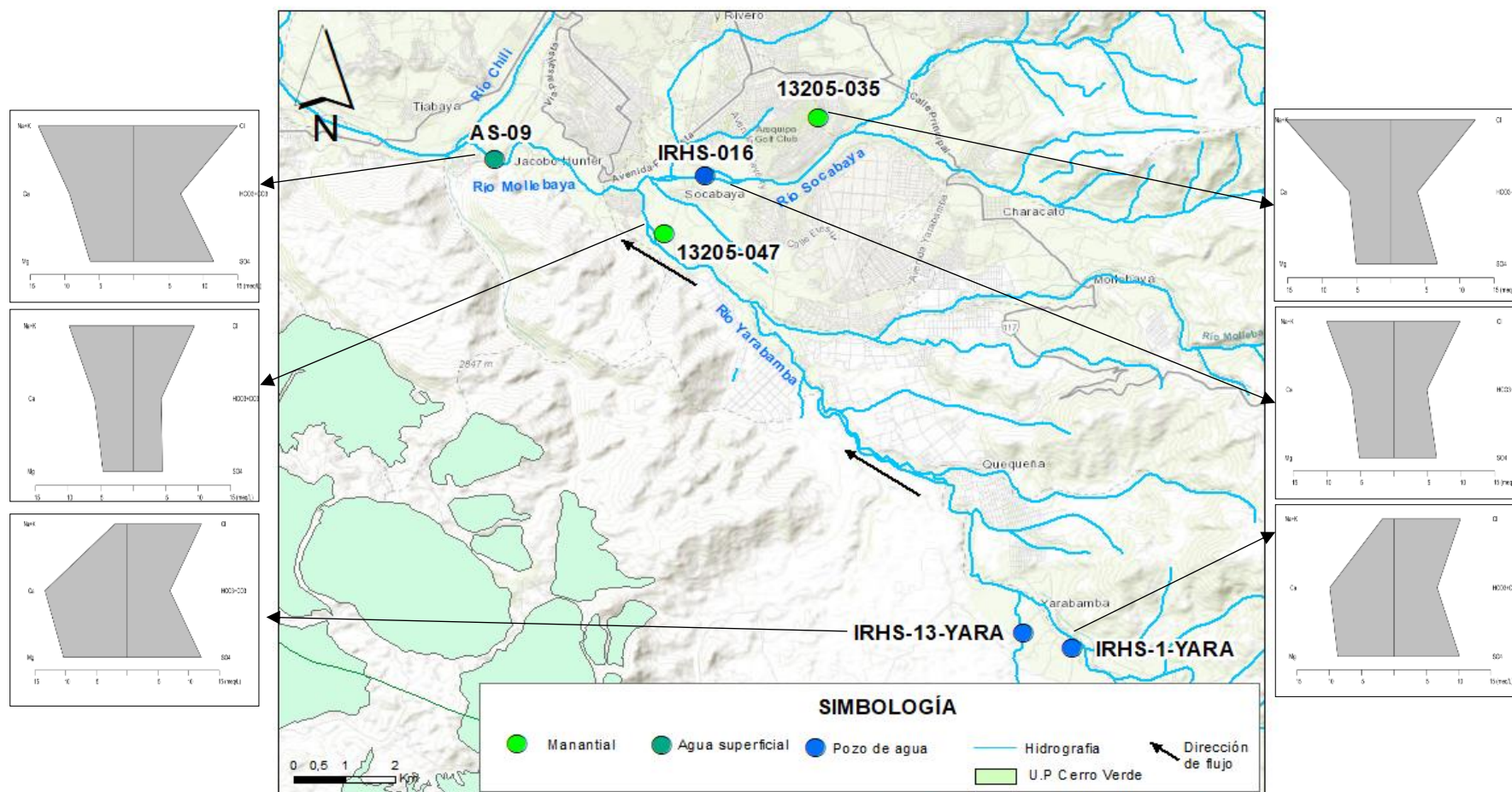


Figura 7-2. Ubicación y facies hidroquímicas del agua en pozos y manantiales cercanos al río Mollebay
Fuente: Ingemmet, 2018 – Ubicación de manantiales y pozos.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

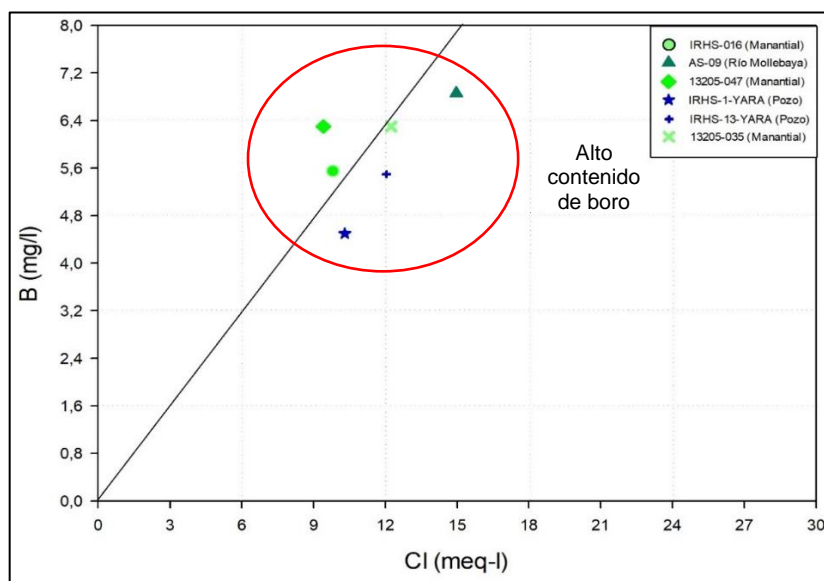


Figura 7-3. Representación de la relación B y Cl de fuentes con alto contenido de boro en el río Mollebaya y en manantiales y pozos cercanos

Fuente: Ingemmet, 2018 y la evaluación del 2018.

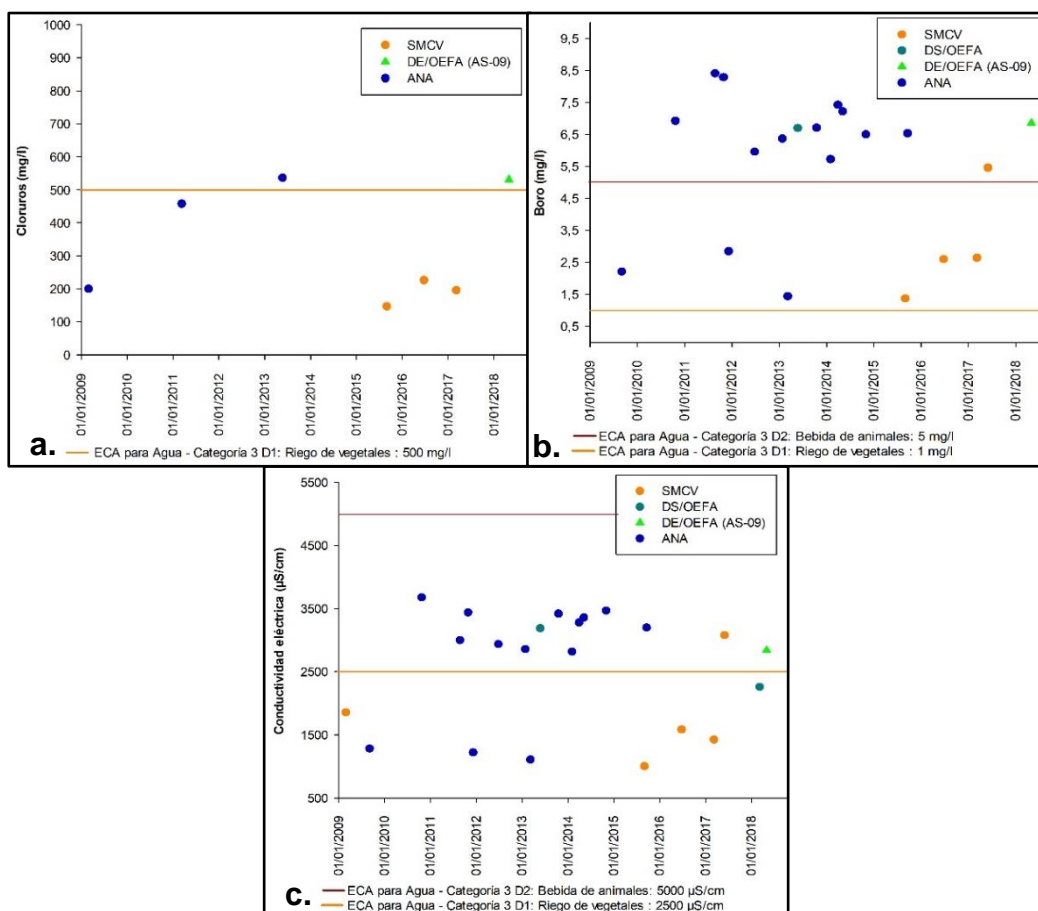


Figura 7-4. Concentraciones de **a.** cloruros, **b.** boro y **c.** conductividad eléctrica en el río Mollebaya del 2009 al 2018

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Las concentraciones de metales en sedimento en el río Chili y tributarios, referencialmente no excedieron los valores ISQG y PEL de la guía canadiense, a excepción del punto SD-01 (ubicado en la estación de bombas 1) cuya concentración de cobre (42,9 mg/kg) excedió el valor ISQG (35,7 mg/kg). La existencia de cobre y de otros metales en mayores concentraciones respecto a los demás puntos evaluados, probablemente sea debido a que esta sección del río presentó una mayor fracción fina de limo y arcilla (35%), favorecido por el encauzamiento del río que permitiría el almacenamiento de metales (Owens *et al.*, 2005) (Figura 7-5).



Figura 7-5. Punto de muestreo de sedimento SD-01 ubicado **a.** Aguas abajo y **b.** Aguas arriba de la estación de bombas 1

El punto HB-08 -ubicado aproximadamente a 500 m aguas abajo de la estación de bombas 1- registró los valores más pobres de riqueza y abundancia del perifiton y macroinvertebrados bentónicos y el mayor valor de materia orgánica en el sedimento; asimismo, presentó una calidad ecológica «mala» según los índices ABI y CERA (Figura 7-6); esto probablemente debido a trabajos de encauzamiento, descolmatación y mantenimiento de gaviones^{46,47} realizados en la zona y autorizados por la autoridad competente y otras actividades antrópicas observadas en la zona (Figura 7-7), lo que estaría limitando el establecimiento y permanencia de las comunidades hidrobiológicas como el perifiton y macroinvertebrados bentónicos. Sin embargo, los puntos HB-07 y HB-06, ubicados aproximadamente a 6 y 8 km aguas abajo del punto HB-08, presentaron una recuperación en la riqueza y abundancia del perifiton (21 y 24 especies, destacando Bacillariophyta) y macroinvertebrados bentónicos (19 y 14 especies, predominando la especie tolerante *Cricotopus* sp.), con una calidad ecológica «buena» y «moderada», respectivamente, según ABI. Cabe precisar que en el punto HB-08, los parámetros evaluados en agua y sedimento no excedieron los estándares de comparación empleados.

⁴⁶ Resolución Directoral N.º 2851-2017-ANA/AAA I C O

⁴⁷ Resolución Directoral N.º 1210-2018-ANA/AAA I C O



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»



Figura 7-6. Encauzamiento del río Chili en el punto HB-08

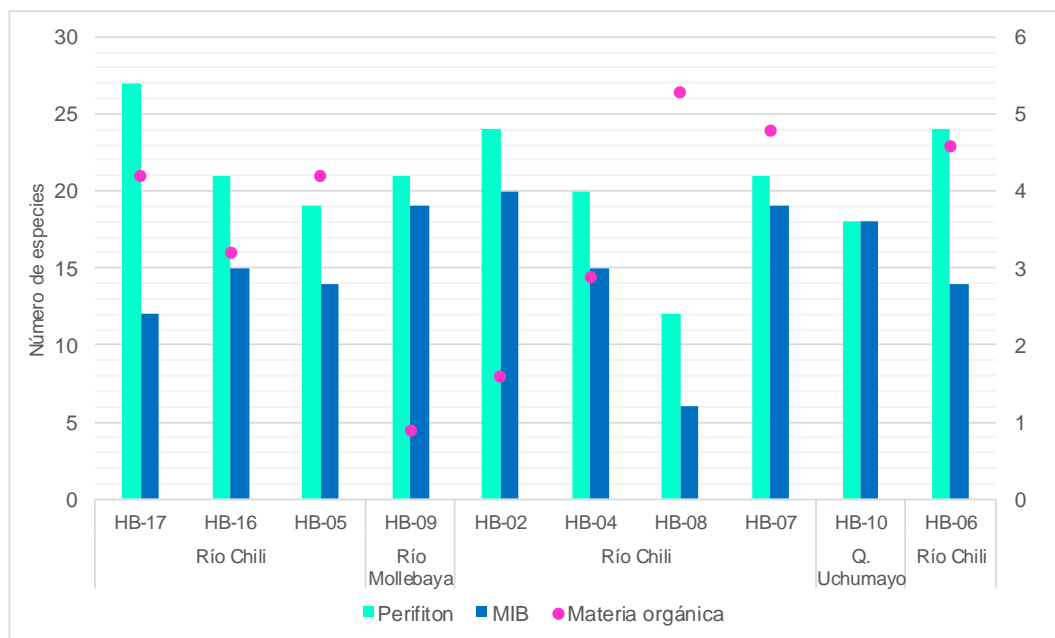


Figura 7-7. Comparación entre el número de especies del perifiton y macroinvertebrados bentónicos en el río Chili y tributarios con la materia orgánica
MIB: Macroinvertebrados bentónicos.



Aire, suelo y polvo sedimentado

Del análisis estadístico (conglomerados) para metales en suelo y polvo sedimentado, se observó la formación de 2 grupos bien definidos, el primero conformado por los puntos de muestreo de suelo (SU-10) y polvo sedimentado (SU-08 y SU-08-1), todos ellos ubicados en el distrito de Uchumayo; y un segundo grupo integrado por los puntos de muestreo de suelo SU-06 (Batolito de la Caldera), SU-09 (San José), SU-02 (Banco Minero) y SU-04 (Socabaya). Asimismo, se observó que el punto SU-07, ubicado en área de operaciones de SMCV, no se agrupó con ningún otro punto (Figura 7-8).

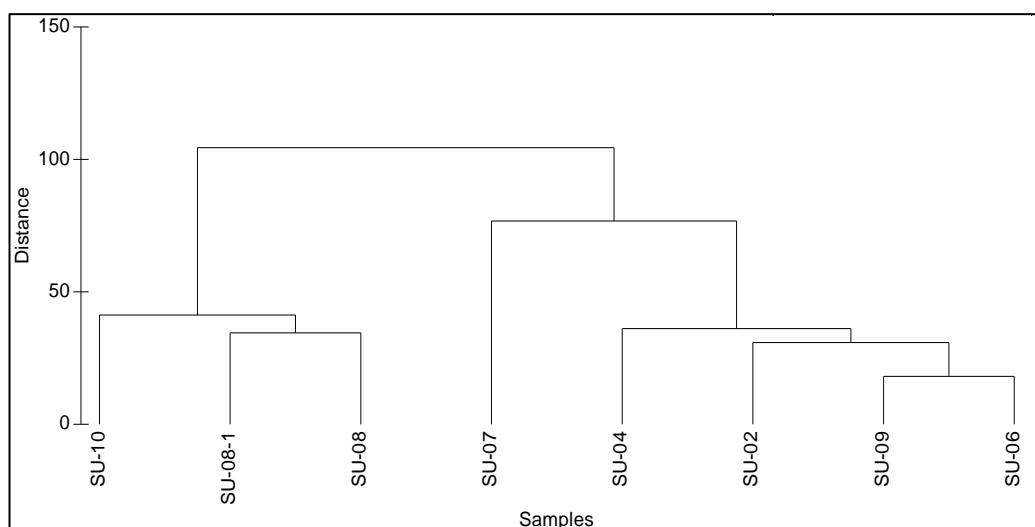


Figura 7-8. Análisis de conglomerados para metales en suelo y polvo sedimentado

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP), para los resultados obtenidos en los puntos de muestreo de suelo y polvo sedimentado, donde la varianza total por los 2 componentes (PC1 y PC2) fue del 94,6 %; el primer componente explicó el 78,2 % de la varianza y estuvo relacionada con el calcio. El segundo componente explicó el 16,4 % de la varianza y mostró una relación con el cobre y hierro (Figura 7-10).

La proyección de puntos de muestreo en el espacio generado por 2 componentes (PC1 y PC2), muestra la formación de dos grupos. Un primer grupo formado por puntos de muestreo ubicados en el distrito de Uchumayo, aledaños a las canteras de extracción de materiales no metálicos (SU-10) y en el PPJJ Cerro Verde (SU-08 y SU-08-1), los cuales presentaron las mayores concentraciones de calcio, aluminio, potasio, magnesio, sodio y titanio (Figura 7-10). Asimismo, las canteras también presentaron un incremento significativo de las concentraciones de los elementos mencionados entre el 2013 y 2018, excepto el aluminio que no presentó variación significativa en sus concentraciones (Figura 7-9).



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

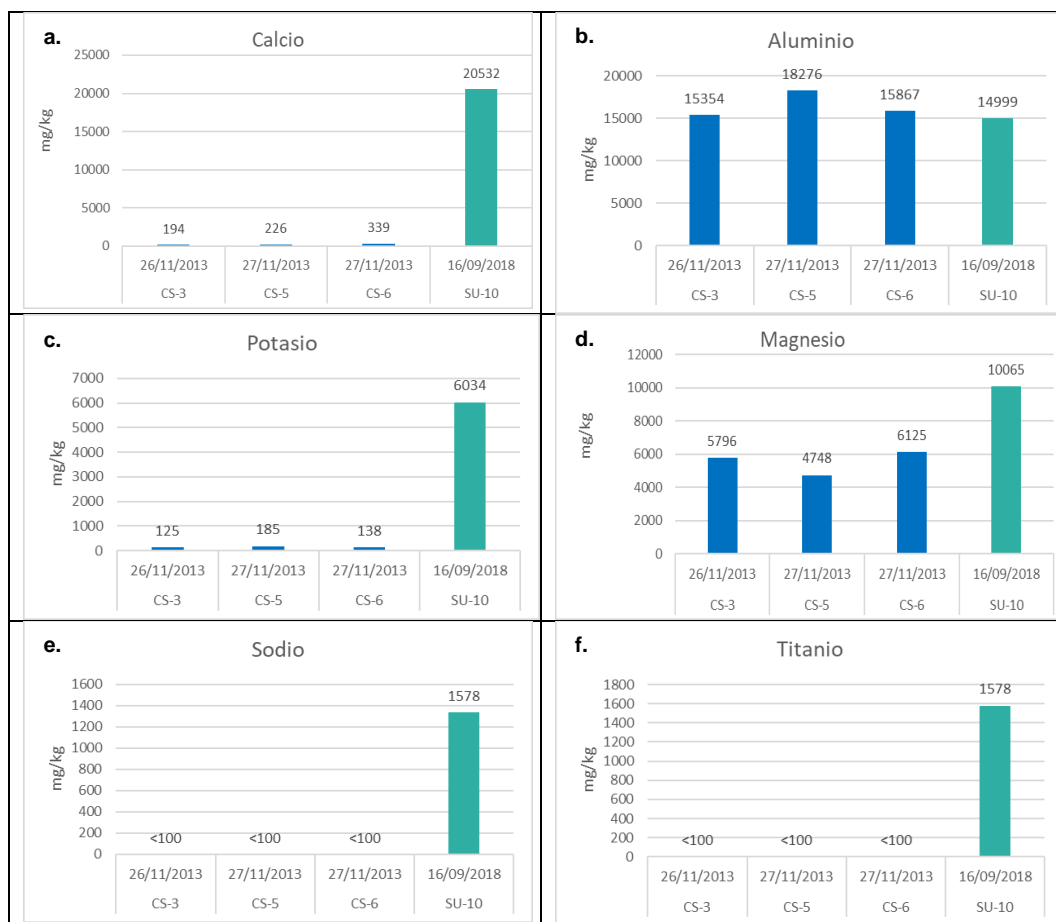


Figura 7-9. Concentración de metales de los años 2013 y 2018, en los puntos de suelo alejados a las canteras de extracción de materiales no metálicos **a.** calcio y **b.** aluminio, **c.** potasio, **d.** magnesio, **e.** sodio y **f.** titanio

Fuente: Datos obtenidos de la Declaración del Impacto Ambiental- Concretos Supermix S.A. Proyecto La Enlozada R.D. N.º 383-2015-PRODUCE/DVMYPE-I/DIGGAM (Barras azules) y los datos del 2018 (barras verdes) corresponden a la evaluación

El segundo grupo se formó por el resto de puntos de muestreo de suelo (SU-04, SU-06, SU-09 y SU-02), los cuales presentaron concentraciones moderadas a bajas para la mayoría de los metales analizados. El punto SU-07 - localizado en el área de operación minera (Chancado Mirador) de la UP Cerro Verde- separado de ambos grupos en el espacio de ordenación, se asoció con las concentraciones más elevadas de hierro y cobre (Figura 7-9).



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

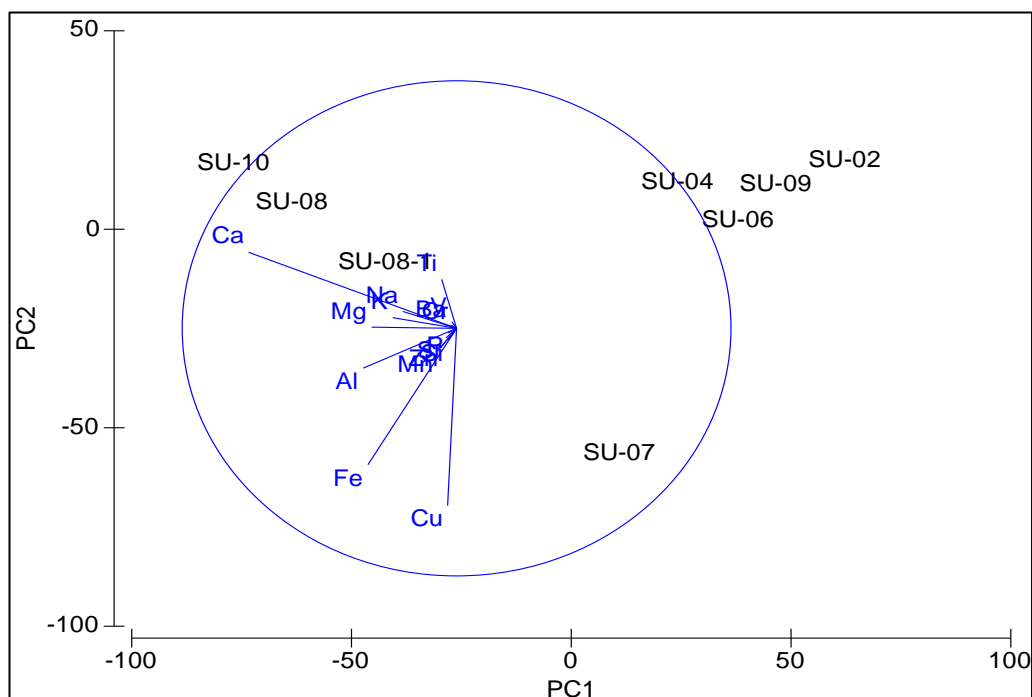


Figura 7-10. Análisis de componentes principales entre muestras de suelo y polvo sedimentado

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) con los puntos ubicados en los distritos de Uchumayo (SU-10, SU-08, SU-08-1), Socabaya (SU-04) y Yarábamba (SU-02), obteniendo que el primer componente (PC1) explicó el 91,9 % de la varianza y estuvo relacionada con la concentración de calcio. El segundo componente (PC2) explicó el 3,6 % de la varianza y mostró una relación entre el cobre y el hierro. Podemos observar que los puntos de polvo sedimentado (SU-08 y SU-08-1) presentaron elementos relacionados con las canteras de extracción de materiales no metálicos – Concretos Supermix S.A. Proyecto La Enlozada (SU-10), en cambio, en los distritos Socabaya y Yarábamba presentaron elementos que no tienen relación, posiblemente debido a la distancia entre los 3 distritos (Figura 7-11).

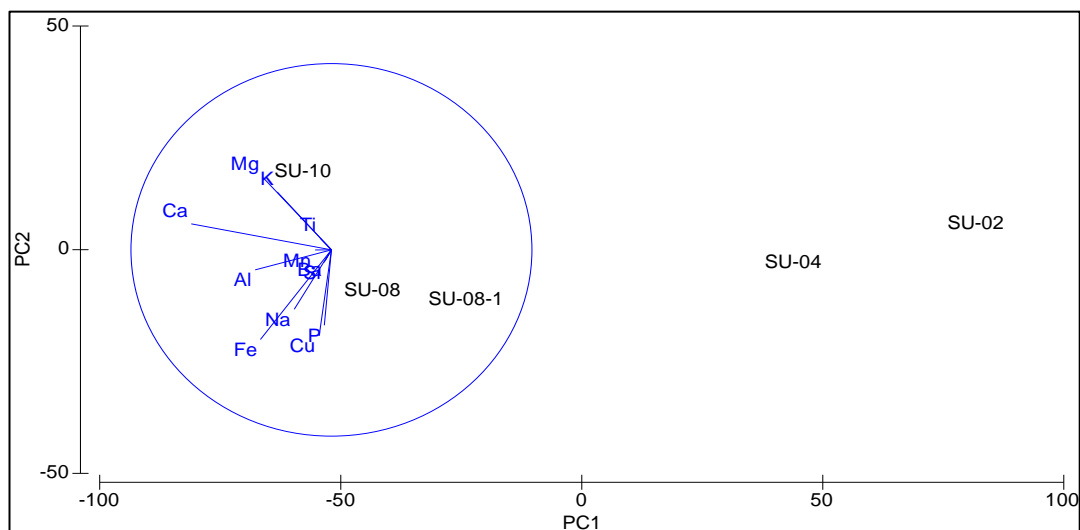


Figura 7-11. Análisis de componentes principales entre muestras de suelo y polvo sedimentado



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

El área evaluada (UP Cerro Verde) se caracteriza por presentar una topografía compuesta por colinas y cadenas montañosas relativamente agrestes cubiertas parcialmente con depósitos eólicos y divididas por un conjunto de quebradas aluviales completamente secas o de régimen esporádico bajo condiciones de precipitaciones extremas, con periodos de precipitación diferenciados: época de lluvias (noviembre –marzo) y la época seca (abril-octubre) con promedio anual de 35,6 mm⁴⁸.

En la Figura 7-12 se presenta las direcciones predominantes de vientos en periodos diurno y nocturno en las estaciones operacionales (CA-09, CA-07, y CA-02) y no operacionales (CA-06, CA-04 y CA-08).

De los registros meteorológicos se tiene que la dirección predominante de los vientos en las estaciones de monitoreo CA-09 (San José) y CA-07 (Chancado Mirador) provinieron del oeste (W), suroeste (SW) y sursuroeste (SSW) en periodo diurno (7:00 h – 19:00 h), con velocidad y temperatura promedio de 3,6 m/s y 16°C, respectivamente; mientras que, en periodo nocturno (19:00 h – 7:00 h) provinieron del noreste (NE), nornoreste (NNE) y este (E) con velocidad y temperatura promedio de 1,2 m/s y 11,7°C respectivamente. Estos resultados coinciden con lo reportado por SMCV del 2004 al 2014⁴⁹.

En las estaciones de monitoreo CA-02 (Banco Minero), CA-04 (I.E Corazón de Jesús) y CA-08 (PP.JJ Cerro Verde), los vientos en periodo diurno provinieron del norte (N), noroeste (NW) y nornoroeste (NNW) con velocidad y temperatura promedio de 2,7 m/s y 18,2 °C respetivamente; mientras que, en periodo nocturno provinieron del sur (S), sureste (SE) y este (E) con velocidad y temperatura promedio de 0,8 m/s y 9,3 °C. Estos resultados coinciden con lo reportado por SMCV del 2013 y 2014⁵⁰, y concuerdan con las direcciones de viento de la Cuenca Atmosférica de Arequipa⁵¹.

En la estación de monitoreo CA-06 (Batolito de la Caldera), las direcciones de viento para el periodo diurno provinieron del oeste (W) y noroeste (NW), donde los vientos ingresaron por la microcuenca Huayrondo; mientras que, para el periodo nocturno provinieron del suroeste (SW) y sureste (SE), donde los vientos ingresaron a la Cuenca Atmosférica de Arequipa. (Figura 7-12 y Figura 7-13).

⁴⁸ Resolución Directoral N.º 072-2016-SENACE-DCA. Modificación del Estudio de Impacto Ambiental y Social de la Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde.

⁴⁹ Resolución Directoral N.º 072-2016-SENACE-DCA. Modificación del Estudio de Impacto Ambiental y Social de la Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde.

⁵⁰ Resolución Directoral N.º 072-2016-SENACE-DCA. Modificación del Estudio de Impacto Ambiental y Social de la Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde.

⁵¹ Consejo Nacional del Ambiente. 2005. Gesta Zonal del Aire Arequipa. Plan a Limpiar el Aire: Arequipa



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

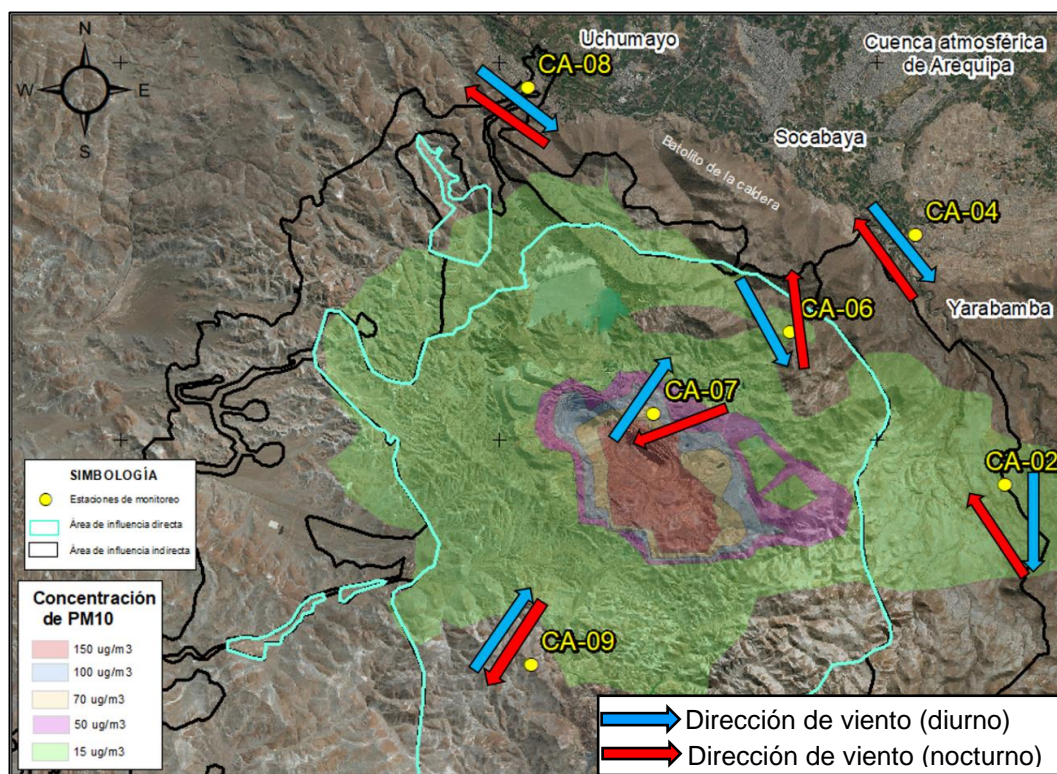


Figura 7-12. Dirección predominante de los vientos en periodo diurno y nocturno en las estaciones de monitoreo de calidad del aire

Fuente: Modelamiento de la dispersión de material particulado menor a 10 micras. R.D. N.º 403-2012-MEM-AAM.

Las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ obtenidas en el área evaluada, muestran una importante diferencia entre la mediana de las concentraciones de la estación CA-07 y el resto de las estaciones (Figura 7-13). Asimismo, la mencionada estación presentó un mayor rango intercuartílico de los datos, lo que indicó la alta variabilidad de las concentraciones obtenidas durante el periodo de monitoreo; además, la mediana de la estación CA-09 fue menor que la concentración promedio de las estaciones CA-06, CA-02, CA-04 y CA-08.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

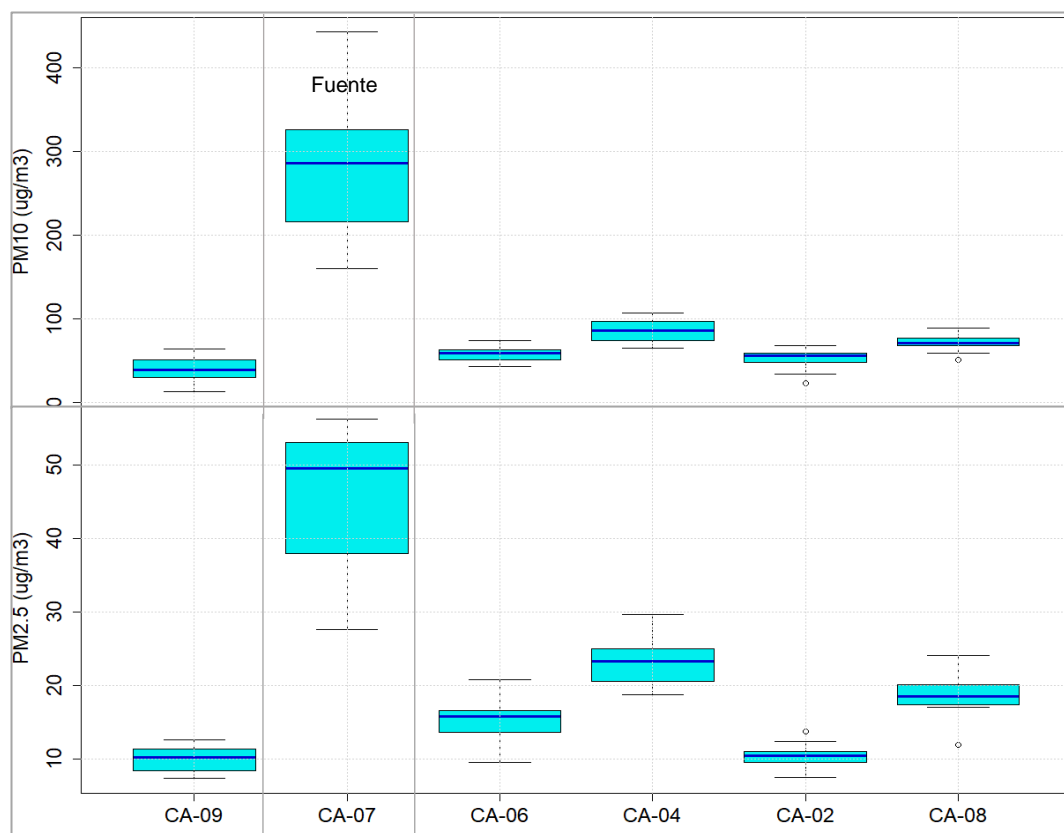


Figura 7-13. Distribución de las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2,5} en las estaciones de monitoreo

A continuación, se presentan los resultados de la línea de tiempo de las 6 estaciones de calidad de aire evaluadas con respecto a lo reportado por el OSINERGMIN y SMCV.

En las Figuras 7-14a y 7-14b se muestran las comparaciones entre los resultados de la estación CA-09 y la estación San José 1 de SMCV reportados el 2009 y 2010⁵² (aproximadamente a 800 m al noroeste de la estación CA-09, ambos ubicados en la cuenca San José). Las cuales indican que las concentraciones de PM₁₀ se mantuvieron similares a través del tiempo. Por otro lado, el material particulado PM_{2,5} presentó una diferencia significativa entre los resultados obtenidos por SMCV en octubre del 2009 y los resultados de la presente evaluación.

⁵²

R.D. N.º 159-2012-MEM/AAM. Quinta modificación al Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Sulfuros Primarios- Depósito de desmonte de Mina Sureste.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

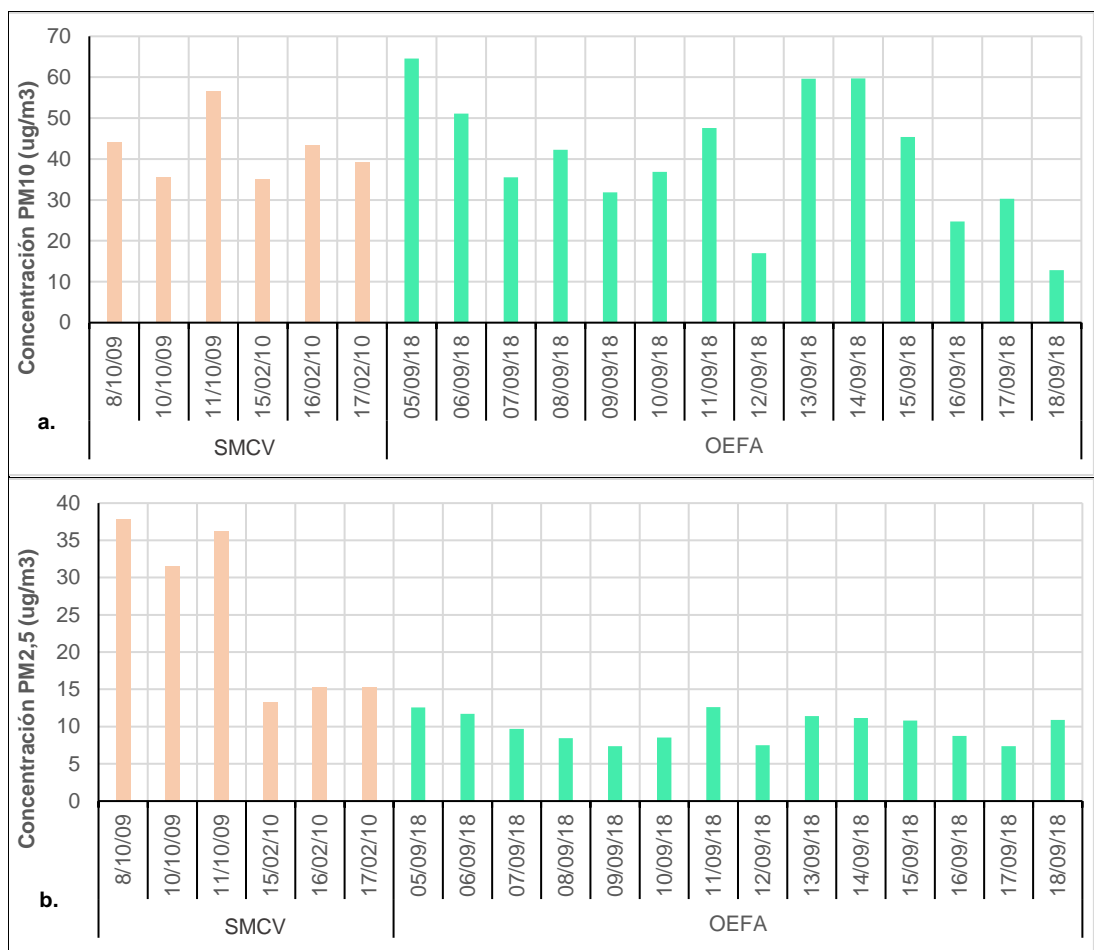


Figura 7-14. Comparación de concentración de material particulado **a.** PM₁₀ y **b.** PM_{2,5} entre las estaciones CA-09 (OEFA) y San José 1 (SMCV)

La Figura 7-15 muestra la comparación entre los resultados de la estación CA-07 y la estación Chancado Mirador de SMCV reportado el 2013 y 2017 y de OEFA en el 2013⁵³. Los resultados presentaron una alta variabilidad influenciado principalmente por la actividad minera. A partir del 2015, la concentración de PM₁₀ se incrementó, debido al inicio de operaciones de expansión de SMCV, tal como se estimó en el modelamiento de dispersión de material particulado⁵⁴.

⁵³

Informe de ensayo N.º MO13050098 - J. Ramón del Perú S.A.C.

⁵⁴

Resolución Directoral N.º 159-2012-MEM/AAM. Quinta modificación al Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Sulfuros Primarios- Depósito de desmonte de Mina Sureste.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

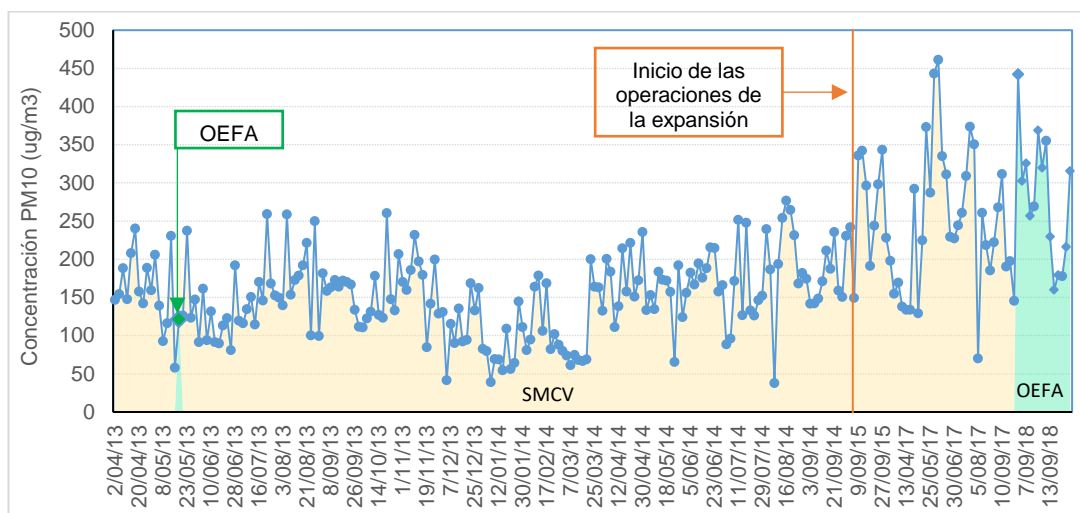


Figura 7-15. Concentraciones de material particulado PM₁₀ obtenidas en la estación CA-07 (OEFA) y la estación Chancado Mirador (SMCV)

Se compararon los resultados entre las estaciones CA-06 (ubicada en el Batolito de la Caldera) y KPH1 (ubicada aproximadamente a 70 m al suroeste de la estación CA-06) de SMCV reportado el 2007⁵⁵. La estación KPH1 presentó concentraciones entre 39 y 45 µg/m³ el 2007 y CA-06 entre 43 y 74 µg/m³ el 2018 (Figura 7-16).

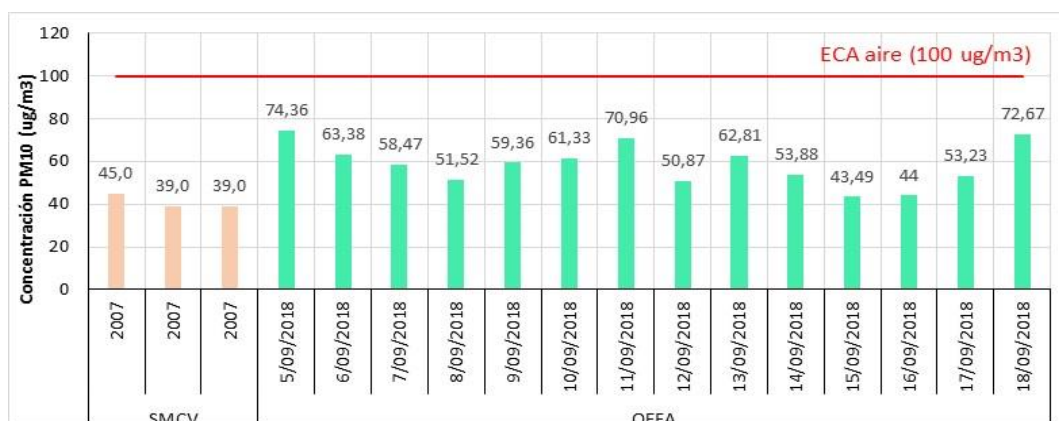


Figura 7-16. Concentración de material particulado PM₁₀ obtenidas en la estación CA-06 (OEFA) y estación KPH1 (SMCV)

Fuente: Datos obtenidos del Informe Técnico Sustentatorio de cambios menores en componentes de la Unidad de Producción Cerro Verde. R. D. N.° 262-2015-MEM-DGAAM

Por otro lado, en la estación Huayrondo (ubicada a 1,6 km al suroeste de la estación CA-06), las concentraciones de PM₁₀ reportadas por SMCV entre 2013 y el 2017 presentaron un incremento en el 2017 alcanzando concentraciones mayores a 180 µg/m³ (Figura 7-17).

55

Resolución Directoral N.° 262-2015-MEM-DGAAM. Informe Técnico Sustentatorio de cambios menores en componentes de la Unidad de Producción Cerro Verde.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

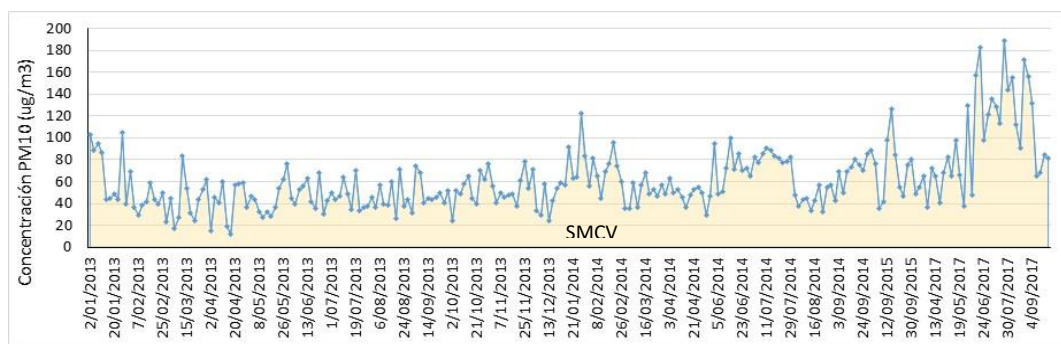


Figura 7-17. Concentración de material particulado PM₁₀ obtenidas en la estación CA-06 (OEFA) y estación Huayrondo (SMCV)

Fuente: Datos obtenidos de informes de monitoreo trimestral reportados por SMCV en el periodo 2013 - 2017.

En la Figura 7-18. se muestra los resultados de línea de tiempo para la estación de monitoreo CA-04 (ubicada en la I.E. Corazón de Jesús), los cuales fueron comparados con los reportados por SMCV desde el 2016 en la misma estación. Se observaron valores similares en el tiempo. En esta área de acuerdo a la rosa de vientos las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2,5}, provinieron de los distritos aledaños al noroeste (Hunter, Sachaca, Tiabaya, entre otros) en periodo diurno y al sureste (Quequeña, Yarabamba, entre otros) en periodo nocturno.

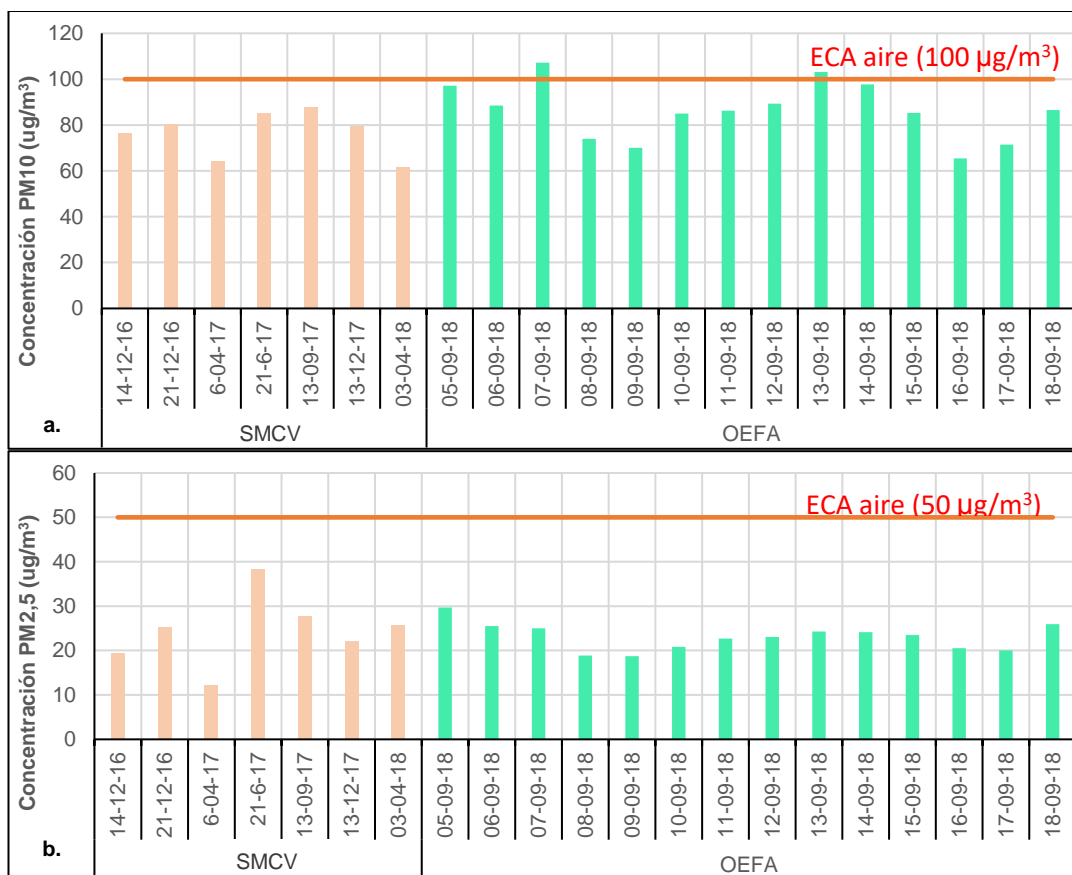


Figura 7-18. Concentraciones de material particulado **a.** PM₁₀ y **b.** PM_{2,5} obtenidas en la estación Corazón de Jesús (SMCV) durante el 2016, 2017 y 2018, y durante la evaluación

Fuente: Datos obtenidos de los informes de monitoreos participativos de SMCV.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

En la estación de monitoreo CA-08 (ubicada en el Pueblo Joven Cerro Verde), los resultados de línea de tiempo se compararon con los resultados obtenidos por el OSINERGMIN en el 2008 y 2009, y por SMCV desde el 2013 hasta el 2018. Respecto a las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ se observaron valores similares en el tiempo, con algunos valores que excedieron los ECA para aire (2017) reportados tanto por SMCV y el OSINERGMIN (Figura 7-19). En esta área de acuerdo a la rosa de vientos las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ provinieron de los distritos aledaños al sureste (Hunter, Sachaca, entre otros) en periodo diurno y al norte (Congata-Uchumayo) en periodo nocturno.

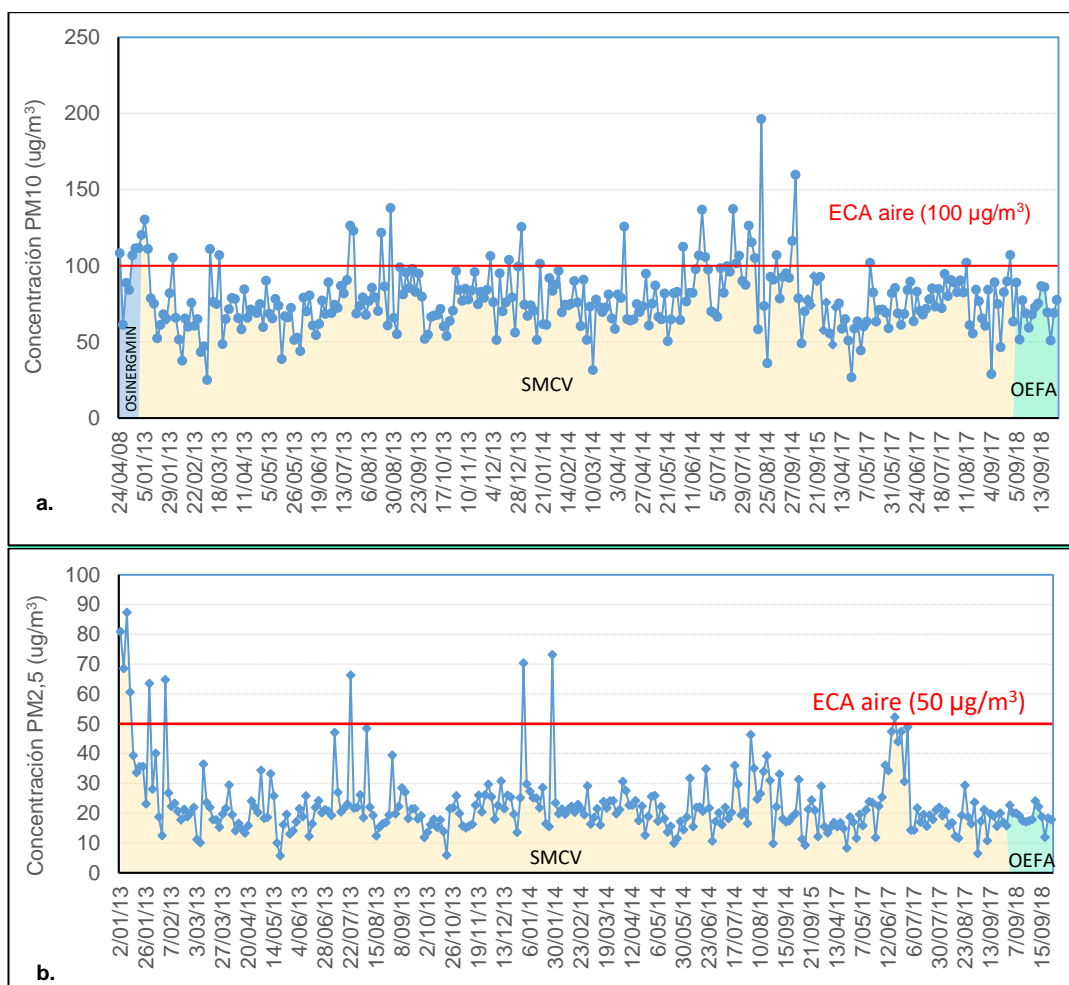


Figura 7-19. Concentraciones de material particulado **a.** PM_{10} y **b.** $PM_{2.5}$ obtenidas en la estación PPJJ Cerro Verde por el OSINERGMIN, SMCV y el OEFA

Fuente: Datos obtenidos de los reportes trimestrales de SMCV y monitoreos participativos del OSINERGMIN.

En la estación de monitoreo CA-02 (ubicada en el Banco Minero), los resultados de la línea de tiempo para PM_{10} se compararon con los resultados de SMCV, ubicado a 970 m al noreste de la estación CA-02. En esta estación, los valores se mantuvieron similares en el tiempo. De acuerdo a la rosa de vientos, las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ provinieron de los distritos aledaños al sureste (Yarabamba y Quequeña) en periodo diurno y al norte (Mollebaya, Characato, Socabaya, entre otros) en periodo



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

nocturno (Figura 7-20 a), asimismo, esta estación recibe aportes provenientes de operaciones de SMCV⁵⁶.

Los valores de concentración de material particulado $PM_{2,5}$ se compararon referencialmente con los resultados de la estación Yarabamba, ubicado a 2,38 km al este de la estación CA-02, por ser la estación más cercana con datos de $PM_{2,5}$. Se observa que los valores registrados en el 2013 presentaron mayor variabilidad, respecto a los valores obtenidos en los años posteriores, donde se observan valores similares y menores a $30 \mu g/m^3$ (Figura 7-20 b).

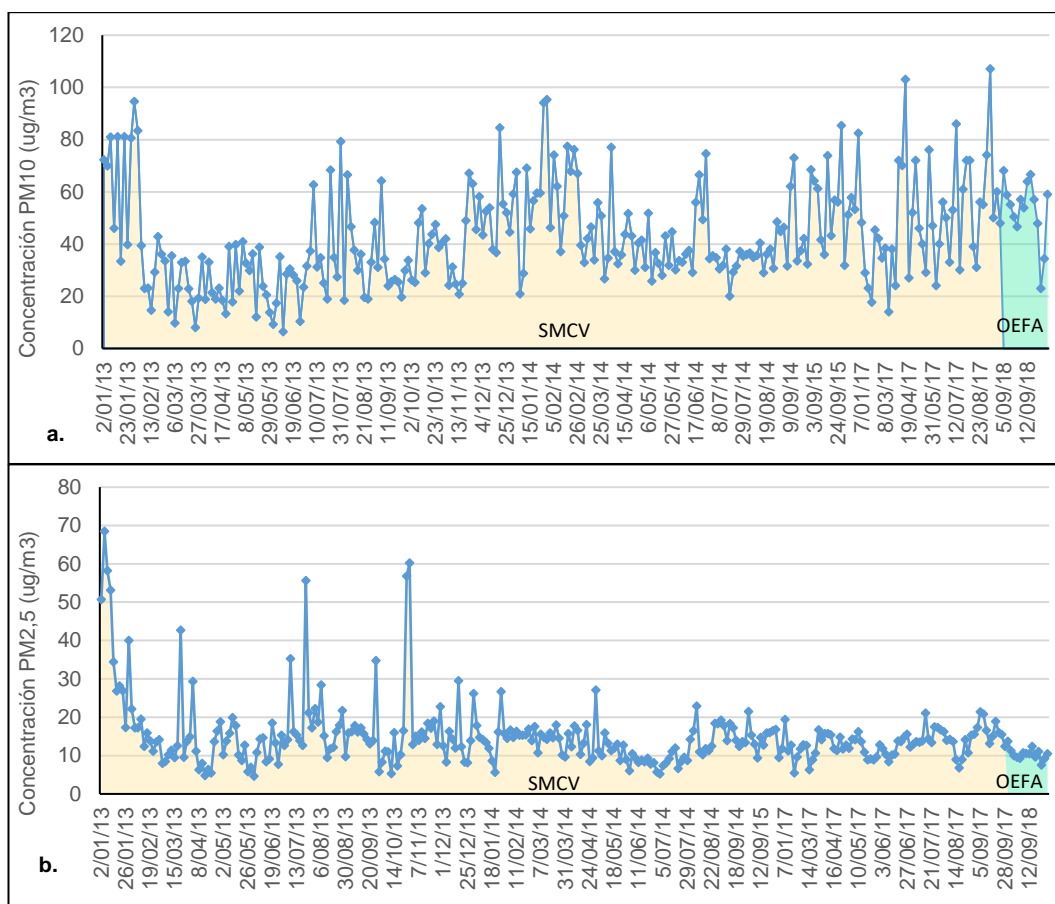


Figura 7-20. Concentraciones de material particulado durante la evaluación comparados con **a.** PM_{10} de la estación Banco Minero y **b.** $PM_{2,5}$ de la estación Yarabamba
Fuente: Datos obtenidos de los reportes trimestrales de SMCV.

Del análisis de correlación de las concentraciones de PM_{10} se observó que las estaciones ubicadas en la parte externa de la UP Cerro Verde (CA-02, CA-04 y CA-08) se correlacionaron positivamente⁵⁷. También, se presentó una correlación positiva entre las estaciones CA-07 y CA-06, ubicadas en el área de operación y el Batolito de la Caldera. Mientras que las concentraciones de PM_{10} de la estación CA-09 no registraron ninguna correlación, posiblemente por encontrarse alejada de la UP Cerro Verde (Figura 7-21).

⁵⁶ Resolución Directoral N° 072-2016-SENACE-DCA. Modificación del Estudio de Impacto Ambiental y Social de la Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde. Sección 3. Pág.3-21.

⁵⁷ Correlación: Mide el grado de asociación entre dos variables cuantitativas, cuando la correlación es positiva, la relación es directa; mientras que si la correlación es negativa, la relación es inversa.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

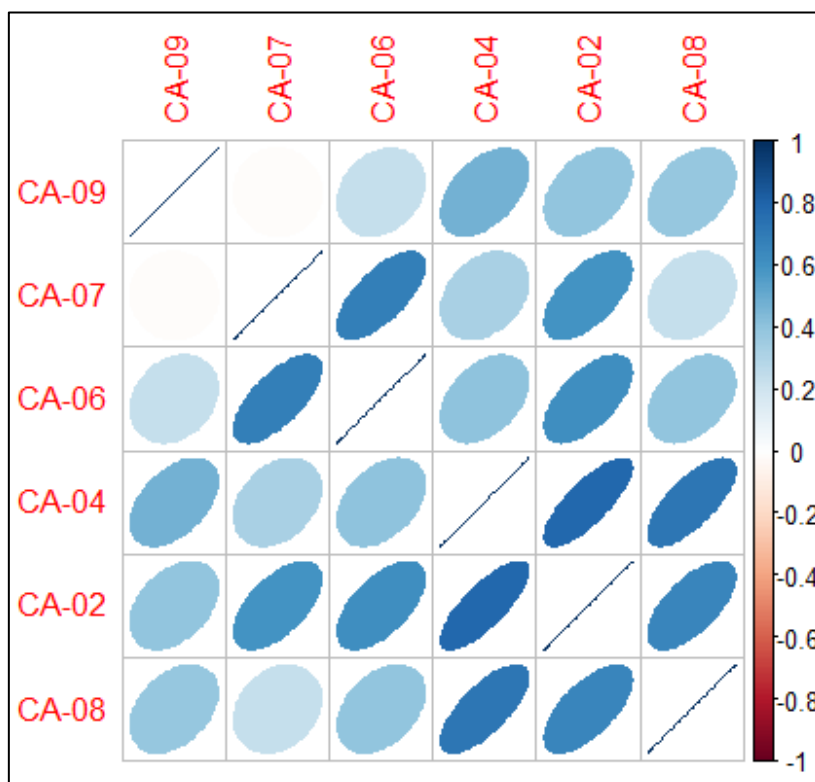


Figura 7-21. Correlación de concentración de material particulado PM₁₀

Respecto a las estaciones que presentaron correlación positiva para PM₁₀ (CA-02, CA-04 y CA-08) se realizó la revisión exploratoria para la concentración de metales en PM₁₀, donde solo se consideraron los elementos con concentraciones mayores al límite de cuantificación (Al, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Si, Sr, Ti y Zn). Con estos resultados se realizó el análisis de correlaciones considerando como trazadores el aluminio⁵⁸, como elemento mayoritario de la corteza terrestre; el cobre como elemento característico de la operación minera; y el potasio⁵⁹ como elemento característico de combustión de biomasa.

Para elaborar las figuras se empleó el software UNMIX, desarrollado por la USEPA, en donde la línea negra de segmentos representa la recta de mínimos cuadrados que pasa por el origen. Una línea roja indica que hay correlación entre ambos elementos. Dos líneas rojas envolviendo una nube de puntos indican que ese par de elementos aparecen en más de una fuente emisora.

Uso del aluminio como trazador

El aluminio (Al) es un trazador apropiado para caracterizar el material geológico (suelo superficial) que es resuspendido a la atmósfera por acción de la erosión del viento o por alguna actividad antrópica (Querol *et al.*, 2001).

De acuerdo a la Figura 7-22 existe una correlación entre el Si, Al, Ca, Fe, Sr y Ti, además se infiere la existencia de más de una fuente emisora de estos elementos de

⁵⁸ Querol X., Alastuey A., Rodríguez S., Plana F., Mantilla E., Ruiz C.R., 2001a. Monitoring of PM₁₀ and PM_{2.5} around primary particulate anthropogenic emission sources. *Atmospheric Environment* 35, 845-858

⁵⁹ Santoso *et al.*, 2008. Source identification of the atmospheric aerosol at urban and suburban sites in Indonesia by positive matrix factorization.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

la corteza terrestre al presentar dos líneas rojas. Por otro lado, con menor correlación aparecen el Mg y Mn, evidenciando un posible enriquecimiento del suelo con aportes de alguna otra fuente. Asimismo, los suelos aledaños a las estaciones de monitoreo de aire (CA-02, CA-04 y CA-08) presentaron como elementos predominantes Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Si, Sr, Ti, V y Zn.

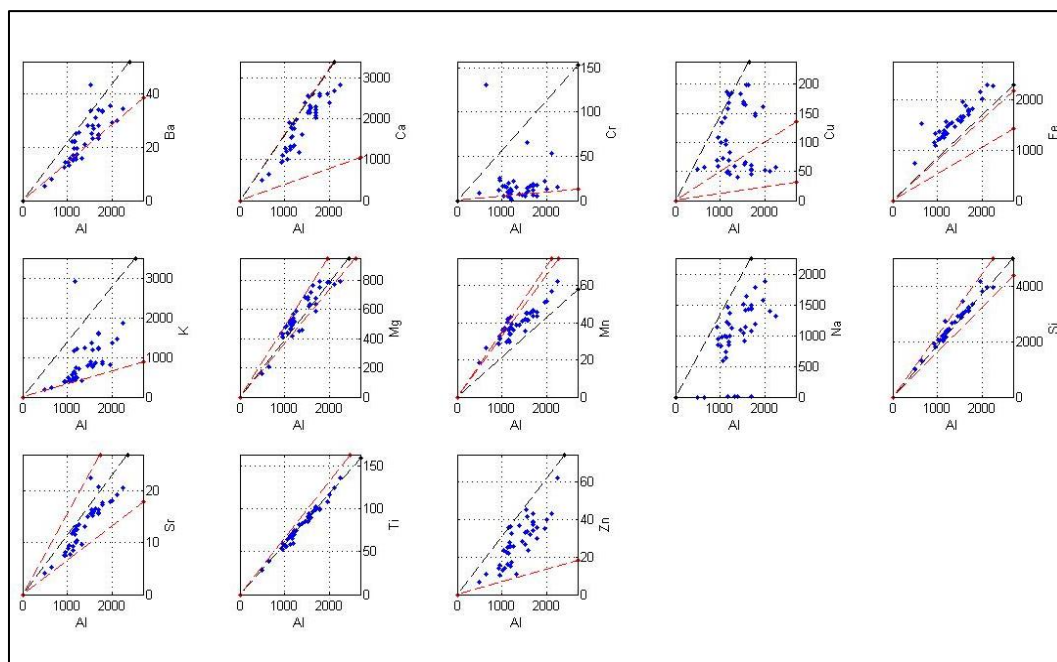


Figura 7-22. Dispersión de metales en PM₁₀, considerando el aluminio como especie independiente

Uso del cobre como trazador

En el caso particular de cobre, la Figura 7-23 muestra que los resultados no se encuentran correlacionados con ningún otro elemento, indicando una sola fuente emisora de este elemento.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

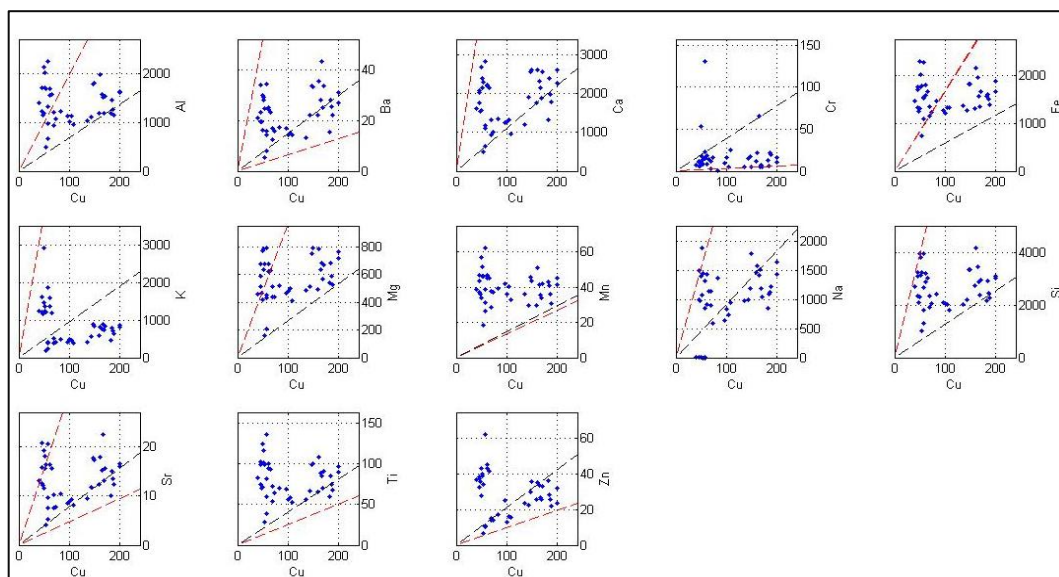


Figura 7-23. Dispersión de metales en PM_{10} considerando al cobre como especie independiente

De la comparación referencial de metales totales de la corteza terrestre (Wedepohl, 1984) con las concentraciones de suelos aledaños a las estaciones de monitoreo de aire (SU-09, SU-06, SU-04, SU-02 y SU-10) (Figura 7-24), muestra que los elementos Al, Ba, Be, B, Cd, Ca, Co, Cr, Sn, Sr, P, Fe, Li, Mg, Mn, Hg, Mo, Ag, Pb, K, Se, Si, Na, Ti, V y Zn mantienen la misma tendencia que en la corteza terrestre, lo que indicaría que son concentraciones propias de la naturaleza del área. Mientras que el As, Cu, Mo y Zn de la muestra de suelo del área de operación de SMCV (SU-07), por sus concentraciones mayores a la de la corteza terrestre, están relacionadas con la mineralización del yacimiento «Cerro Verde» por encontrarse en la franja «Metalogenética XIII de pórfidos Cu-Mo del Paleoceno» (Acosta *et al.*, 2009).

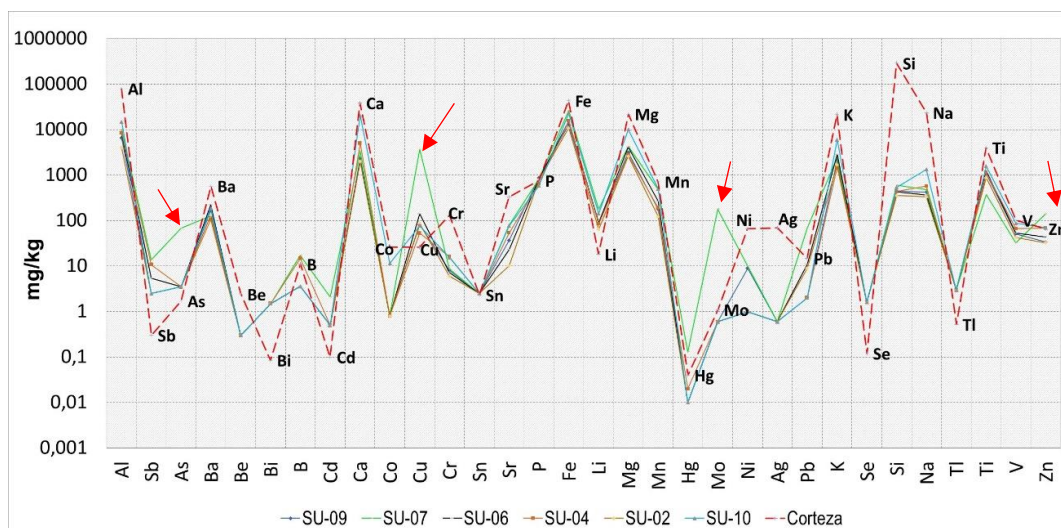


Figura 7-24. Comparación referencial de concentración de metales de la corteza terrestre con las muestras de suelos

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Uso del potasio como trazador

El análisis químico mostró altas concentraciones de potasio en filtros PM_{10} ; sin embargo, estos resultados no se encuentran correlacionados con ningún otro elemento indicando una sola fuente emisora de este elemento (Figura 7-25).

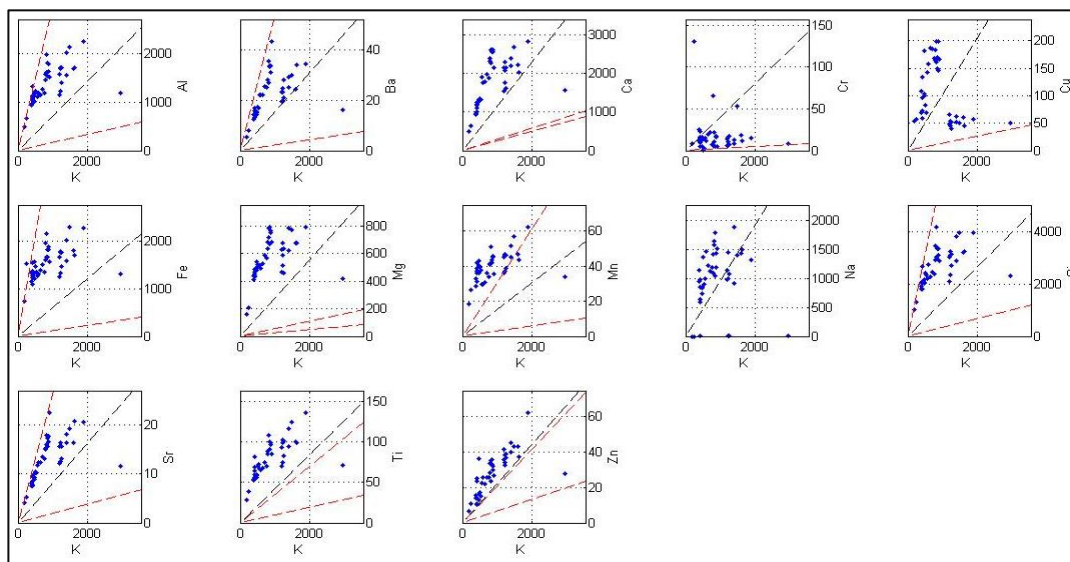


Figura 7-25. Dispersión de metales en PM_{10} , considerando al potasio como especie independiente

Aplicación del modelo receptor

Se consideró las estaciones CA-02, CA-04 y CA-08 como un solo receptor, con la finalidad de explicar si las características del material particulado provienen de un conjunto de factores que representen las diferentes fuentes de emisión que las afectan; ya que los resultados de PM_{10} se correlacionaron en estas estaciones (Figura 7-21).

De acuerdo a un primer cálculo se tiene que los elementos metálicos analizados representaron un 11,9 % de la masa total de las partículas de PM_{10} muestreadas en estas estaciones. Asimismo, la aplicación del PMF (*Positive Matrix Factorization*) permitió identificar 4 factores asociados a las posibles fuentes de aporte de metales (Figura 7-26).



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

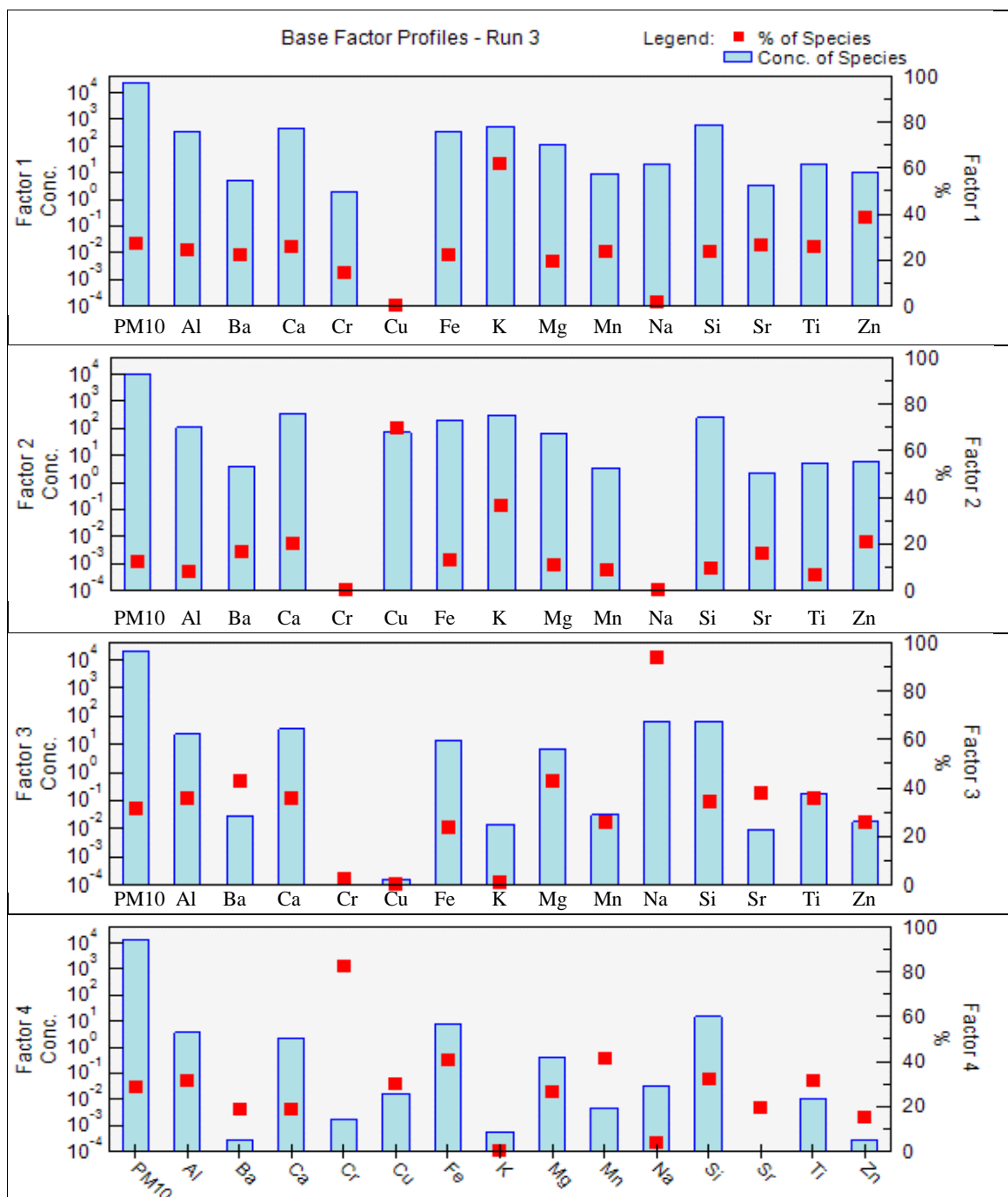


Figura 7-26. Perfil de factores asociados a fuentes de metales en PM₁₀

El primer factor (F1) que contribuyó con el 27% de la masa de las especies modeladas (3,2 % de la masa total), se caracterizó por presentar alta correlación con el potasio. Estas concentraciones de potasio estarían relacionadas a la combustión de los materiales herbáceos (biomasa) y algunos residuos agroindustriales cuyas cenizas contienen principalmente potasio (Santoso *et al.*, 2008); además, de acuerdo a la caracterización química en muestras de PM₁₀ realizados por SMCV⁶⁰, las principales

⁶⁰

Freeport- McMoRan. 2017. Caracterización química en muestras de PM₁₀ obtenidas en el segundo monitoreo ambiental participativo realizado el 14 de junio de 2017 en los distritos de Uchumayo, Tiabaya, Hunter, Quequeña y Yabamba. Sociedad Minera Cerro Verde.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

especies identificadas fueron el carbono orgánico, carbono total y sulfatos, y según el perfil químico con código [3241], de la base de datos *Speciate* 4.5 de la USEPA, estaría relacionado con fuentes de combustión de biomasa en campos agrícolas, el mismo que fue evidenciado durante el periodo de monitoreo (Figura 7-27).



Figura 7-27. Quema de biomasa en campos de cultivo agrícola

El segundo factor (F2) contribuyó con el 12 % de la masa de las especies modeladas (1,4 % de la masa total), presentando alta correlación con el cobre y en menor proporción con el bario, calcio, hierro, potasio, magnesio, manganeso, silicio, estroncio, titanio y zinc; estos elementos estarían relacionados con la actividad minera, de acuerdo al perfil de muestras de suelo del área de Chancado Mirador (Anexo 7), así como la comparación de concentraciones de metales de la corteza terrestre con las concentraciones de muestras de suelo de esta área (Figura 7-24).

Así también, según el análisis mineralógico realizado en una de las fuentes de generación de material particulado (Chancador) por SMCV⁶¹, los principales minerales reportados fueron: calcopirita, covelita, esfalerita, molibdenita, pirita, entre otros; este resultado se corroboró en esta evaluación, de acuerdo al análisis de microscopía electrónica realizado en el material particulado PM₁₀ de la estación de monitoreo CA-07, ubicado en el Chancado Mirador, donde se identificaron los minerales mencionados (Anexo 5).

De manera similar, de acuerdo al análisis de microscopía electrónica realizado en material particulado PM₁₀ de la estación de monitoreo CA-04, ubicada en la I.E. Corazón de Jesús y en la estación CA-06, ubicada en el Batolito de la Caldera, se

⁶¹

R. D. N.º 403-2012-MEM-AAM. Estudio de Impacto Ambiental del proyecto Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde. Observación 95.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

identificaron los minerales esfalerita, molibdenita, covelita, calcopirita y pirita (Anexo 5). Asimismo, durante el periodo monitoreo se observó la dispersión de material particulado por encima del Batolito de la Caldera en horarios correspondientes a las voladuras realizadas al interior de la UP Cerro Verde, a pesar de presentarse flujos de vientos con direcciones completamente diferentes, en el área de operaciones de la UP Cerro Verde y la zona urbana (Cuenca Atmosférica de Arequipa). Cabe indicar que las concentraciones promedio de 24 horas de material particulado PM_{10} , en las estaciones ubicadas en los distritos de Socabaya (CA-04), Yarabamba (CA-02) y Uchumayo (CA-08) no excedieron los ECA para aire (2017).

Cabe señalar que, el valor obtenido 1,4 % ($\sim 1,4 \mu g/m^3$ de $100 \mu g/m^3$), es menor al aporte estimado que recibirían los receptores sensibles identificados en la cercanía de la UP Cerro Verde ($< 5 \mu g/m^3$), según el modelamiento de material particulado PM_{10} realizado en el Estudio de Impacto Ambiental del proyecto de Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde⁶² y su modificatoria⁶³.

El tercer factor (F3), que contribuyó con el 32 % de la masa de las especies modeladas (3,8 % de la masa total), presentó alta correlación con el sodio, magnesio y calcio y en menor proporción con los elementos mayoritarios de la corteza terrestre como el aluminio, hierro y silicio (Wedephol, 1995), este resultado se ajusta principalmente con el perfil de muestra de suelo y polvo sedimentado obtenido en el Pueblo Joven Cerro Verde (Figura 7-28), lo que indicaría que este factor se encuentra influenciado principalmente por la resuspensión del suelo por actividad eólica y tránsito vehicular en general⁶⁴, así como por actividades de las canteras de explotación de materiales no metálicos.

Este perfil también presentó elementos como el bario y titanio, los cuales son buenos trazadores de emisiones de material particulado PM_{10} asociado a fuentes antropogénicas por su amplia aplicación en diferentes industrias; la baritina ($BaSO_4$) es usada en la industria del papel, tintes, vidrios, aislantes, etc. (Miras, 1992). Así también el bario es un buen trazador de emisiones originadas por desgaste de frenos vehiculares⁶⁵.

Lo indicado en el párrafo anterior se corroboró con el análisis de microscopía electrónica realizado en material particulado PM_{10} para la estación de monitoreo CA-04, ubicado en la I.E. Corazón de Jesús, donde se identificaron minerales como la baritina ($BaSO_4$) y el rutilo (TiO_2) (Anexo 5).

⁶² Resolución Directoral N.º 403-2012-MEM-AAM. Estudio de Impacto Ambiental del proyecto Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde.

⁶³ Resolución Directoral N.º 072-2016-SENACE-DCA. Modificación del Estudio de Impacto Ambiental y Social de la Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde.

⁶⁴ Consejo Nacional del Ambiente; Gesta Zonal del Aire Arequipa. Plan a Limpiar el Aire: Arequipa 2005.

⁶⁵ Consejería De Infraestructuras, Ordenación Del Territorio y Medio Ambiente. 2015. Estudio de contribución de fuentes en las partículas en suspensión PM_{10} de Gijón. España.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»



Figura 7-28. Resuspensión de material particulado **a.**, **b.** y **c.** Tránsito vehicular en vías sin pavimentar y **d.** Explotación de materiales no metálicos – Concretos Supermix S.A. Proyecto La Enlozada

El cuarto factor (F4) contribuyó con el 29 % de la masa de las especies modeladas (3,5 % de la masa total), presentando alta correlación con el hierro, cromo, manganeso y el titanio; estos elementos se encuentran asociados con la industria metal-mecánica. Además, en el análisis de microscopía electrónica realizado en material particulado PM_{10} se identificaron aleaciones de hierro-cromo (Anexo 5); estas aleaciones de acuerdo con Ospina *et al.*, (2007) corresponden a aceros aleados con cromo, molibdeno, níquel, tungsteno, vanadio, silicio, manganeso, etc., para aumentar su resistencia mecánica.

Los resultados del modelo de receptor para el PM_{10} en forma de gráfico de torta (Figura 7-29), muestra que los principales aportantes de los metales modelados (Al, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Si, Sr, Ti y Zn) están relacionados a la resuspensión del suelo (F3), industria metal-mecánica (F4), quema de biomasa (F1) y actividad minera en general (F2).

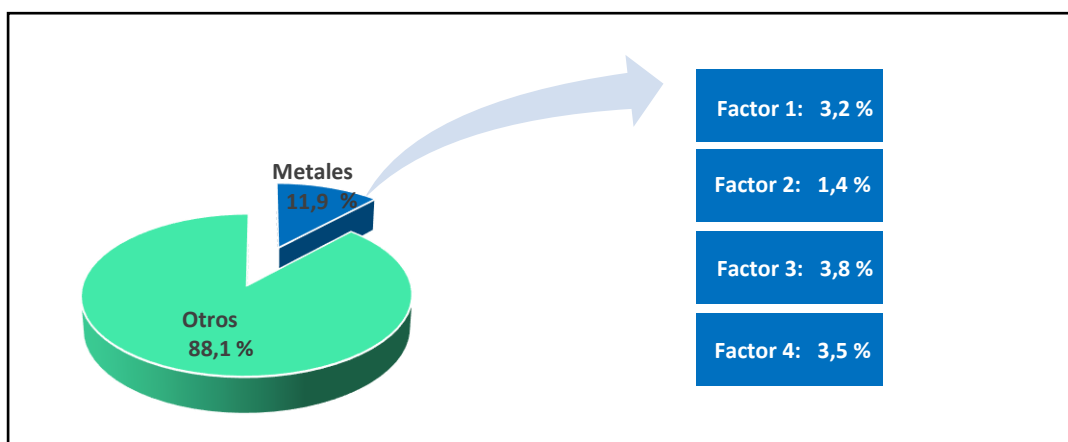


Figura 7-29. Porcentaje de contribución de metales a la masa del PM₁₀ por factores identificados

La fracción denominada «otros», que corresponde al 88 % de la masa total de las partículas de PM₁₀ muestreadas en esta zona (área urbana), de acuerdo a los resultados de caracterización química realizado por SMCV⁶⁶ en muestras de PM₁₀, estaría conformado por materia orgánica, carbono orgánico total, sulfato de amonio y nitrato de amonio, asociados principalmente a los procesos de combustión en general.

Agua subterránea

Zona I: Depósito de relaves Enlozada

En esta zona se evaluó el agua subterránea mediante 37 piezómetros circundantes al depósito de relaves, de los cuales 8 (ASB-78, ASB-79, ASB-80, ASB-05, ASB-118, ASB-82, ASB-08 y ASB-120) se encuentran aguas abajo del sistema de colección de filtraciones, 18 en el estribo izquierdo (ASB-85, ASB-112, ASB-83, ASB-103, ASB-03, ASB-94, ASB-95, ASB-96, ASB-97, ASB-98, ASB-99, ASB-102, ASB-106, ASB-14, ASB-15, ASB-26, ASB-115 y ASB-117), 9 en el estribo derecho (ASB-46, ASB-91, ASB-92, ASB-101, ASB-107, ASB-108, ASB-109, ASB-110 y ASB-113) y 2 aguas arriba del depósito de relaves (ASB-02 y ASB-90).

Las mayores concentraciones de sulfatos y cloruros fueron registradas en el estribo izquierdo y aguas abajo del depósito de relaves, mientras que las menores concentraciones se registraron en el estribo derecho (Figura 7-30).

⁶⁶

Caracterización química en muestras de PM₁₀ obtenidas en el segundo monitoreo ambiental participativo realizado el 14 de junio de 2017 en los distritos de Uchumayo, Tiabaya, Hunter, Quequeña y Yarabamba. Sociedad Minera Cerro Verde.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

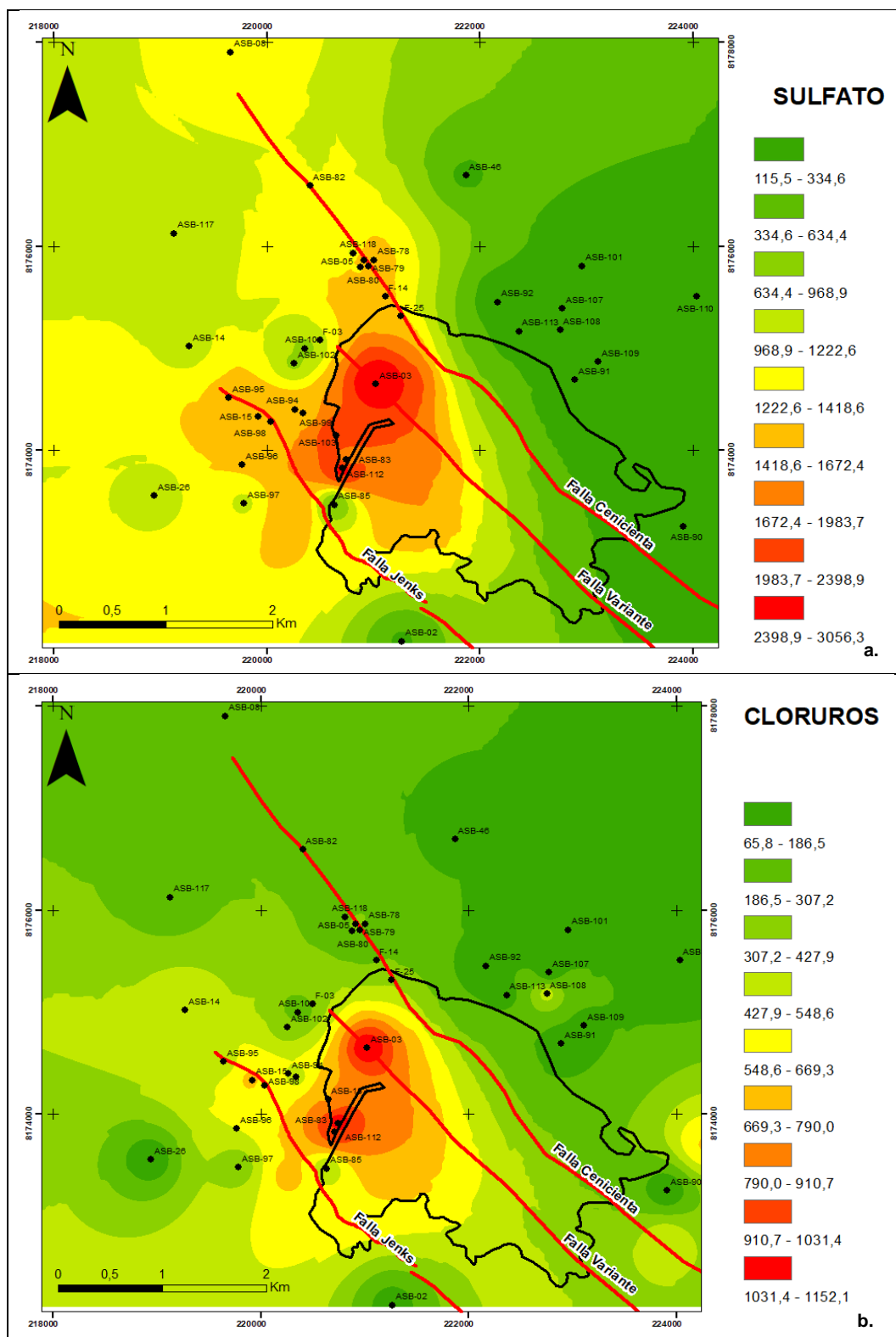


Figura 7-30. Distribución de las concentraciones de **a.** sulfatos y **b.** cloruros en el agua de los piezómetros circundantes al depósito de relaves Enlozada



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

En la zona I - Enlozada se priorizó para el análisis, los piezómetros ASB-05 (aguas abajo del sistema de colección de filtraciones⁶⁷), ASB-15, ASB-94 y ASB-14 (estribo izquierdo del depósito de relaves) debido a que las concentraciones de cloruros y sulfatos fueron incrementándose a través del tiempo. Los metales registraron concentraciones bajas o incluso por debajo del límite de detección del método del laboratorio por lo que no fueron considerados.

Además, se evaluaron las características fisicoquímicas de 3 filtraciones (F-03, F-14 y F-25) aguas abajo del depósito de relaves Enlozada, el agua del punto F-25 forma parte del sistema de drenaje de filtraciones que junto con el agua de los puntos F-03 y F-14 (filtraciones) son colectadas hacia el sumidero de colección de filtraciones para su posterior recirculación al proceso (Figura 7-31).

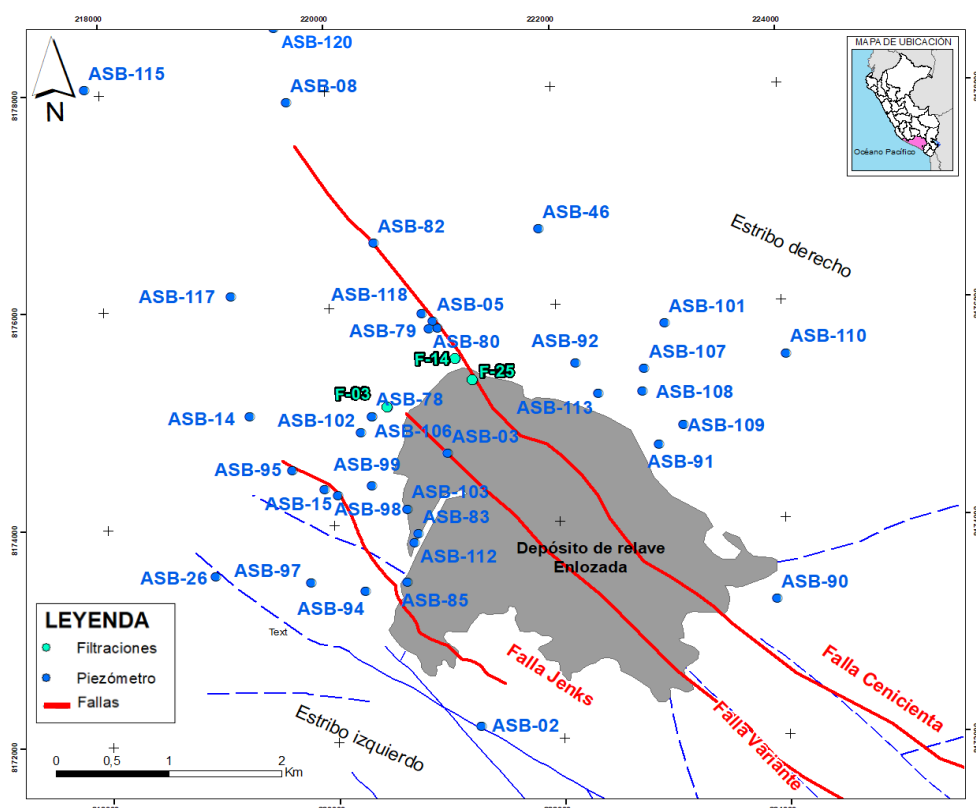


Figura 7-31. Distribución de los piezómetros y filtraciones en el área circundante al depósito de relaves Enlozada

67

R.D. N.º 403-2012-MEM-AAM. Estudio de Impacto Ambiental del proyecto Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde. Sección 5.

« (...) En general, el sistema de colección de filtraciones estará conformado por los siguientes componentes:

- Sumidero de colección de filtraciones
- Berma de contención
- Aliviadero
- Cortina de lechada de cemento (cortina de grout)
- Pozos de monitoreo con bombeo de recirculación de filtraciones (...)

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Debido a que, el depósito de relaves presenta rocas fracturadas -hasta los primeros 20 m ó 30 m de profundidad⁶⁸ aproximadamente- así como fallas con dirección SE-NW, Cenicienta (15 m de ancho) y Variante (10 m – 30 m de ancho)^{69,70} que estarían incrementando la permeabilidad de las rocas⁷¹; y la dirección del flujo de agua (SE-NW), que favorecerían que una parte de las filtraciones lleguen al sumidero, mientras que otra podría seguir filtrándose sobrepasando esta barrera (sumidero), Figura 7-32. Lo que se corroboró con los resultados históricos obtenidos en el agua subterránea del piezómetro ASB-05 (ubicada a 170 m aguas abajo del sumidero) e inferidos de los perfiles tomográficos (L-1 y L-2) que registraron zonas de bajas resistividades ($< 8 \Omega\text{hm.m.}$) asociadas a posibles filtraciones, que coinciden con los resultados obtenidos por SMCV en el 2017⁷² (Figura 7-33).

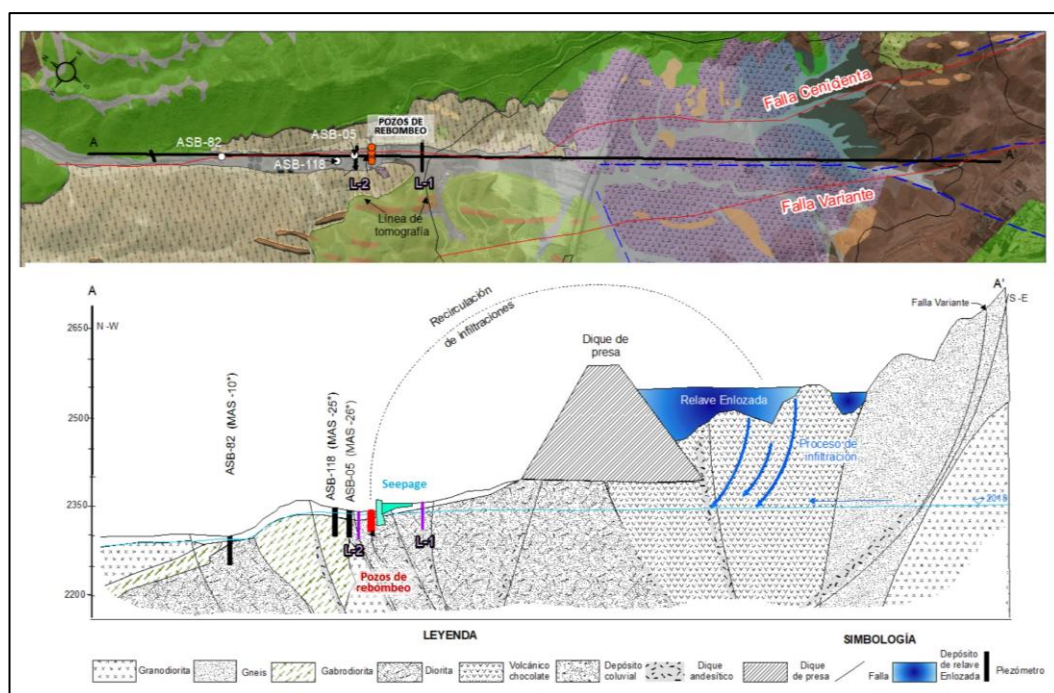


Figura 7-32. Vista esquemática en planta y perfil de los piezómetros aguas abajo del depósito de relaves Enlozada

⁶⁸ R.D. N.º 748-2004-MEM-DGAAM. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Sulfuros Primarios. Resumen ejecutivo de obras civiles.

«(...) Los suelos de la base se humedecerán completamente y luego se compactarán por un mínimo de seis pasadas de un camión 789 totalmente cargado(...)»

«(...) Antes de colocar las arenas de relave, se limpiará de piedras superiores a 20 cm la parte de cimiento a ser cubierto por el relave (...)».

⁶⁹ MWH, 2008. Final Report Evaluation of Seeps & Potential Impacts Quebrada Enlozada Tailing Storage Facility. Prepared for Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. December 2008.

⁷⁰ MWH, 2005. Cerro Verde Tailing Storage Facility Final Design. Prepared for Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. November 2005.

⁷¹ Schlumberger Water Services Perú S.A. 2011. Estudio hidrogeológico de área de la faena Cerro Verde. Pág. 26.
⁷² GC Ground S.A.C. 2017. Reporte geofísico. Tomografía geoelectrica. Proyecto Ares del seepage- Quebrada Enlozada.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

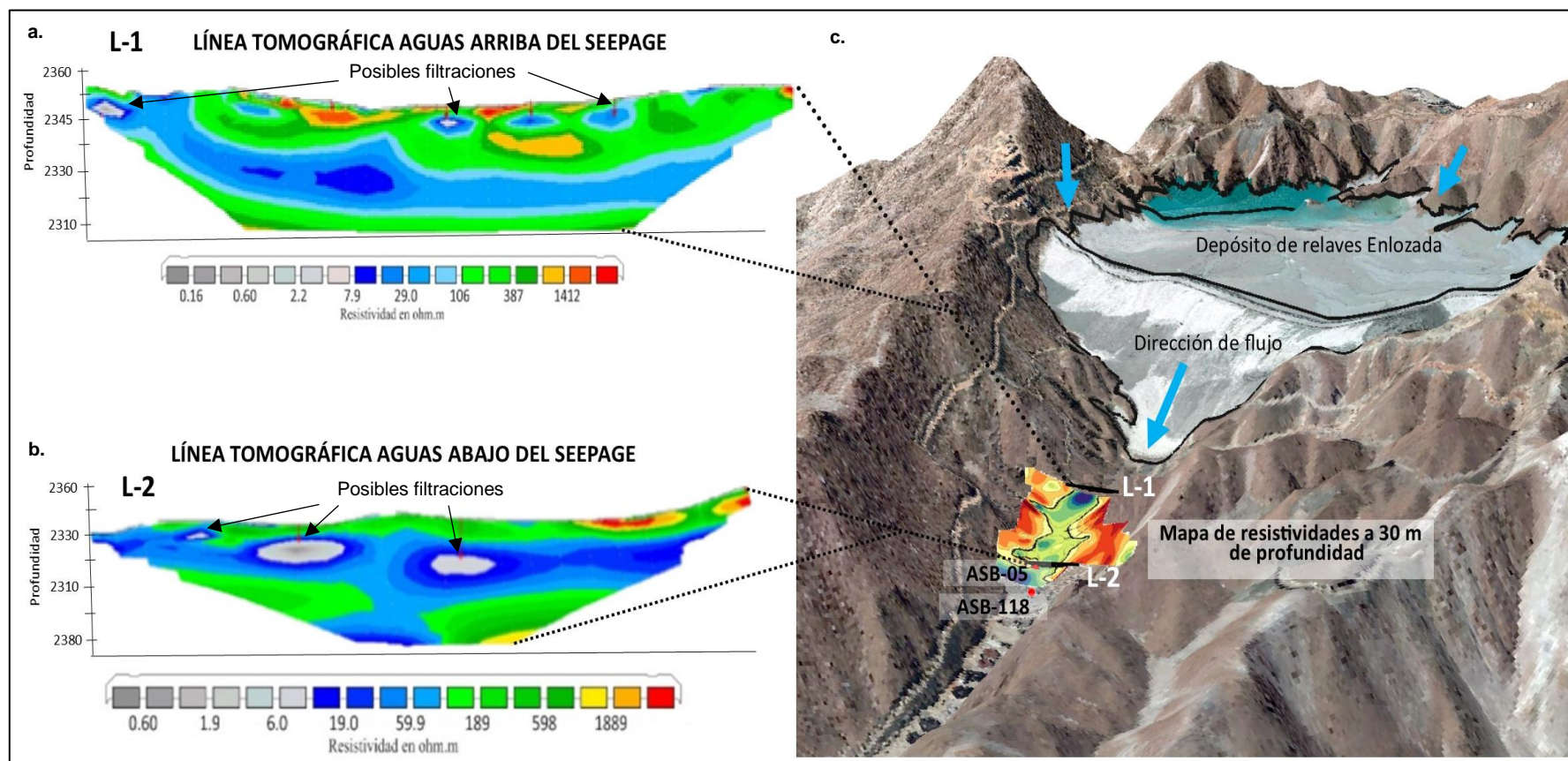


Figura 7-33. Estudios de prospección geofísica realizados por el OEFA **a.** L-1, **b.** L-2 y **c.** SMCV aguas arriba y abajo del sumidero de colección de filtraciones del depósito de relaves Enlozada

Fuente: GC Ground S.A.C. 2017. Reporte geofísico. Tomografía geoelectrica. Proyecto Ares del seepage- Quebrada Enlozada y estudios geofísicos de la evaluación



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Para poder determinar la fuente aportante de estos aniones (cloruros y sulfatos) se caracterizó el relave (fase líquida y sólida). El agua sobrenadante presentó un pH alcalino (11,82 a 11,88 unidades), cloruros entre 366 mg/l y 413,7 mg/l, y sulfatos entre 1652 mg/l y 1906 mg/l, lo cual concuerda con la información de resultados obtenidos por SMCV del 2008 al 2012⁷³.

La caracterización hidroquímica de la fase líquida del revale la clasificó como sulfatada cálcica, con concentraciones de iones mayoritarios (Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) de 0 a 40 meq/l, similares características fueron registradas en las filtraciones con concentraciones ligeramente mayores de iones mayoritarios (0 a 60 meq/l). Además, según las relaciones binarias (Ca- SO_4 , Sr- SO_4 , Ca- Cl y Sr- Cl) el agua del piezómetro ASB-05 se agrupó en una zona de mayor concentración con el agua anteriormente mencionada, mientras que los demás piezómetros se agruparon en una zona de menor concentración (Figura 7-34).

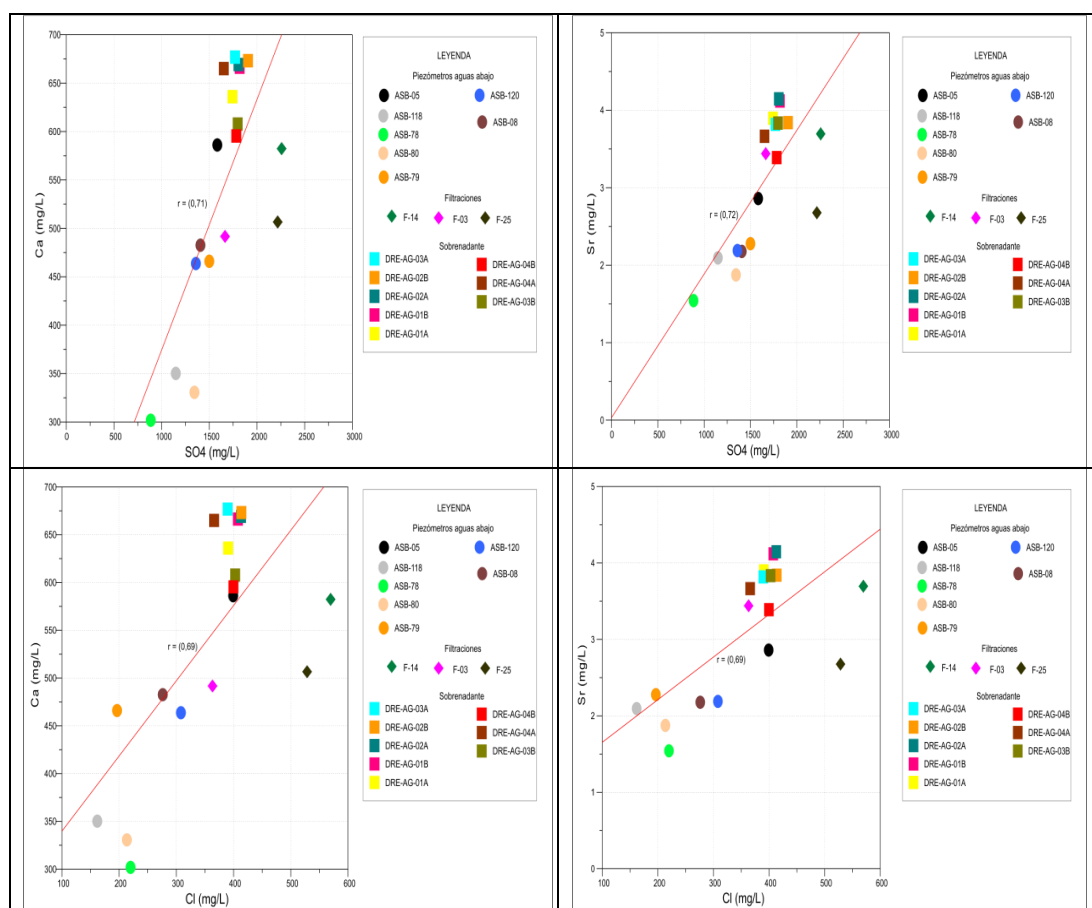


Figura 7-34. Relaciones binarias (Ca- SO_4 , Sr- SO_4 , Ca- Cl y Sr- Cl) entre el agua subterránea de los piezómetros aguas abajo del depósito de relaves Enlozada, filtraciones y relave

73

R.D. N.º 403-2012-MEM-AAM. Estudio de Impacto Ambiental del proyecto Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde. Anexo 6.5 Caracterización Geoquímica del Proyecto de Expansión 360 de Mina (LOM 2040). Figura E-2.1.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

De la comparación del registro histórico (SMCV, OSINERGMIN y OEFA) del 2002 al 2018, las concentraciones de sulfatos y cloruros en el agua subterránea del piezómetro ASB-05 (MAS-26) se incrementaron (sulfatos: de 858 a 1852 mg/l; cloruros: de 203 a 473,7 mg/l), posiblemente debido a las filtraciones del relave con alto contenido de estos aniones liberados de fase sólida a líquida de este componente minero, según la prueba de lixiviación SFE (cloruros: 186 mg/l y 205 mg/l; sulfatos: 1679 mg/l y 1756 mg/l). Cabe indicar que, el agua subterránea del piezómetro ASB-03, ubicado al pie del dique del depósito de relaves, presentó las mayores concentraciones de cloruros (935,8 mg/l y 1154 mg/l) y sulfatos (2404 mg/l y 3061 mg/l) en comparación a los demás piezómetros de esta zona (Figuras 7-35).

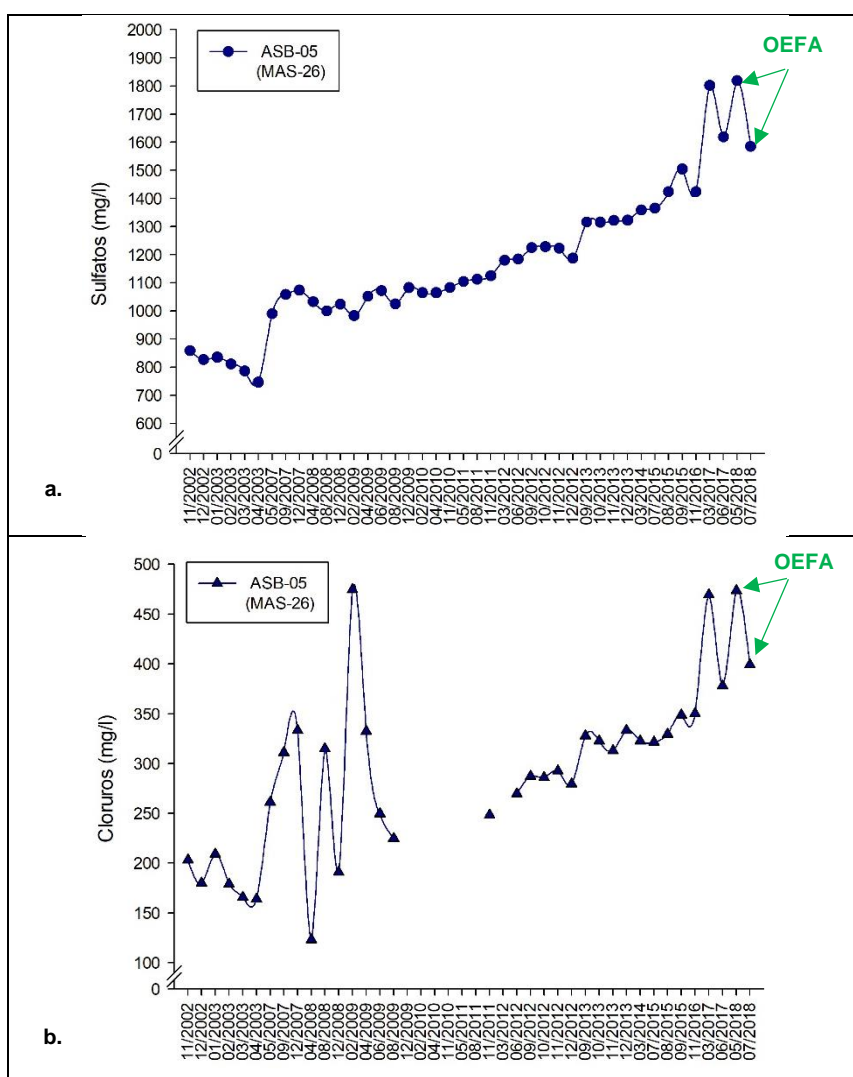


Figura 7-35. Registro histórico de **a.** sulfatos y **b.** cloruros en el agua subterránea del piezómetro ASB-05 (MAS-26)

Fuente: R.D. N.º 748-2004-MEM-DGAAM. Proyecto Sulfuros Primarios.

Informes de monitoreo participativo del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería – OSINERGMIN.

Informes de monitoreo ambiental participativo de SMCV.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

Debido al incremento de las concentraciones de estos aniones en el agua subterránea del piezómetro ASB-05 (MAS-26) durante el 2007, SMCV instaló 8 pozos de rebombeo (MW-01 al MW-08) para controlar las filtraciones que sobrepasen esta barrera (*seepage*⁷⁴)⁷⁵. Es por ello que, siguiendo la misma dirección del flujo, el agua subterránea del piezómetro ASB-118, ubicado aproximadamente a 100 m aguas abajo del piezómetro ASB-05, no presentó variaciones significativas en las concentraciones de cloruros y sulfatos entre el 2002 y el 2018 (Figura 7-36).

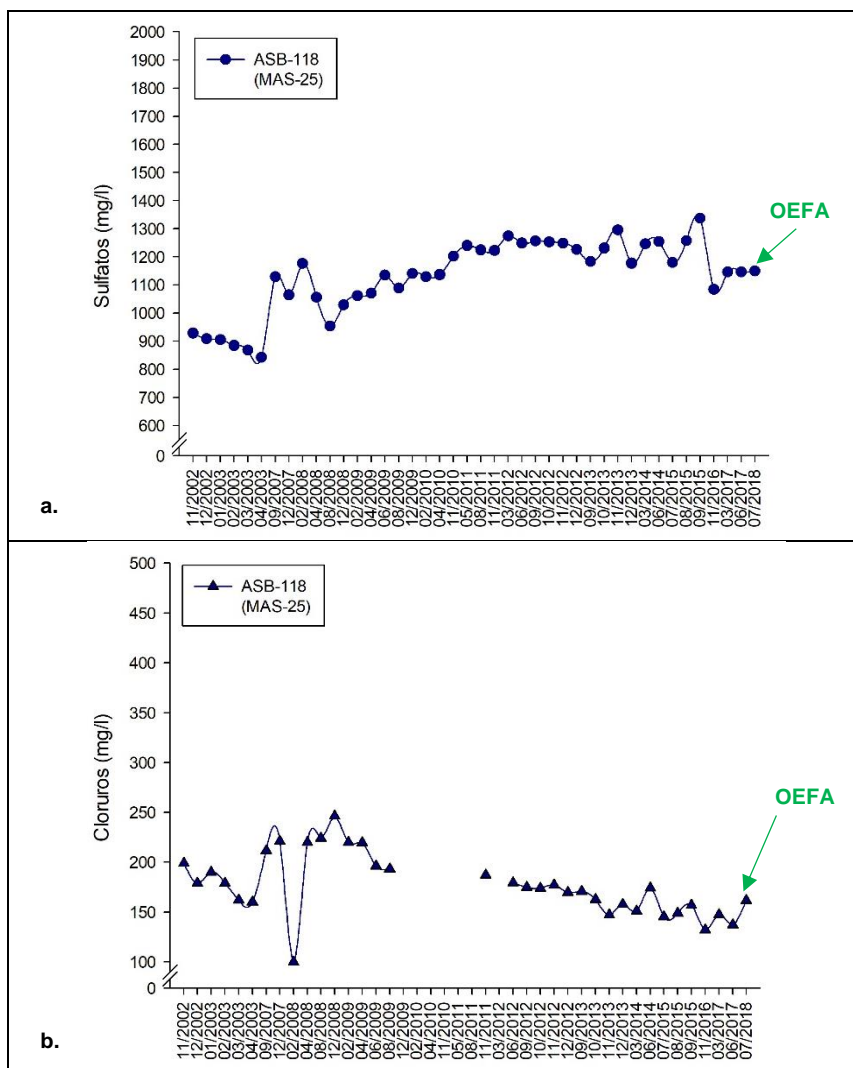


Figura 7-36. Registro histórico de a. sulfatos y b. cloruros en el agua del piezómetro ASB-118 (MAS-25)

Fuente: R.D. N.º 748-2004-MEM-DGAAM. Proyecto Sulfuros Primarios.

Informes de monitoreo participativo del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería – OSINERGMIN.

Informes de monitoreo ambiental participativo de SMCV.

⁷⁴

La denominación «*seepage*» es equivalente a «sumidero de colección de filtraciones».

⁷⁵

R.D. N.º 403-2012-MEM-AAM. Estudio de Impacto Ambiental del proyecto Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde. Observación N.º 24.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

El estribo izquierdo está constituido por rocas dioritas, granodioritas, diques andesíticos y calizas, siendo esta última roca la que podría comportarse como una zona de debilidad por la existencia de la falla Jenks⁷⁶ (alta permeabilidad, $1,4 \times 10^{-4}$ cm/s⁷⁷) que la atraviesa (Figura 7-38), lo que facilitaría la migración de filtraciones y agua subterránea de acuerdo a la dirección del flujo preferencial NW-SE⁷⁸.

Las condiciones anteriormente mencionadas se corroboraron con los resultados de agua subterránea en el piezómetro ASB-15 ubicado en la misma dirección de la falla Jenks y del flujo subterráneo, inferidos de la prospección geofísica realizadas por el OEFA y SMCV⁷⁹; así como con las concentraciones de sulfatos y cloruros⁸⁰ que presentaron un incremento significativo durante el 2015, manteniendo estas concentraciones alcanzadas hasta el 2018 (Figura 7-37).

⁷⁶ MWH, 2005. Cerro Verde Tailing Storage Facility Final Design. Prepared for Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. November 2005. Volume 2-I - Geological and Geotechnical Site Investigations and Assessments.

⁷⁷ MWH, 2008. Final Report Evaluation of Seeps & Potential Impacts Quebrada Enlozada Tailing Storage Facility. Prepared for Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. December 2008.

⁷⁸ Información proporcionada por SMCV (Item 11 – Mapa de niveles potenciométricos). Hoja de trámite E-01-085237 del 22 de octubre del 2018.

⁷⁹ GC Ground S.A.C. 2014. Reporte geofísico. Estudio de tomografía geoeléctrica. Proyecto Cerro Verde Tinajones. Noviembre 2014.

⁸⁰ R.D. N.º 403-2012-MEM-AAM. Estudio de Impacto Ambiental del proyecto Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde. Observación N.º 24b.

«El cloruro es una especie conservadora que podría considerarse como ampliamente representativa de todos los componentes de las filtraciones de los depósitos de relaves. Las concentraciones de cloruro son elevadas en el agua de las filtraciones que migran y muestran una variación suficientemente clara para utilizarlos como trazador aguas abajo de los depósitos de relaves».



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

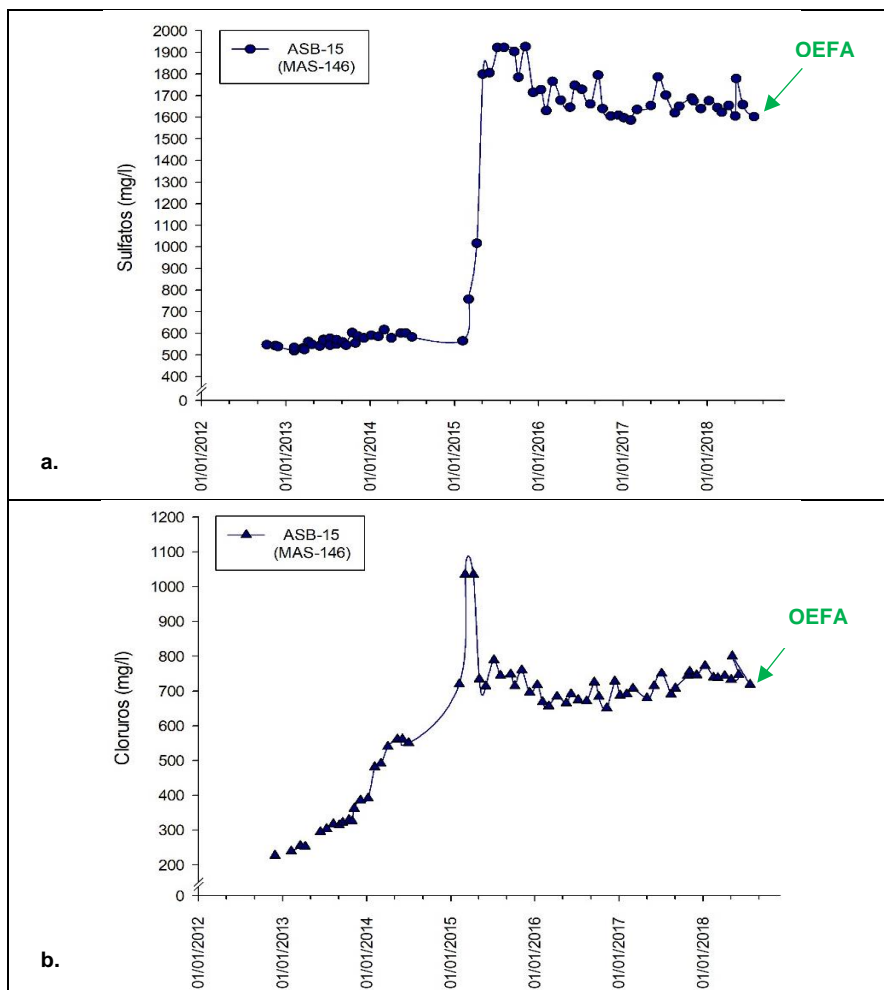


Figura 7-37. Registro histórico de **a.** sulfatos y **b.** cloruros en el agua del piezómetro ASB-15 (MAS-146)

Fuente: R.D. N.º 748-2004-MEM-DGAAM. Proyecto Sulfuros Primarios.

Informes de monitoreo participativo del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería – OSINERGMIN.

Informes de monitoreo ambiental participativo de SMCV.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

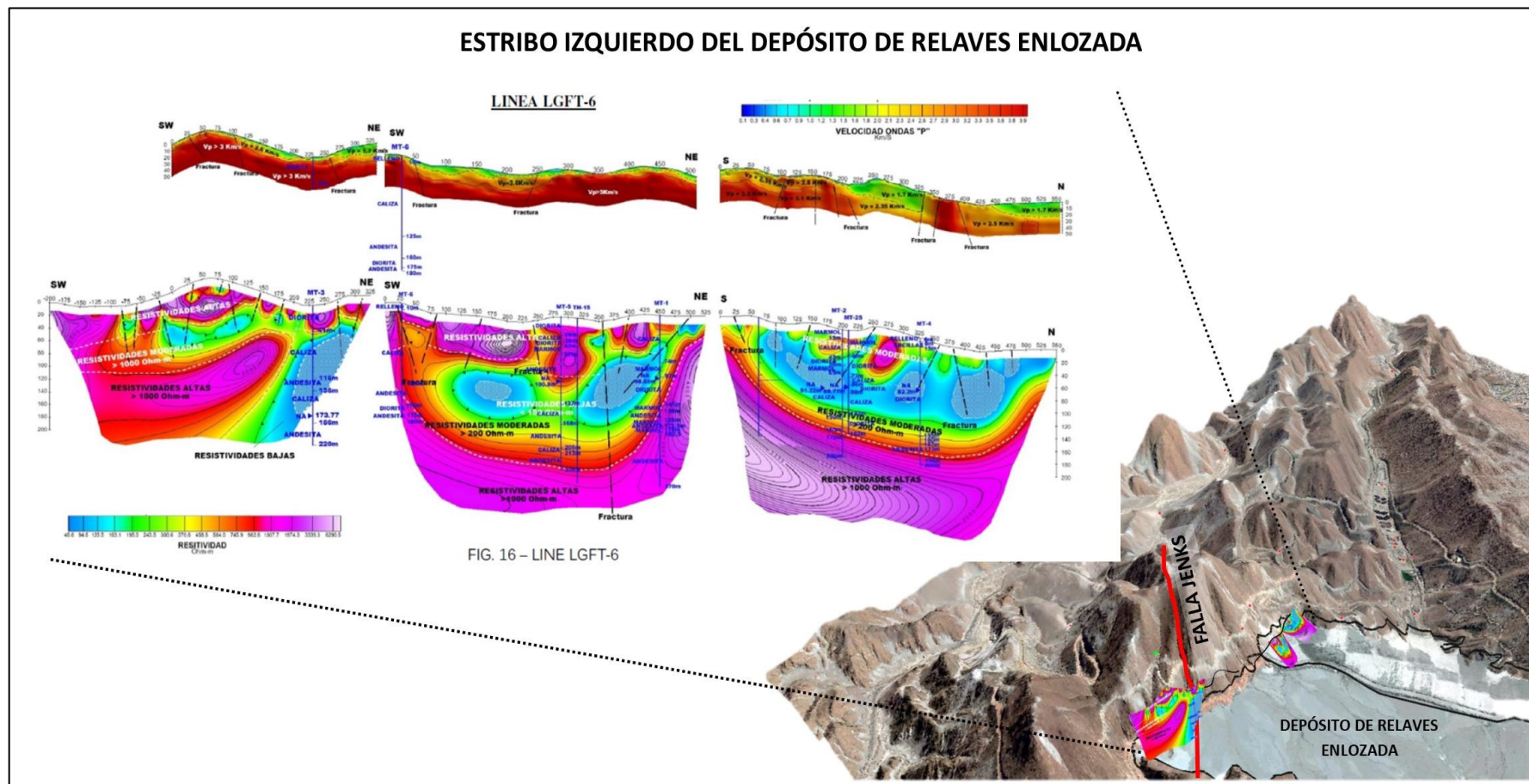


Figura 7-38. Estudios de prospección geofísica realizados por SMCV en el estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada
Fuente: GC Ground S.A.C. 2014. Reporte geofísico. Estudio de tomografía geoelectrica. Proyecto Cerro Verde Tinajones. Noviembre 2014.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

La caracterización hidroquímica del agua del sobrenadante del depósito de relaves, filtraciones y agua subterránea de los piezómetros del estribo izquierdo fueron clasificadas como sulfatadas cálcicas y se encuentran agrupadas en una zona de mayor concentración según las relaciones binarias, $\text{SO}_4\text{-Sr}$ y $\text{SO}_4\text{-Ca}$, a excepción de los piezómetros ASB-117, ASB-26, ASB-115, ASB-85 y ASB-102 que se agruparon en una zona de menor concentración (Figura 7-39). Así también, de acuerdo al análisis de lixiviación (SFE) en muestras de roca del estribo izquierdo, se determinó que el aporte de estos iones hacia el agua subterránea es mínimo (cloruros: 6,424 mg/l y sulfatos: 23,52 mg/l); adicionalmente, en los pozos de mitigación (ASB-112 y ASB-83) del estribo izquierdo se han reportado altas concentraciones de estos parámetros (Cl: 784,4 - 977,15 mg/l y SO_4 : 2384 – 2745 mg/l) lo que sugiere la influencia del depósito de relaves sobre el agua subterránea.

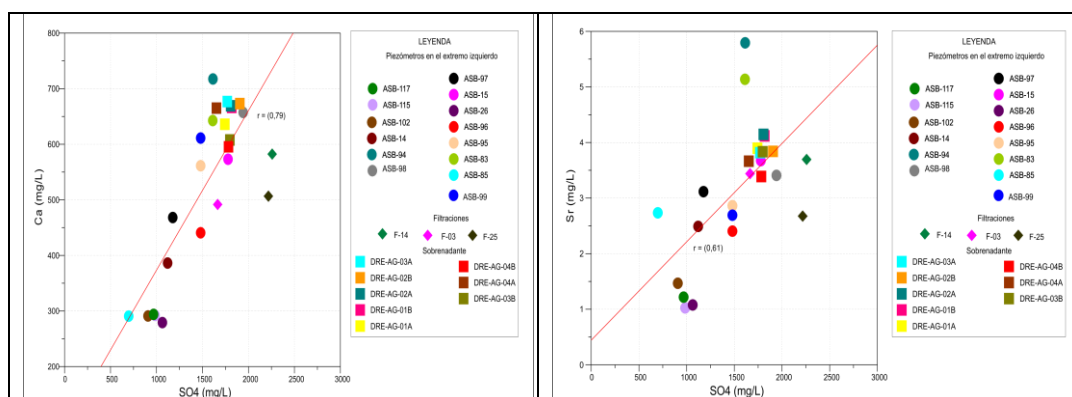


Figura 7-39. Relaciones binarias (Ca-SO_4 , Sr-SO_4) entre el agua subterránea de los piezómetros del estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada, filtraciones y relave

El agua del piezómetro ASB-94 presentó similar comportamiento que el piezómetro ASB-15 (Figura 7-41), facilitado por las fallas menores que tienen la misma dirección de la falla principal Jenks inferidas de las perforaciones y resistividades del perfil tomográfico LG-FT6 realizado por SMCV donde muestran que los valores bajos de resistividad se relacionan a la existencia de calizas con un alto grado de porosidad y fuerte fracturamiento con mayor contenido de humedad, mientras que las resistividades altas se relacionaron a las andesitas y dioritas⁸¹ (Figura 7-40).

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

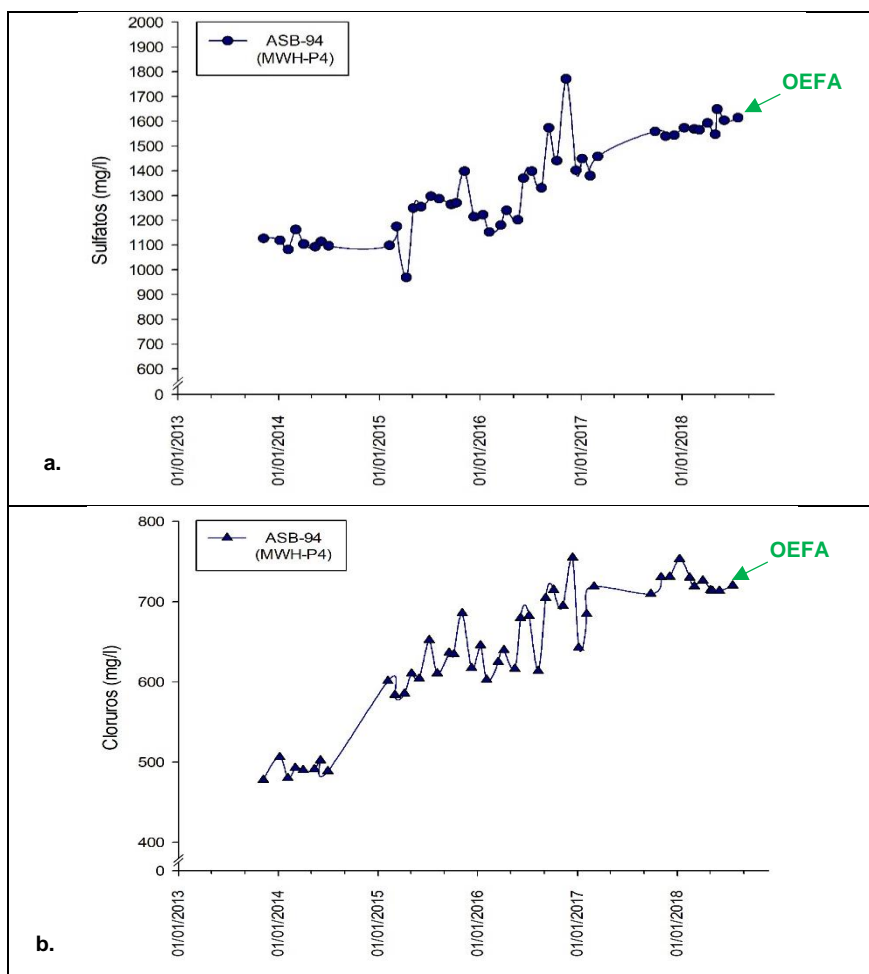


Figura 7-40. Registro histórico de **a.** sulfatos y **b.** cloruros en el agua del piezómetro ASB-94 (MWH-P4)

Fuente: R.D. N.° 748-2004-MEM-DGAAM. Proyecto Sulfuros Primarios.

Informes de monitoreo participativo del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería – OSINERGMIN.

Informes de monitoreo ambiental participativo de SMCV.

Posteriormente, siguiendo estos flujos de agua subterránea en el piezómetro ASB-14, se observó un incremento en las concentraciones de cloruros y sulfatos entre el 2012 y 2018 (Figura 7-41), luego aproximadamente a 1 km aguas abajo de este piezómetro, en el punto ASB-117 (MAS-36) las concentraciones de estos aniones se mantuvieron similares entre el 2013 y 2018 con concentraciones de sulfatos entre 953,5 y 1102 mg/l, y cloruros entre 103,3 y 198,5 mg/l (Figura 7-42).

Es importante mencionar que, SMCV instaló 8 pozos interceptores de posibles filtraciones (MT-1 al MT-8) en el estribo izquierdo para recircular el agua de filtraciones al depósito de relaves, de acuerdo a lo modelado y declarado en el Estudio de Impacto ambiental del proyecto de Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde^{82,83} y su modificatoria⁸⁴.

⁸² Schlumberger Water Services Perú S.A. 2011. Estudio hidrogeológico de área de la faena Cerro Verde.

⁸³ Resolución Directoral N.° 403-2012-MEM-AAM. Estudio de Impacto Ambiental del proyecto Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde.

⁸⁴ Resolución Directoral N.° 072-2016-SENACE-DCA. Modificación del Estudio de Impacto Ambiental y Social de la Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde.

(...) A la fecha se tienen instalados los pozos interceptores de filtraciones en el estribo izquierdo fase I, en donde se instaló un sistema de bombeo para los pozos MT-1, MT-2, MT-5, MT-7 y MT-8, planificando añadir más pozos según necesidad operativa a partir de 2016 (...)

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

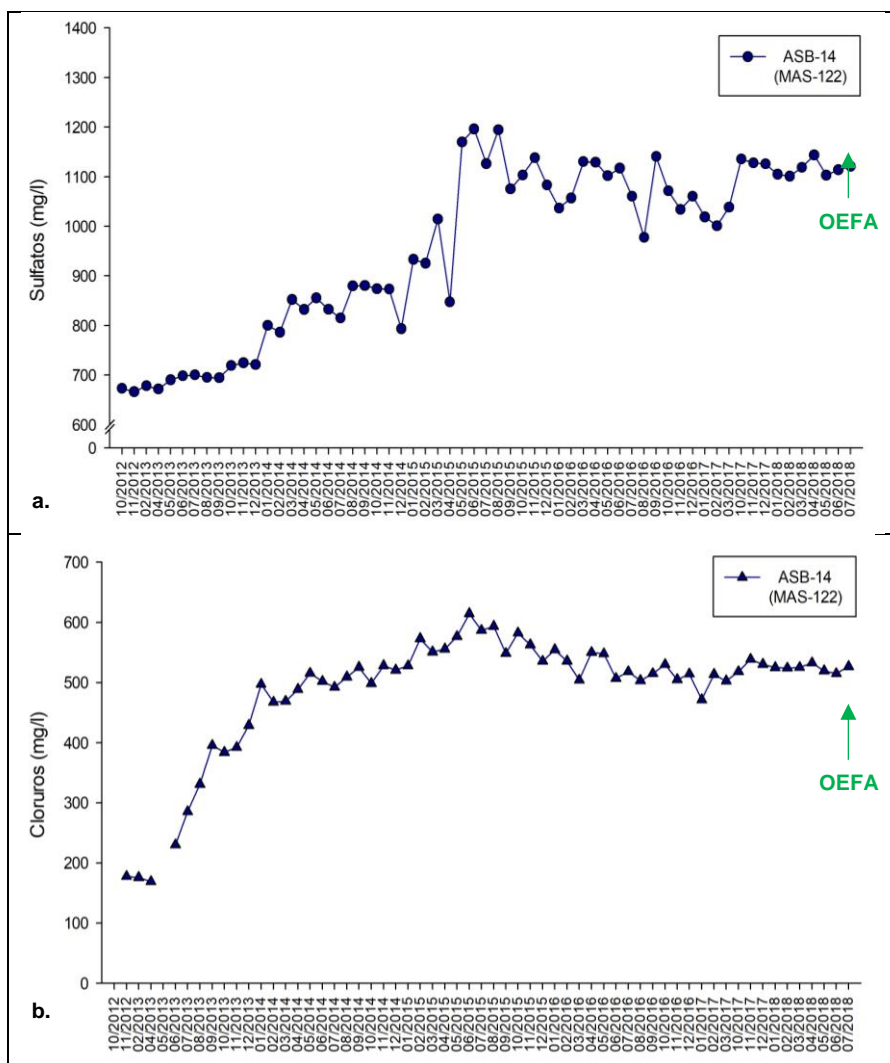


Figura 7-41. Registro histórico de **a.** sulfatos y **b.** cloruros en el agua del piezómetro ASB-14 (MAS-122)

Fuente: Modificación del Estudio de Impacto Ambiental y Social de la Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde Resolución Directoral N.º 072-2016-SENACE-DCA.
Información proporcionada por SMCV. Hoja de trámite: E01-085237

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

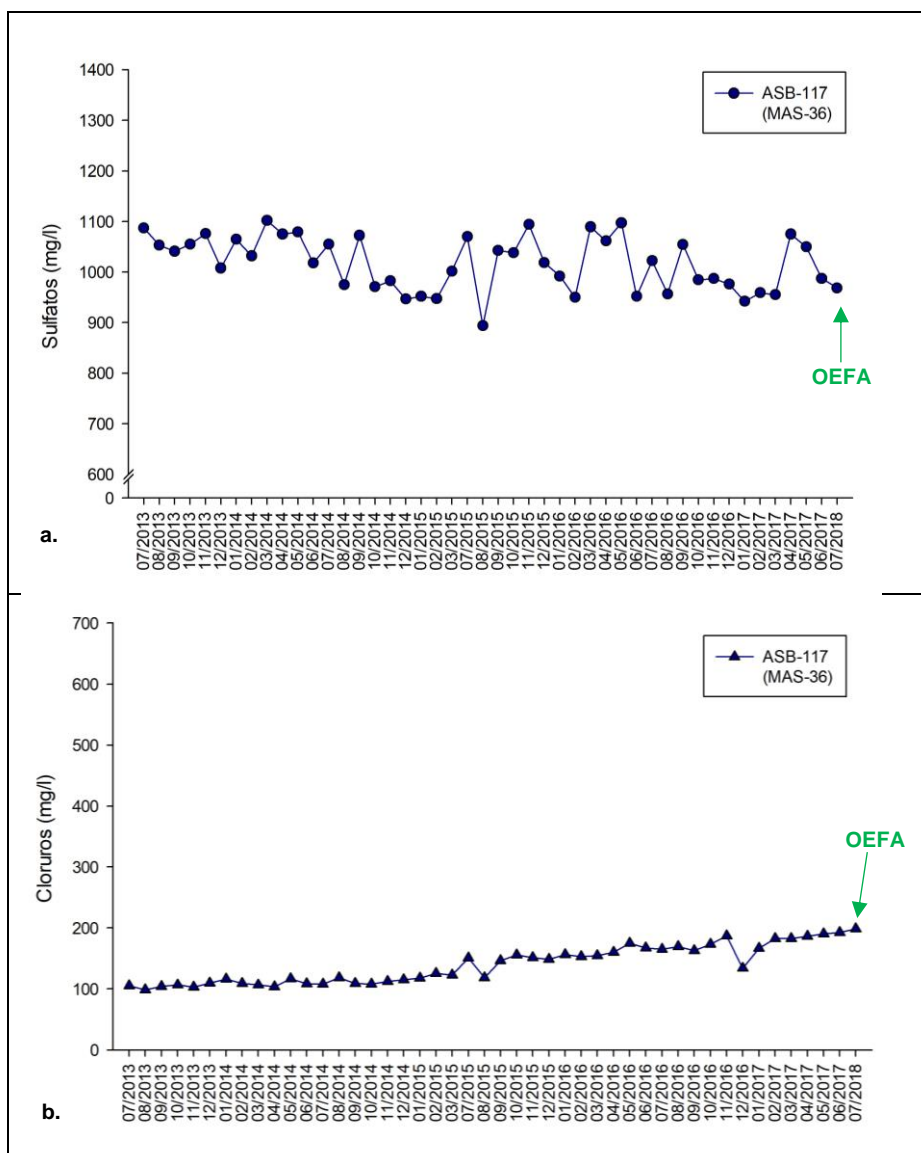


Figura 7-42. Registro histórico de **a.** sulfatos y **b.** cloruros en el agua del piezómetro ASB-117 (MAS-36)

Fuente: Modificación del Estudio de Impacto Ambiental y Social de la Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde Resolución Directoral N.º 072-2016-SENACE-DCA.
Información proporcionada por SMCV. Hoja de trámite: E01-085237

El agua subterránea de los piezómetros evaluados en el estribo derecho fue de tipo sulfatada cálcica (ASB-46, ASB-92, ASB-109 y ASB-110), clorurada sódico potásica (ASB-108 y ASB-113), y sódico potásica (ASB-101), con concentraciones de iones mayoritarios menores a 15 meq/l (Figura 7-43). No se han identificado cambio alguno en sus características fisicoquímicas a través del tiempo del 2013 al 2018 (ASB-108, ASB-91, ASB-109 y ASB-113), y según las relaciones binarias ($\text{SO}_4\text{-Ca}$, $\text{SO}_4\text{-Sr}$, Ca-Cl^- y Sr-Cl^-) no se encuentran agrupadas en la zona de mayor concentración con el agua del depósito de relaves ni las filtraciones (Figura 7-44).



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Organismo de Evaluación y
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación Ambiental

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

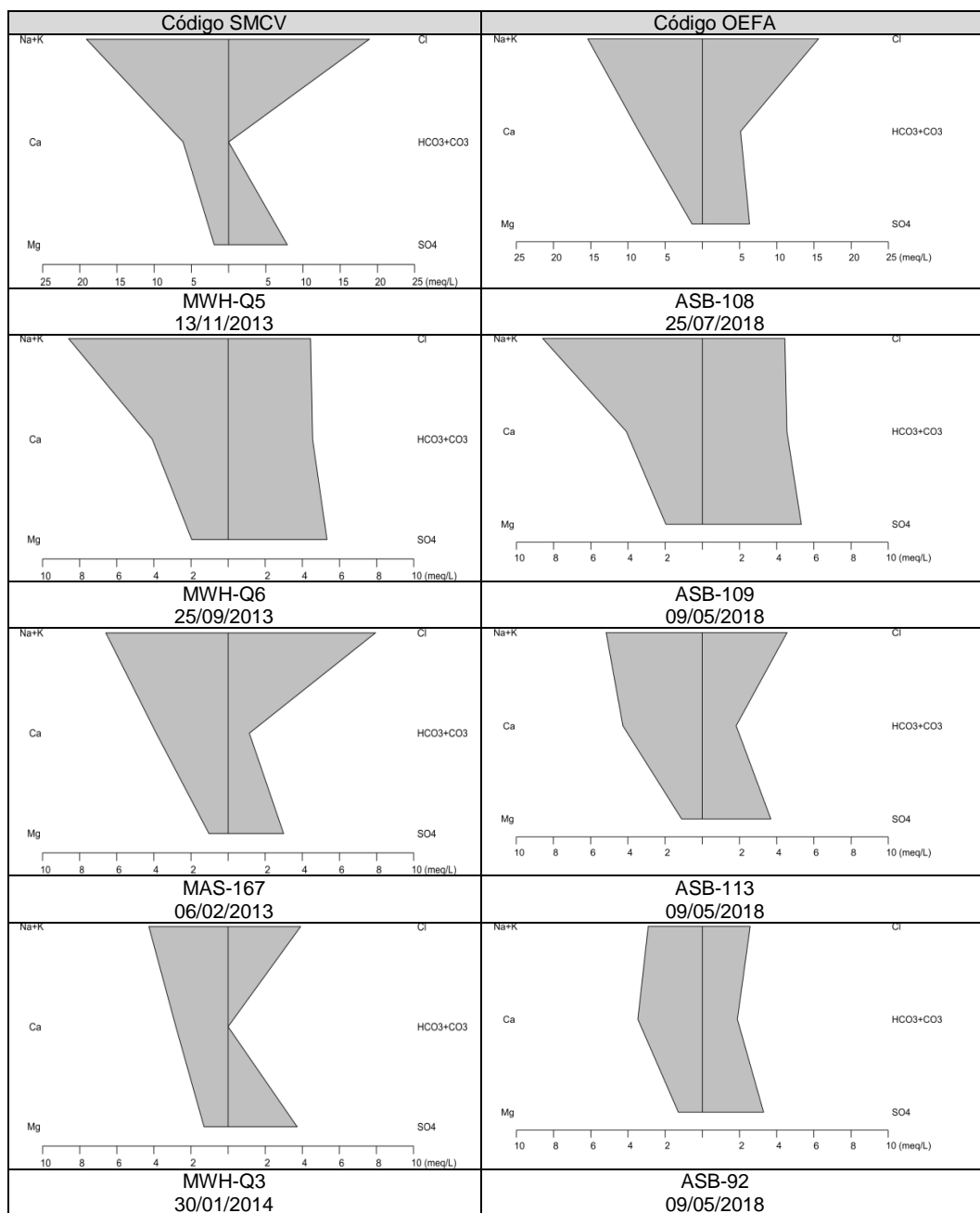


Figura 7-43. Comparación de facies hidroquímicas del agua subterránea de los
piezómetros del estribo derecho del depósito de relaves Enlozada
Fuente: Información proporcionada por SMCV. Hoja de trámite: E01-085237

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

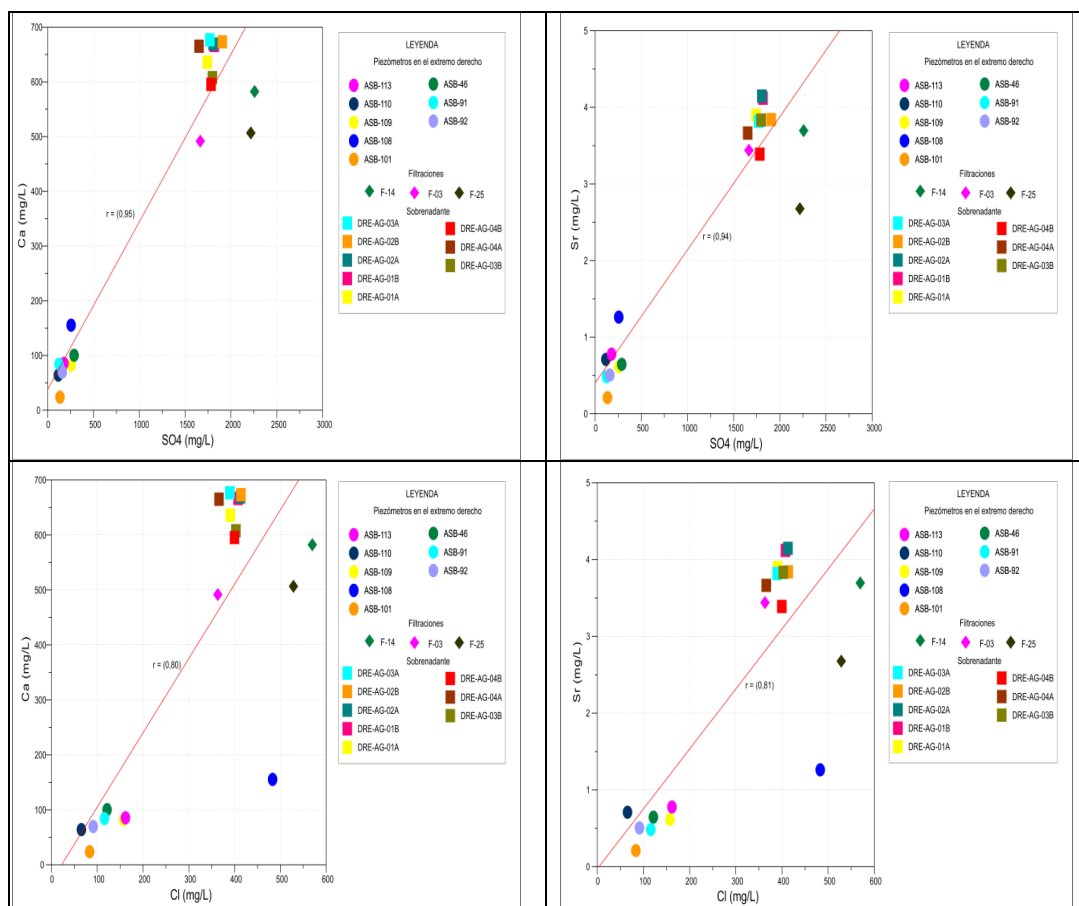


Figura 7-44. Relaciones binarias (Ca-SO₄, Sr-SO₄, Ca-Cl y Sr-Cl) entre el agua subterránea de los piezómetros del estribo derecho del depósito de relaves Enlozada

Zona II: Depósito de relaves Linga

En esta zona se evaluó el agua subterránea en 13 piezómetros circundantes al depósito de relaves, de los cuales 10 (ASB-116, ASB-119, ASB-48, ASB-54, ASB-40, ASB-55, ASB-50, ASB-53, ASB-51 y ASB-52) se encuentran ubicadas aguas abajo del depósito y 3 (ASB-74, ASB-111 y ASB-114) aguas arriba del mismo. Se priorizó para el análisis, el piezómetro ASB-48, que presentó la mayor concentración de sulfatos y los piezómetros ASB-55, ASB-40, ASB-50, ASB-53, ASB-51 y ASB-52, cuyos resultados presentaron las mayores concentraciones de cloruros y se mantuvieron en el tiempo. Los metales traza presentaron concentraciones bajas o incluso por debajo del límite de detección del método del laboratorio por lo que no fueron considerados.

Asimismo, se evaluaron las características fisicoquímicas de 3 filtraciones (F-22, F-23 y F-24) aguas abajo del depósito de relaves. La filtración F-22 que corresponde al agua infiltrada del mencionado depósito (inferida del perfil tomográfico L-14) junto con el agua del punto F-23, que forman parte del sistema de drenaje de filtraciones, son colectadas hacia el sumidero de colección de filtraciones F-24, para su posterior recirculación al proceso (Figura 7-45).

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

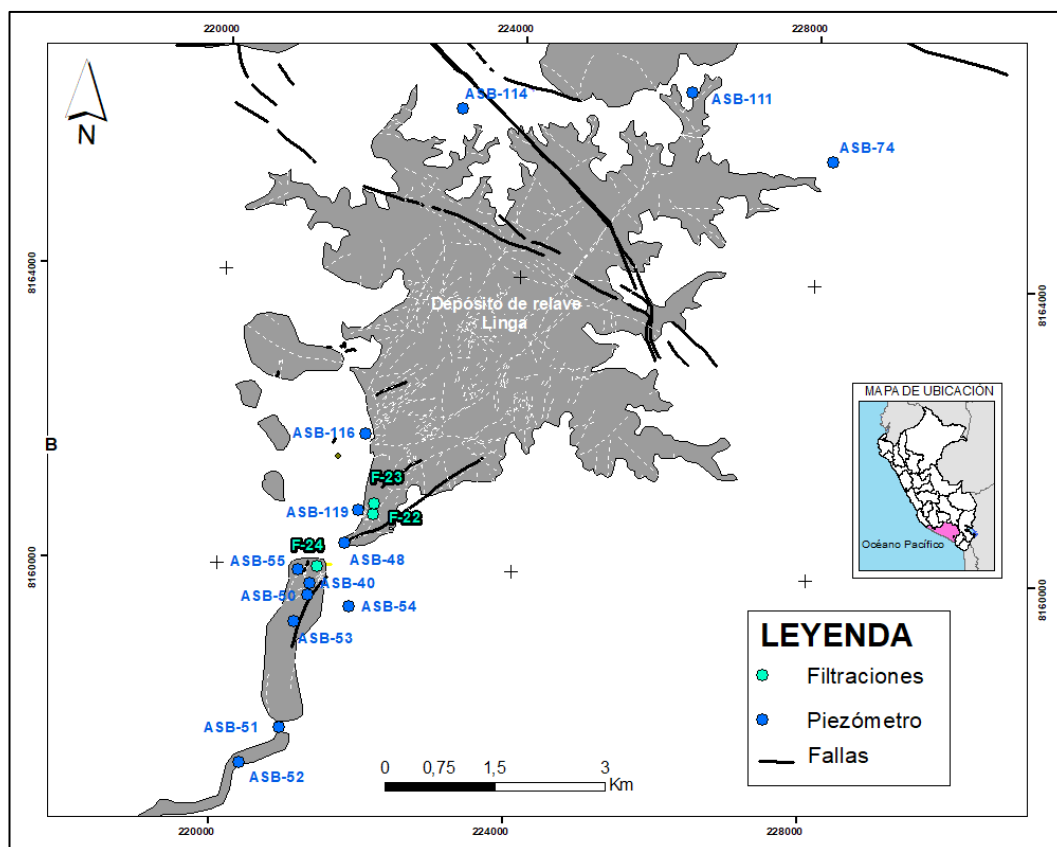


Figura 7-45. Distribución de los piezómetros y filtraciones en el área circundante al depósito de relaves Linga

Las filtraciones mencionadas en el párrafo anterior se deberían a que el depósito de revalos se emplaza sobre rocas de baja permeabilidad⁸⁵; sin embargo, por encontrarse en un sistema de fallas y lineamientos de dirección NE-SW que favorecen que una parte de las filtraciones migren del depósito hacia el agua subterránea del piezómetro ASB-48, evidenciado con el incremento de las concentraciones de sulfatos entre el 2014 y 2018 (Figura 7-46); cabe precisar que, estas filtraciones son captadas y en el sumidero (*seepage*) para su posterior recirculación (Figura 7-47).

⁸⁵

R.D. N.° 403-2012-MEM-AAM. Estudio de Impacto Ambiental del proyecto Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

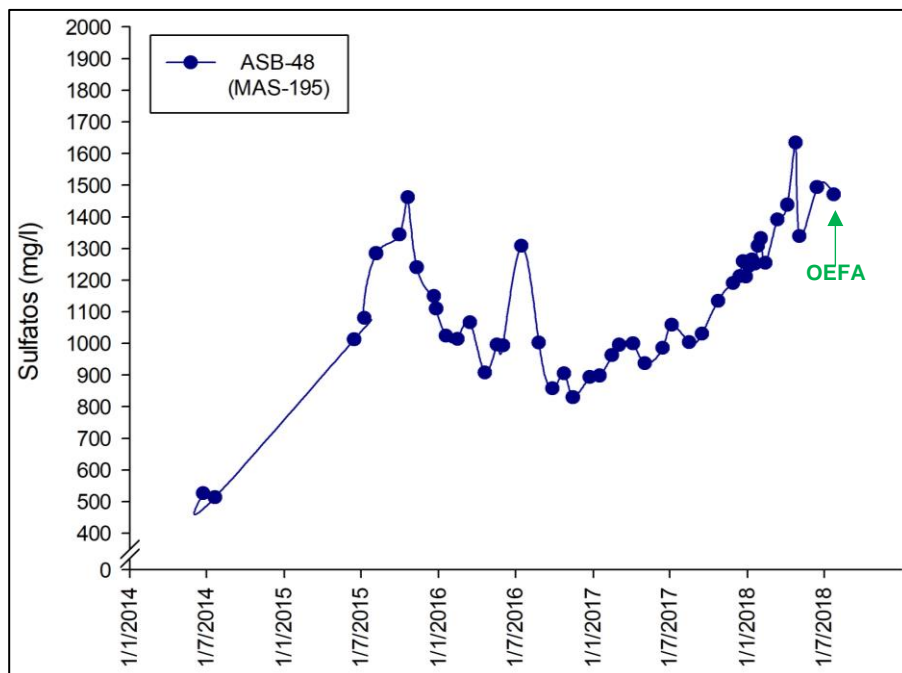


Figura 7-46. Registro histórico de las concentraciones de sulfatos en el agua subterránea del piezómetro ASB-48 (MAS-195)

Fuente: Informes de monitoreo de SMCV. Hoja de trámite: E01-085237

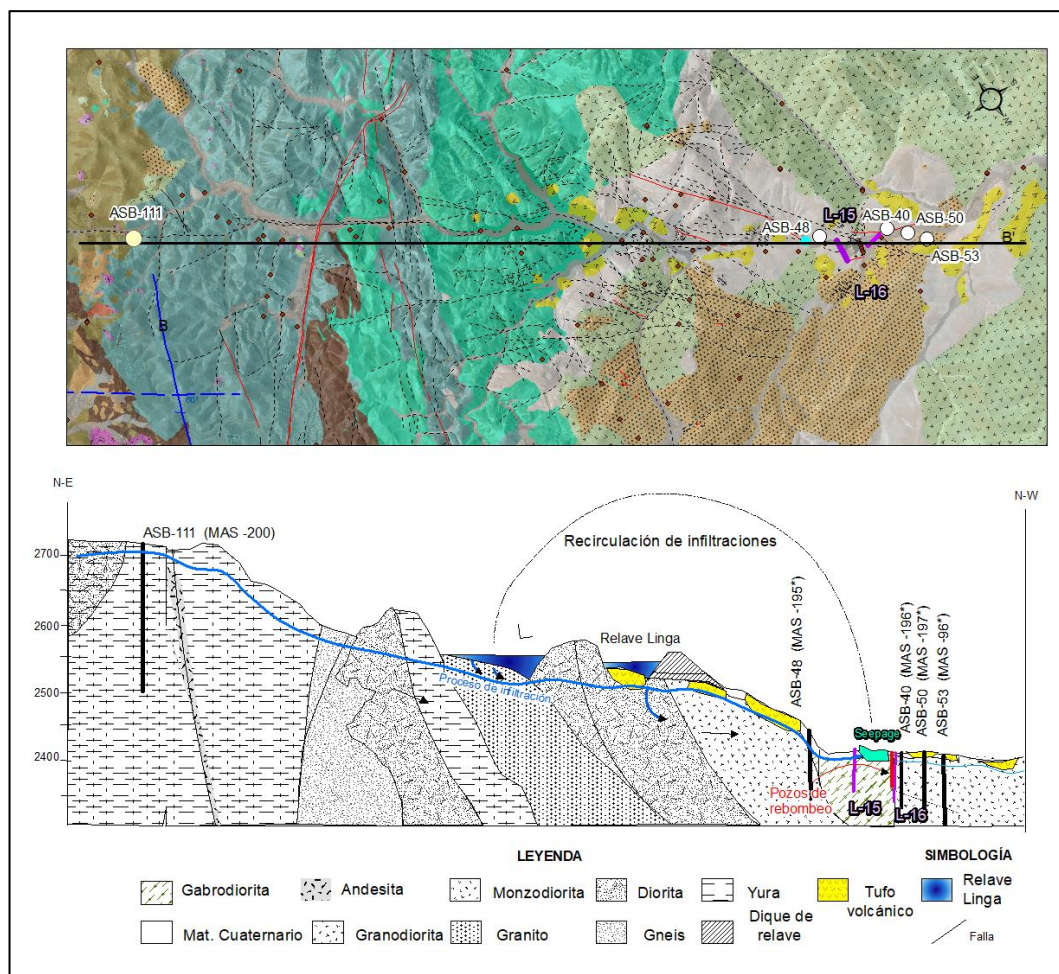


Figura 7-47. Vista esquemática en planta y perfil de los piezómetros aguas abajo del depósito de relaves Linga

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

El agua subterránea de los piezómetros aguas abajo del *seepage*, presentó concentraciones de sulfatos que se mantuvieron constantes con valores menores a los reportados en el *seepage* (F-24), sugiriendo que la barrera estaría controlando el paso de estos iones hacia el agua subterránea de los piezómetros ubicados aguas abajo (Figura 7-48). Las concentraciones de cloruros fueron superiores en el agua de los piezómetros ubicados aguas abajo del *seepage* (ASB-40, ASB-55, ASB-50, ASB-53, ASB-51 y ASB-52) y similares en el tiempo (Figura 7-49), por lo que se infiere que serían agua de fuentes de origen diferente.

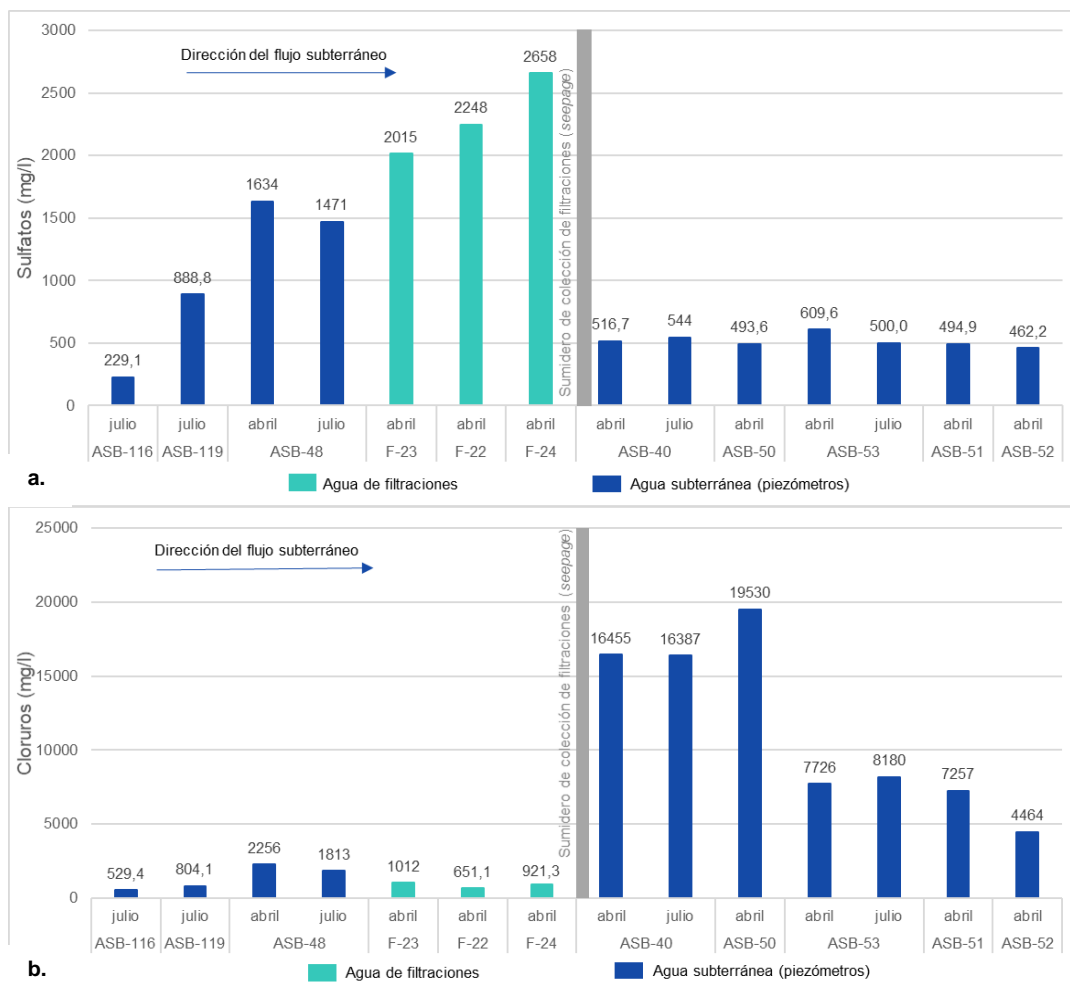


Figura 7-48. Concentraciones de a. sulfatos y b. cloruros en el agua subterránea y filtraciones del depósito de relaves Linga aguas arriba y abajo del *seepage*

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

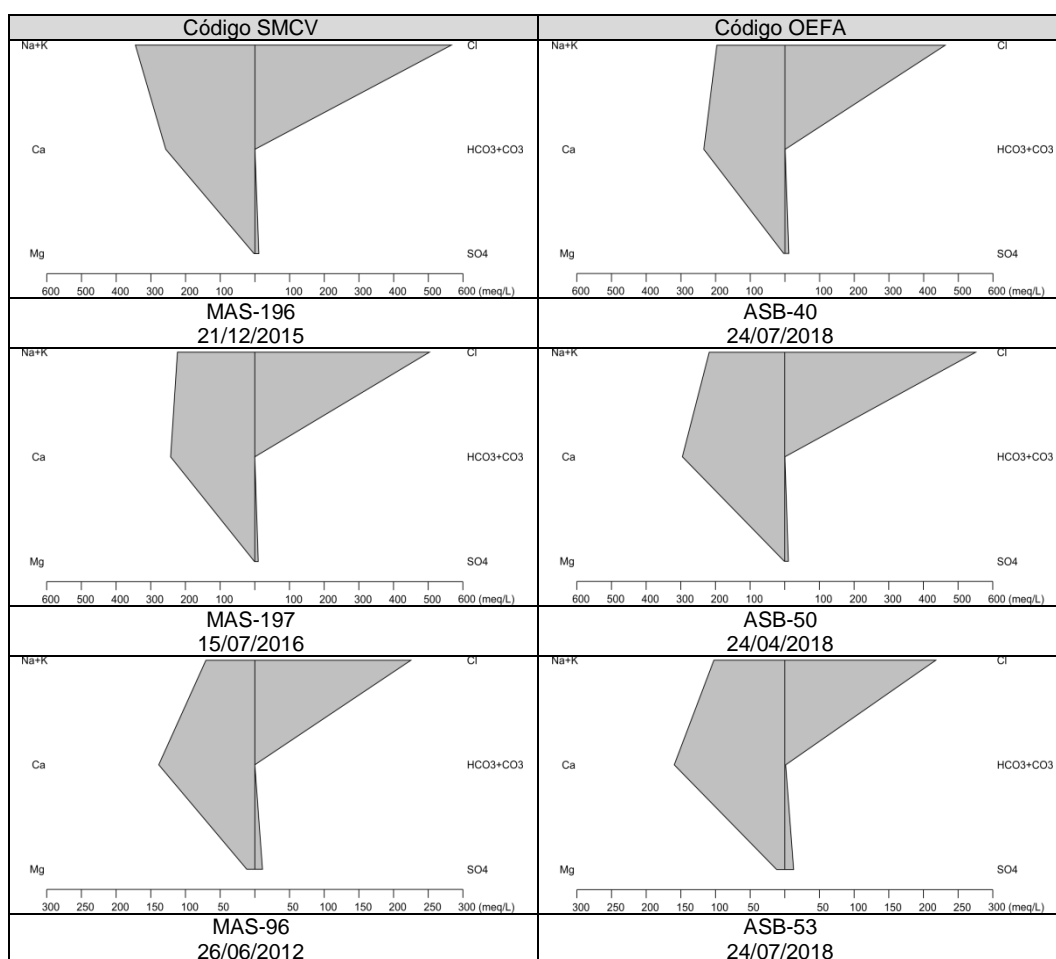


Figura 7-49. Comparación de facies hidroquímicas del agua subterránea de los piezómetros aguas abajo del sumidero de colección de filtraciones (*seepage*) – Linga
Fuente: Información proporcionada por SMCV. Hoja de trámite: E01-085237

Dado que en esta zona no se han registrado evaporitas⁸⁶, las altas concentraciones de cloruros aguas abajo del *seepage* en la quebrada Linga se deberían a la existencia de rocas volcánicas (tufos riolíticos y dacíticos del volcánico Sencca⁸⁷) porosas, livianas y de baja resistencia, interconectadas por medio de fallas y fracturas en sentido NE-SW, que afloran en forma dispersa a manera de bolsones. Estas rocas volcánicas se caracterizan por contener moderadas cantidades de haluros (cloruros y bromuros) que al ser hidratadas aumentan la relación Cl/Br (molar) hasta 1000 en el agua (Alcala y Custodio, 2008), concordando con las relaciones Cl/Br obtenidas en el agua de los piezómetros ASB-40 y ASB-53 (Cl/Br: 974,38 y 1009 respectivamente), por tanto se podría haber formado un acuífero semiconfinado con alta concentración de estos aniones, concordantes con las relaciones binarias (Cl-Br y Cl-Na), Figura 7-50.

En los perfiles tomográficos realizados por el OEFA (L-16) y SMCV⁸⁸, se observaron zonas de bajas resistividades que infieren la existencia de bolsones que formarían el acuífero semiconfinado, (Figura 7-51). El agua subterránea presentó una disminución en las concentraciones de cloruros aguas abajo de estos bolsones, posiblemente debido al aporte de agua subterránea lateral (ASB-54).

⁸⁶ Schlumberger Water Services (Perú) S.A. 2010. Hydrogeological Study Of The Linga Valle. Pág. 14.

⁸⁷ Pérez, 2016. Criterios para el diseño de la cortina de inyecciones de la presa de arranque del depósito de relaves Linga del proyecto de expansión de la unidad minera Cerro Verde-Arequipa. Pág. 19

⁸⁸ GC Ground S.A.C. 2018. Reporte geofísico. Estudio de tomografía geoelectrica. Polarización Inducida y Resistividad Linga SCS. Mayo 2018.

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

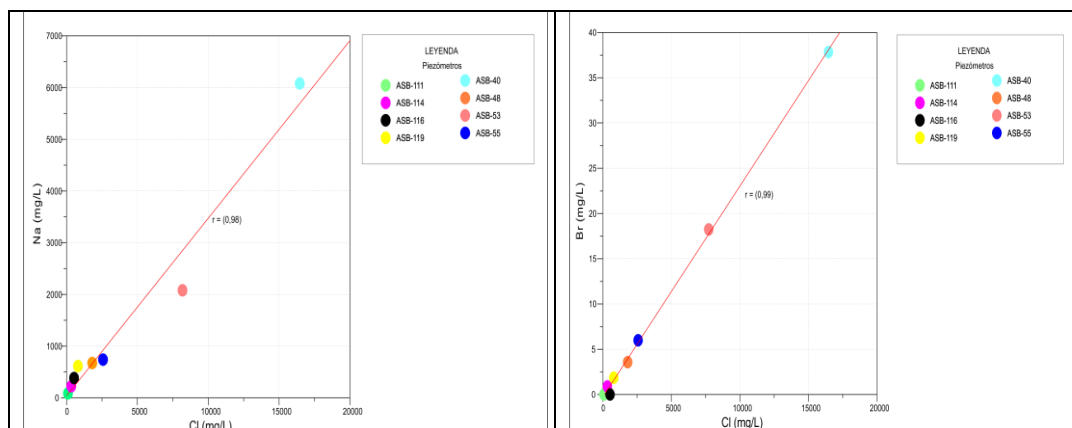


Figura 7-50. Relaciones binarias (Na-Cl⁻ y Br-Cl⁻) entre el agua subterránea de los piezómetros aguas abajo del sumidero de colección de filtraciones (seepage) - Linga

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

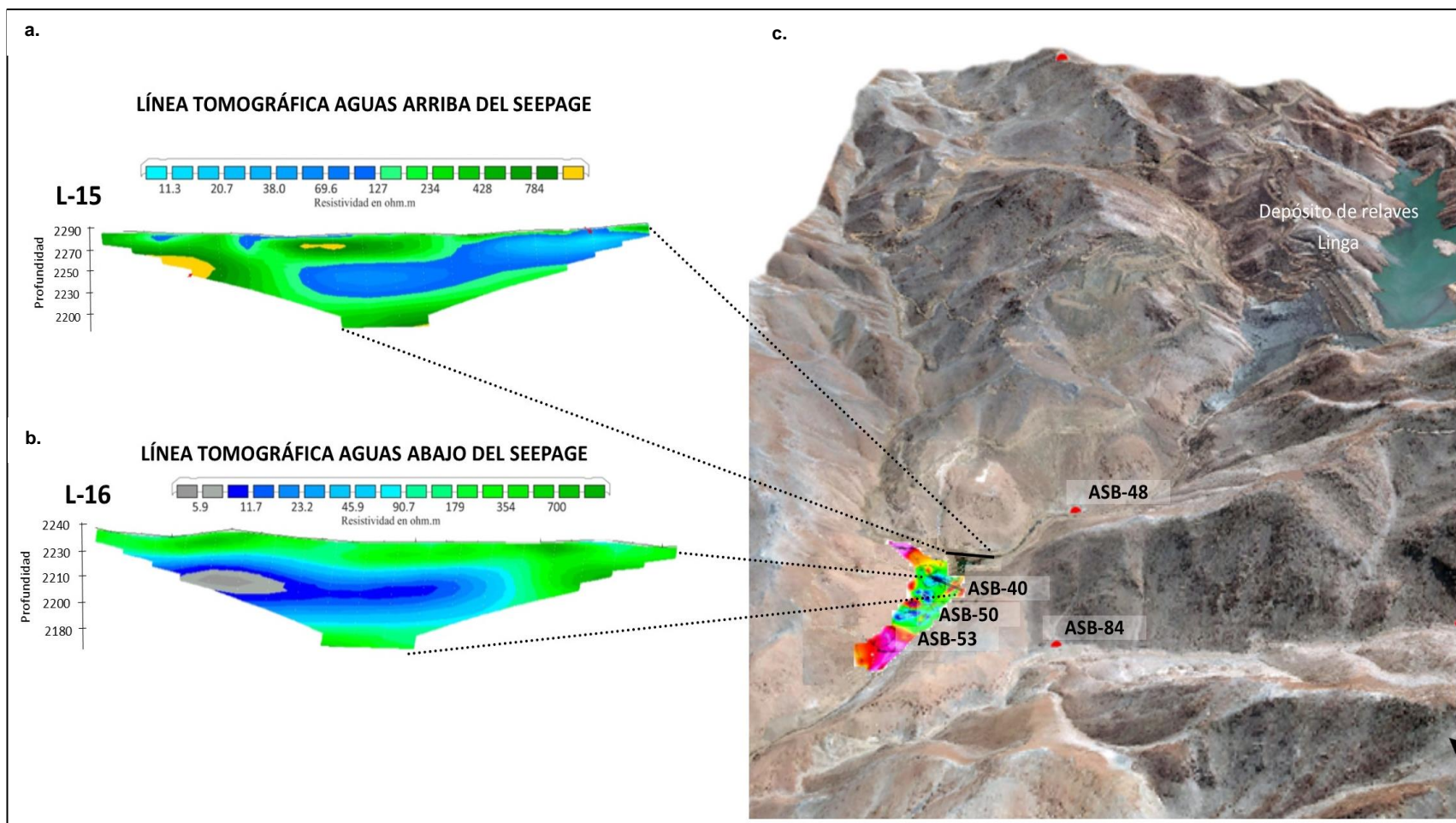


Figura 7-51. Estudios de prospección geofísica realizados por **a.** SMCV y el OEFA **b.** L-15 y **c.** L-16 aguas arriba y abajo del seepage - Linga
Fuente: GC Ground S.A.C. 2018. Reporte geofísico. Estudio de tomografía geoelectrica. Polarización Inducida y Resistividad Linga SCS. Mayo 2018.

Zona III: PAD, presa Huayrondo, tajos y DDM Noreste, Sureste y Cerro Negro

En el DDM Noreste, la evaluación hidroquímica mostró que el agua subterránea de los piezómetros aguas arriba (ASB-25 y ASB-88) fueron de tipo clorurada sódico potásica con concentraciones de iones mayoritarios (Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) hasta 20 meq-l; en cambio en los piezómetros ubicados aguas abajo (ASB-20 y ASB-56) fueron de tipo sulfatada cálcica con concentraciones de iones mayoritarios hasta 10 meq-l (Figura 7-52), presentando una variación respecto a su composición hidroquímica, este cambio posiblemente debido a la influencia del componente el cual presentó sulfatos (4200 mg/kg) con una capacidad de liberación de 371 mg/l, según la prueba de lixiviación SFE.

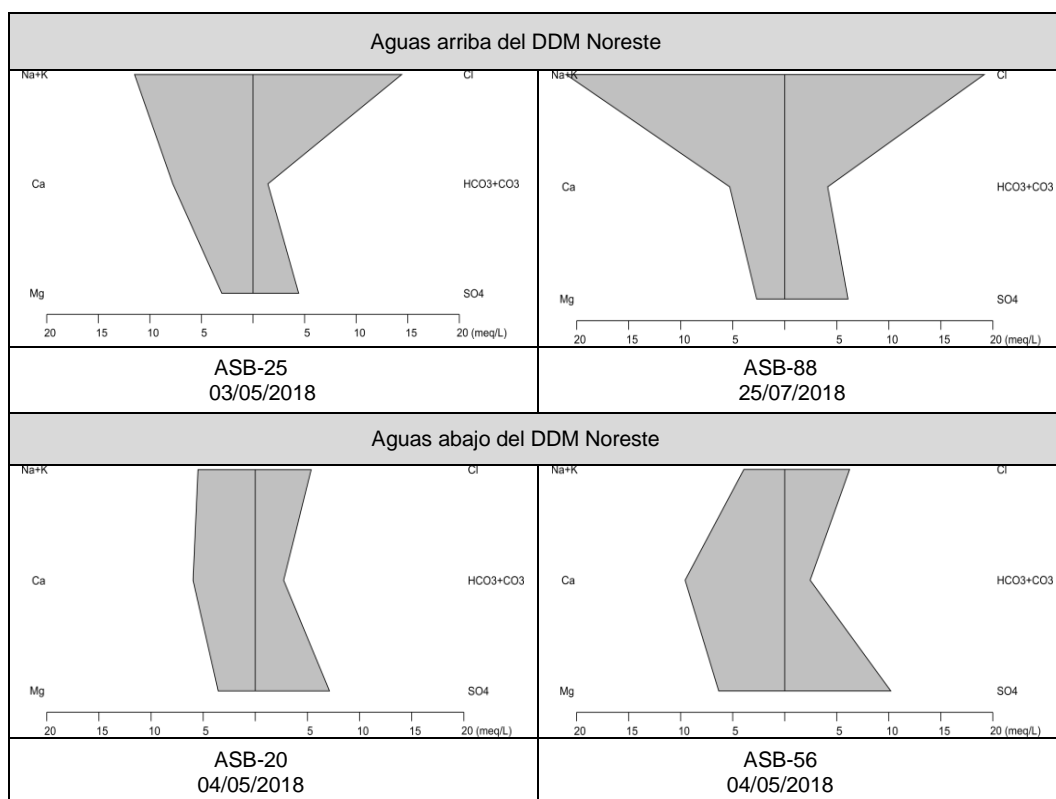


Figura 7-52. Comparación de facies hidroquímicas del agua subterránea de los piezómetros aguas arriba y abajo del DDM Noreste

Fuente: Información proporcionada por SMCV. Hoja de trámite: E01-085237

El agua subterránea de los piezómetros ubicados en la parte alta de quebrada Huayrondo, con dirección del flujo de sur a norte, aguas arriba del PAD 4A (ASB- 21, ASB-24A) y 4B (ASB-67), además del agua subterránea del piezómetro ASB-58, ubicado aguas abajo del DDM Sureste, tuvieron las mismas características de tipo sulfatadas cálcicas con concentraciones de iones mayoritarios entre 6 - 10 meq-l. El agua subterránea de los piezómetros referidos mayormente registraron concentraciones de arsénico, cadmio, cobre, níquel, plomo y zinc por debajo del límite de detección del método del laboratorio.



El agua subterránea de los piezómetros aguas abajo del pad 4A (ASB-16), pad 4B (ASB-62) y planta de electrodeposición y extracción por solventes SX/EW (ASB-22) presentó aguas de tipo sulfatadas cálcicas con concentraciones de iones mayoritarios entre 400 a 1200 meq-l, pH ácidos (2,65 a 3,57 unidades) y elevadas concentraciones de arsénico, cadmio, cobalto, cobre, níquel, plomo y zinc, notándose el aporte de las filtraciones de las soluciones ricas (PLS) a partir de los componentes mencionados. Cabe indicar que, estas filtraciones fueron declaradas en el Plan de Adecuación y Manejo Ambiental⁸⁹ (1997), modeladas^{90,91} y previstas en el Estudio de Impacto Ambiental – EIA del Pad 4B (2010). Asimismo, en el agua subterránea del piezómetro ASB-19, ubicado aguas abajo del Pad 1X, las concentraciones de iones mayoritarios fue menor a 30 meq-l y el pH fue de 5,14 unidades, indicando una menor influencia de los componentes mineros, posiblemente debido a su lejanía de estos.

Aguas abajo de la presa Huayrondo se observó un descenso en las concentraciones de sulfatos y metales y un incremento del pH en el agua subterránea de los piezómetros ASB-60 y ASB-23, esto debido a los pozos de mitigación y rebombeo, aguas arriba y abajo de la presa Huayrondo⁹²; además, del aporte de agua subterránea de un flujo lateral (ASB-61) con pH cercano a la neutralidad (7,62 y 7,75), concentraciones bajas de sulfatos (738,6 y 827,9 mg/l) y metales (Figura 7-53). Estos flujos de agua subterránea fueron inferidos del perfil tomográfico de la línea L-9, que presentó bajas resistividades (<7,1 Ω mh.m.) indicando la existencia de lixiviados (Figura 7-54). Cabe precisar que el agua subterránea, aproximadamente a 500 m de la presa Huayrondo, en el piezómetro ASB-17 registró un pH neutro, con menores concentraciones de sulfatos y metales que se mantuvieron constantes desde 2013 al 2018 en comparación con los piezómetros aguas arriba (Figura 7-55).

Cabe mencionar que, la presa Huayrondo fue construida en 1997, mejorada para reducir las tasas de migración de filtraciones en el 2007⁹³, y está ubicada aguas abajo de las operaciones de lixiviación de SMCV. Tiene por objetivo formar una barrera hidráulica de filtraciones declaradas en el Plan de Adecuación y Manejo Ambiental (1997) y previstas en el Estudio de Impacto Ambiental del Pad 4B⁹⁴ (2010).

⁸⁹ R.D. N.º 099-97-EM/DGM. Programa de de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) de la unidad de producción Cerro Verde. 1996

⁹⁰ SWS, 2009. Modelo hidrogeológico de la cuenca Huayrondo. 5402-R1. Agosto 2008.

⁹¹ SWS, 2009. Geochemical model for prediction of PLS migration in Quebrada Huayrondo. 5402-R2. September 2009.

⁹² MWH, 2017. Investigación hidrogeológica de la presa Huayrondo. Elaborado para Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. Abril 2017.

⁹³ SWS, 2009. Geochemical model for prediction of PLS migration in Quebrada Huayrondo. 5402-R2. September 2009.

⁹⁴ R.D. N.º 274-2010-MEM-AAM. Estudio de Impacto Ambiental del Pad 4B.



«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

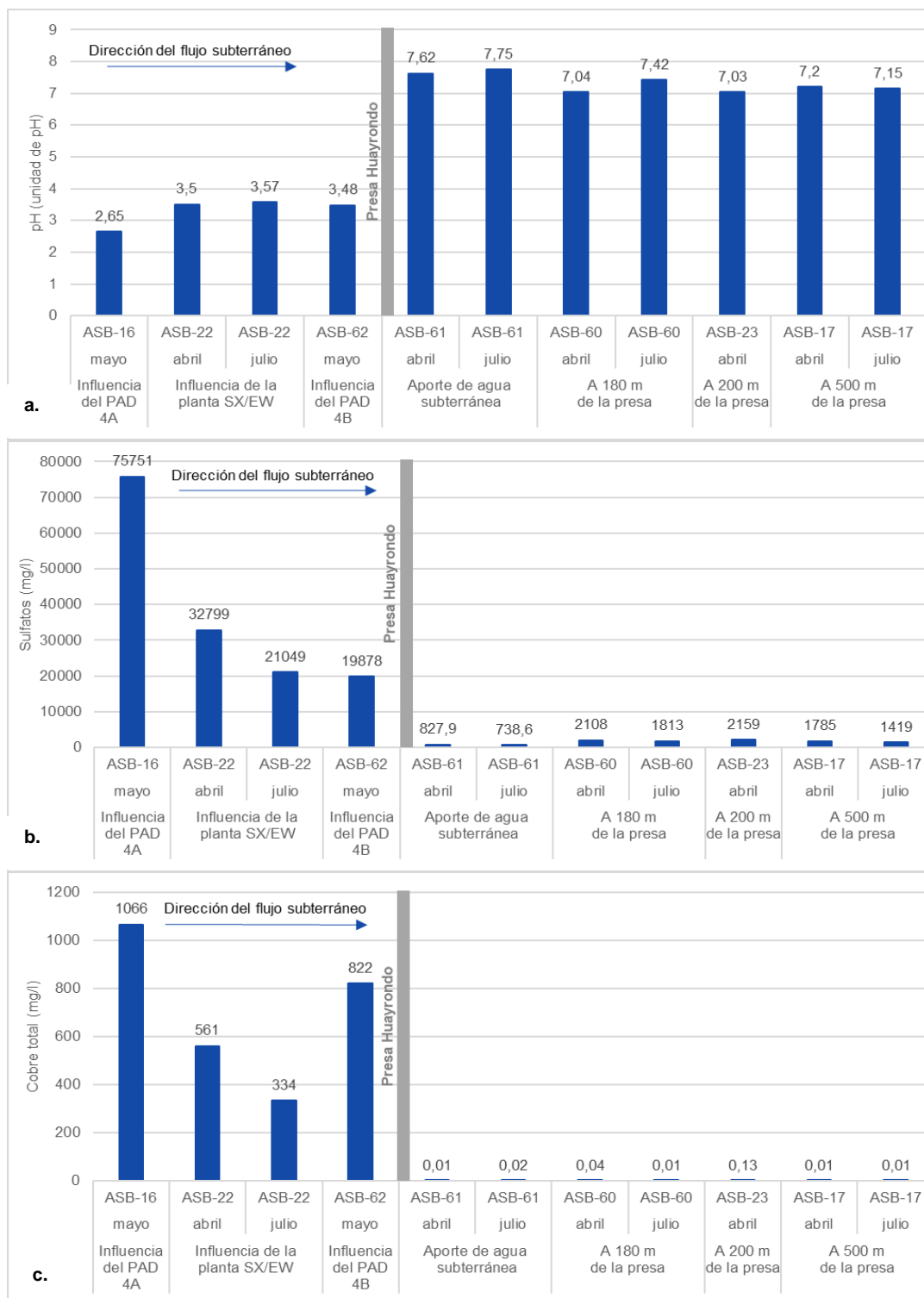


Figura 7-53. Concentraciones de **a.** sulfatos, **b.** cloruros y **c.** cobre en el agua subterránea aguas arriba y abajo de presa Huayrondo

Figura 7-54. Vista esquemática en planta y perfil de los piezómetros aguas abajo de la presa Huayrondo

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

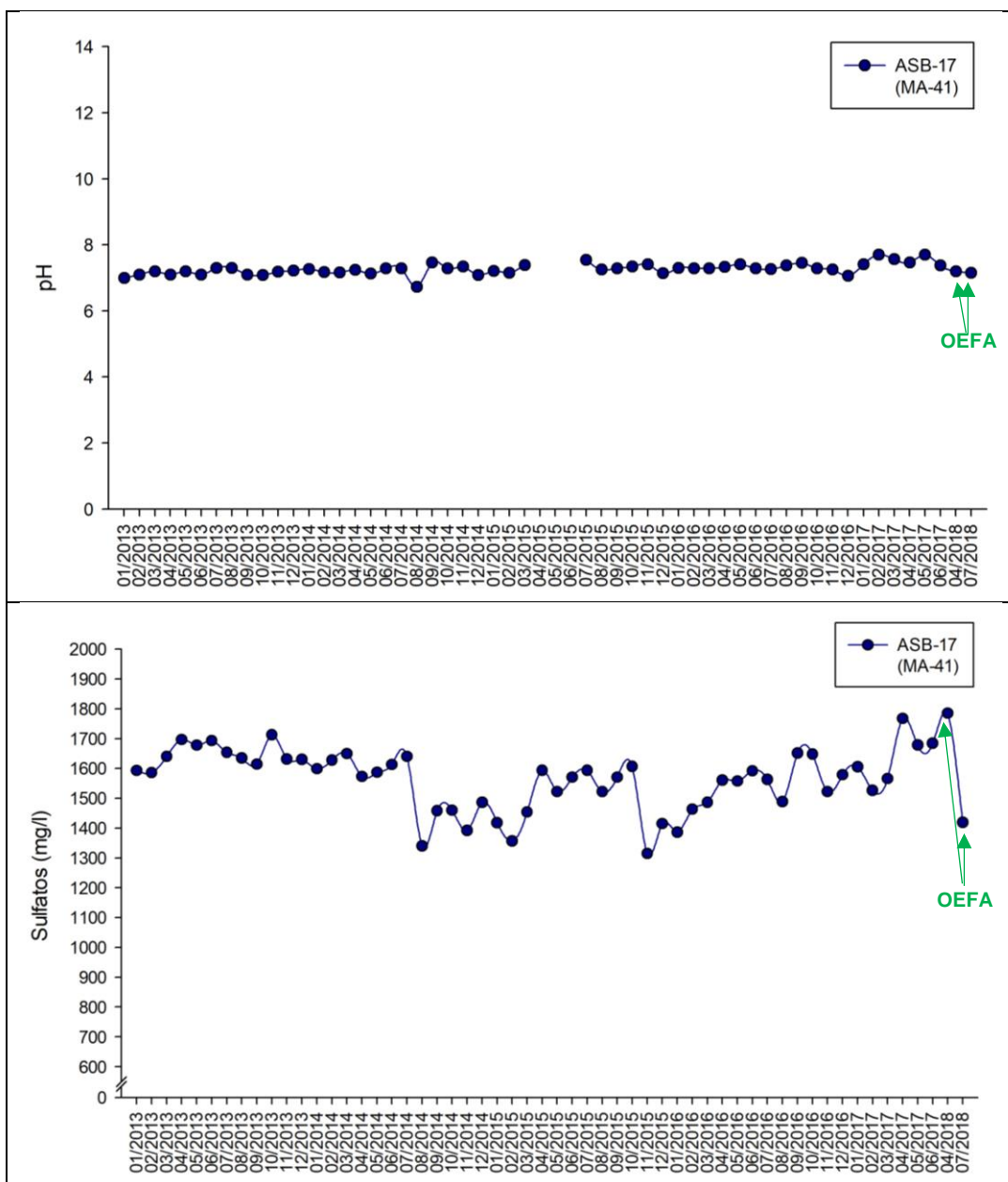


Figura 7-55. Registro histórico de **a.** potencial de hidrogeno y **b.** sulfatos del 2013 al 2018 en el agua subterránea del piezómetro ASB-17 (MA-41) aguas abajo de presa Huayrondo
Fuente: Informes trimestrales de SMCV.

Las relaciones binarias ($\text{SO}_4\text{-Ca}$ y $\text{SO}_4\text{-Mg}$) agruparon a los piezómetros localizados aguas abajo del PAD 4B (ASB-62), planta de electrodeposición y extracción por solventes SX/EW (ASB-22) y PAD 4A (ASB-16) en una zona con mayor concentración, mientras que los demás piezómetros, aguas arriba de estos componentes y aguas abajo de la presa Huayrondo se agruparon en una zona de menor concentración (Figura 7-56).

«Decenio de la igualdad de oportunidades para mujeres y hombres»
«Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad»

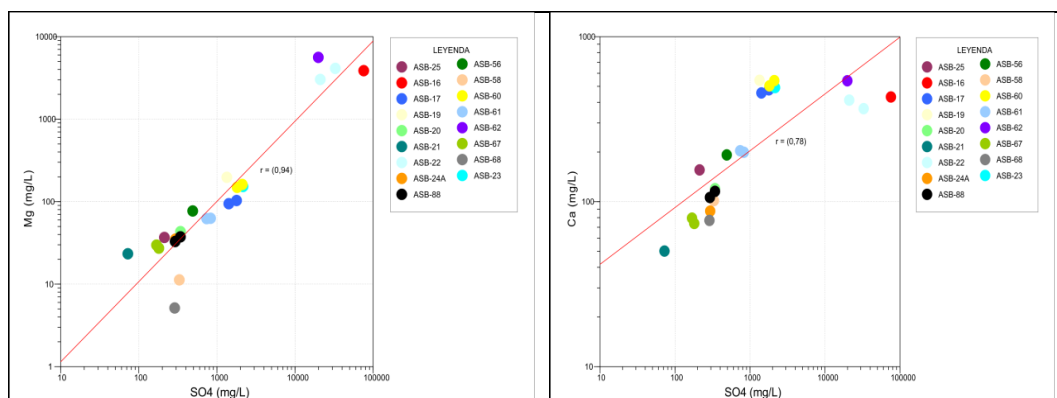


Figura 7-56. Relaciones binarias (Ca-SO₄, Mg-SO₄) entre el agua subterránea de los piezómetros de la zona III

Para la apertura del acceso al DDM Cerro Negro se utilizó material de desmonte el cual presentó mayores concentraciones de hierro, aluminio, calcio, cobre, potasio y magnesio, con concentraciones de cloruros (90 mg/kg) y sulfatos (2700 mg/kg) siendo solubles con 34,33 mg/l y 436,7 mg/l, respectivamente, de acuerdo a la prueba SFE. Según la prueba ABA, en 2 muestras del acceso al DDM Cerro Negro, una fue clasificada como incertidumbre y la otra fue potencial generador de acidez.

El agua subterránea del piezómetro ubicado en la quebrada Siete Vueltas ASB-68, aproximadamente a 1,2 km al este de futuro DDM Cerro Negro, fue de tipo sulfatada cálcica, con concentraciones de iones mayoritarios entre 6 - 10 meq/l y las concentraciones de arsénico, cobre, cadmio, cobalto, plomo, níquel y zinc en su mayoría fueron menores al límite de detección del laboratorio; estas condiciones se han mantenido desde el 2007 al 2018; excepto en el 2009 donde se observó un incremento de pH, conductividad eléctrica, cloruros y sulfatos (Figura 7-57).

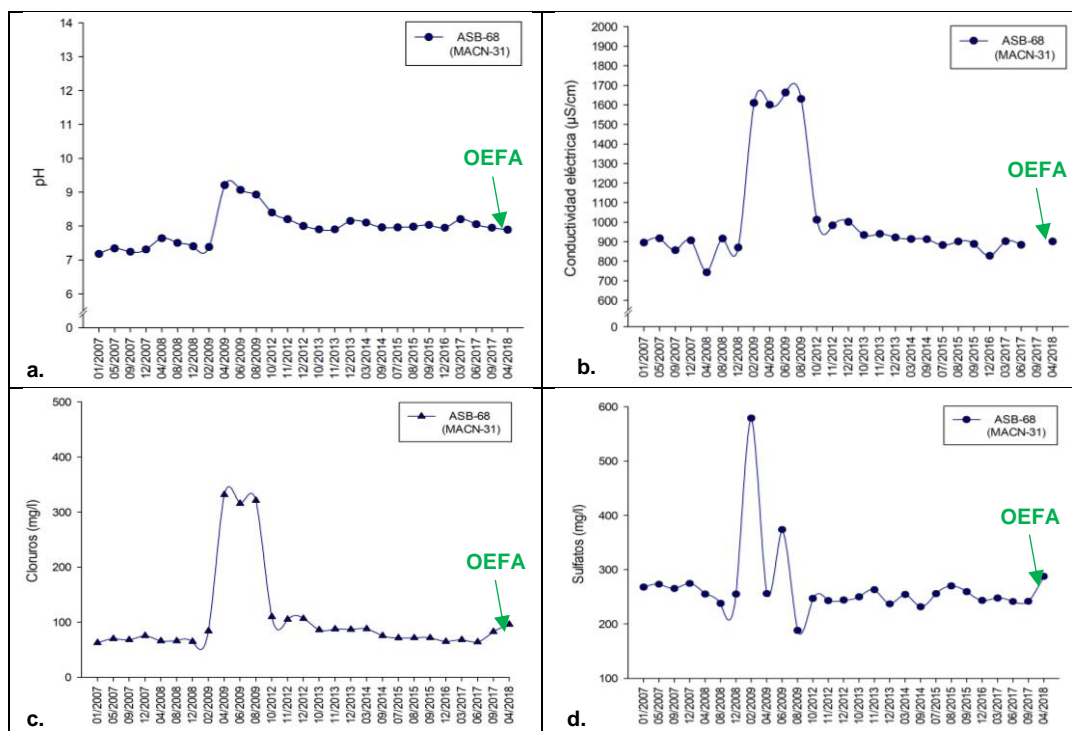


Figura 7-57. Registro histórico en el agua del piezómetro ASB-68 (MACN-31) **a.** potencial de hidrogeno, **b.** conductividad eléctrica, **c.** cloruros y **d.** sulfatos

Fuente: Informes de monitoreo participativo del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería – OSINERGMIN.

Informes de monitoreo ambiental participativo de SMCV.

Zona IV: DDM Oeste y DDM Suroeste

Se evaluó el agua subterránea en 5 piezómetros, distribuidos 3 aguas abajo del DDM Suroeste (ASB-75, ASB-43 y ASB-71); y 2 aguas abajo del DDM Oeste (ASB-63 y ASB-64). El agua subterránea fue de tipo sulfatada cálcica, con concentraciones de iones mayoritarios entre 15 - 25 meq/l y las concentraciones de arsénico, cobre, cadmio, cobalto, plomo, níquel y zinc en su mayoría fueron menores al límite de detección del laboratorio.

El agua subterránea del piezómetro ASB-71, ubicado aproximadamente a 1,5 km al oeste del DDM Suroeste, vienen siendo monitoreadas desde el 2014 por SMCV y se ha observado una variación en la concentración de sulfatos de 15 a 25 meq/l desde el 2014 al 2018 (Figura 7-58). En cambio, para el mismo periodo de monitoreo, el agua subterránea del piezómetro ASB-64 cercana al DDM Oeste, registró valores similares de sulfatos, y las del piezómetro ASB-63 presentó un descenso (Figura 7-59).

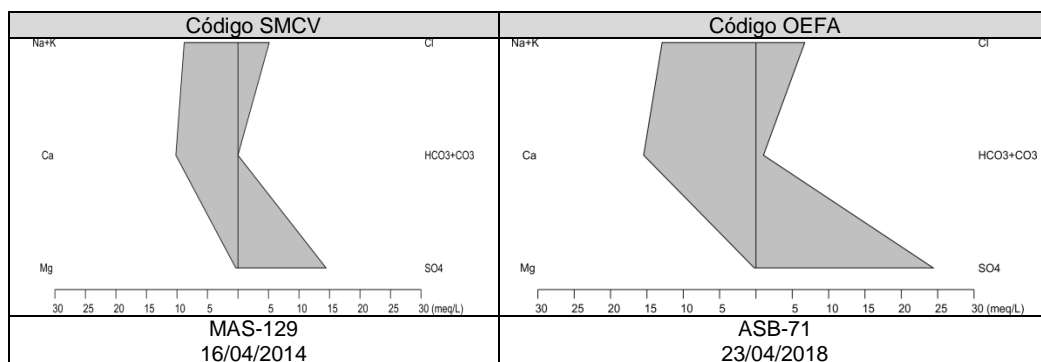


Figura 7-58. Comparación de facies hidroquímicas del agua subterránea del piezómetro ASB-71 cercano al DDM Suroeste.

Fuente: Información proporcionada por SMCV. Hoja de trámite: E01-085237

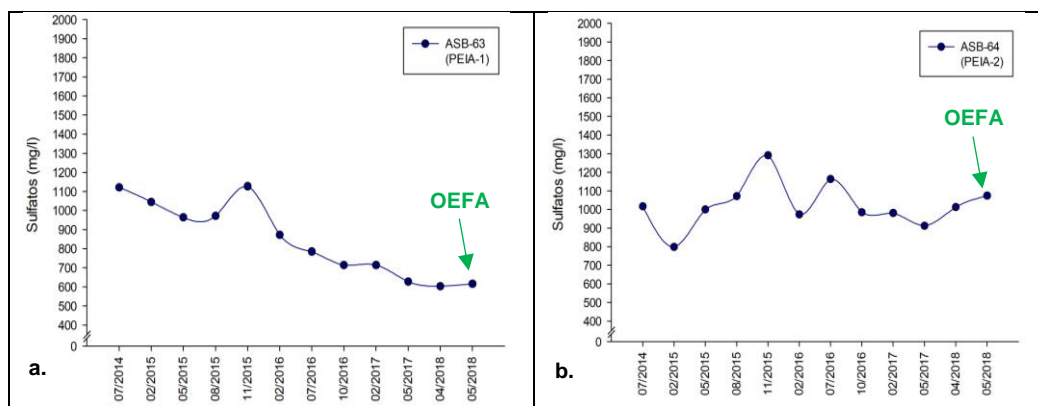


Figura 7-59. Registro histórico de sulfatos en el agua subterránea de los piezómetros a. ASB-63 y b. ASB-64

Fuente: Informes de monitoreo ambiental participativo de SMCV.



8. CONCLUSIONES

Río Chili y tributarios

En el río Chili, aguas arriba de la ciudad Arequipa (AS-17), todos los parámetros evaluados no excedieron los ECA para agua Cat. 3 (2015 y 2017), con una calidad ecológica moderada, según el índice ABI; mientras que, en la zona urbana (AS-16) y aguas abajo de la ciudad de Arequipa (AS-02 y AS-04), solo el pH excedió el ECA para agua, con una calidad ecológica moderada y buena. Respecto a sus tributarios: (1) Quebrada Uchumayo (AS-10) presentó una concentración de fluoruros que excedió los ECA para agua Cat. 3 (2015 y 2017), y (2) Río Mollebaya (AS-09) presentó valores de conductividad eléctrica, cloruros y boro que superaron el referido estándar; estas excedencias se debieron al entorno geológico y actividades agropecuarias de la zona, presentando una calidad ecológica buena y moderada respectivamente.

En los sedimentos del río Chili y tributarios, ningún punto excedió referencialmente los valores ISQG y PEL de la *Canadian Council of Ministers of the Environment* (2002), a excepción del punto SD-01 (42,9 mg/kg), en la estación de bombas 1, que superó el valor ISQG (37,5 mg/kg) para cobre de la norma referida; debido a la acumulación de una mayor fracción fina de limo y arcilla en el sedimento, favorecido por el encauzamiento del río en esta estación. El punto HB-08, ubicado aguas abajo de la estación de bombas 1, la calidad ecológica según el índice ABI fue mala, posiblemente debido a los trabajos de encauzamiento, descolmatación y mantenimiento de gaviones realizados por SMCV, autorizados por la autoridad competente, y otras actividades antrópicas observadas en la zona; sin embargo, aproximadamente a 6 km (HB-07) y 8 km (HB-06) aguas abajo del punto HB-08, presentaron una recuperación en su calidad ecológica de buena y moderada, respectivamente.

Aire, suelo y polvo sedimentado

El registro meteorológico del 5 al 19 setiembre de 2018 en las 6 estaciones de monitoreo, determinó direcciones de viento diferenciadas en 2 zonas, influenciadas principalmente por la presencia del Batolito de la Caldera. La primera zona corresponde al área de operaciones de la UP Cerro Verde donde los vientos en periodo diurno (7:00 h – 19:00 h) provinieron del oeste, suroeste y sursuroeste, con una velocidad y temperatura promedio de 3,6 m/s y 16 °C, mientras que para el periodo nocturno (19:00 h – 7:00 h) provinieron del noreste, nornoreste y este, con una velocidad y temperatura promedio de 1,2 m/s y 11,7 °C; y la segunda zona comprende los distritos Uchumayo, Socabaya y Yarabamba donde los vientos en periodo diurno provinieron del norte, noroeste y nornoroeste, con una velocidad y temperatura promedio de 2,7 m/s y 18,2 °C, mientras que para el periodo nocturno provinieron del sur, sureste y este, con velocidad y temperatura promedio de 0,8 m/s y 9,3 °C.

En las estaciones de monitoreo no operacionales (CA-04, CA-06 y CA-08) las concentraciones promedio de 24 horas para metales en PM₁₀ referencialmente no excedieron la norma canadiense *Ambient Air Quality Criteria Standards* (2012) y las concentraciones de material particulado menor a 10 micras (PM₁₀), material particulado menor a 2,5 micras (PM_{2,5}) no excedieron los valores de los ECA para aire (2017), y según el registro histórico realizado por SMCV y OSINERGMIN, las concentraciones de los parámetros evaluados en las mencionadas estaciones de monitoreo no presentaron variaciones significativas.



De los resultados de material particulado PM_{10} se determinó que el mayor porcentaje (88,1 %) corresponde a elementos no metálicos y el menor porcentaje (11,9 %) corresponde a elementos metálicos. De este último, de acuerdo al análisis de factorización de matriz positiva, se determinó 4 principales fuentes emisoras: (1) la resuspensión del suelo con 3,8 %, (2) la industria metal-mecánica con 3,5 %, (3) la quema de biomasa con 3,2 % y (4) la actividad minera en general con 1,4 %. Cabe precisar que, este último valor fue inferior a lo declarado en el modelamiento de material particulado PM_{10} del EIA de la de Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde (2012) y su modificatoria (2016).

Del análisis estadístico se determinó que existe correlación entre los resultados obtenidos de la caracterización de los metales calcio, aluminio, potasio, magnesio, sodio y titanio en el suelo circundante a la cantera de extracción de materiales no metálicos de Concretos Supermix S.A. – Proyecto La Enlozada (SU-10) y el polvo sedimentado en los paneles solares y techos de las viviendas del Pueblo Joven Cerro Verde (SU-08 y SU-08-1).

Agua subterránea

De los 37 piezómetros evaluados en la zona I, las mayores concentraciones de cloruros y sulfatos se presentaron en el agua subterránea de los piezómetros ubicados aguas abajo del sistema de colección de filtraciones y en el estribo izquierdo del depósito de relaves Enlozada en comparación con el agua subterránea de los piezómetros del estribo derecho. Cabe precisar que, las concentraciones de arsénico, cobre, cadmio, cobalto, plomo, níquel y zinc en su mayoría fueron menores al límite de detección del laboratorio en toda la zona evaluada.

Se observó un incremento de las concentraciones de cloruros y sulfatos en el agua subterránea del piezómetro ubicado aguas abajo del sistema de colección de filtraciones (ASB-05) entre el 2002 y 2018, y de los piezómetros ubicados en el estribo izquierdo (ASB-94, ASB-15 y ASB-14) entre el 2013 y 2018 concordante con la caracterización hidroquímica y relaciones binarias; debido a que la roca se encuentra fracturada (hasta los 20 m de profundidad aproximadamente), con alta porosidad (inferida de las perforaciones y resistividades del perfil tomográfico LG-FT6 realizado por SMCV), y afectada por las fallas geológicas Cenicienta, Variante y Jenks, favoreciendo trayectorias preferenciales para la migración de filtraciones y agua subterránea, tal como fue estimado en el modelo de transporte de solutos por SMCV en el EIA del proyecto de Expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde (2012), por lo que instalaron pozos de rebombeo como medida de mitigación.

Las concentraciones de cloruros y sulfatos en el agua subterránea de los piezómetros ASB-118 (entre el 2002 y 2018) y ASB-117 (entre el 2013 y 2018), ubicados aguas abajo del sistema de colección de filtraciones y en el estribo izquierdo respectivamente, no presentaron variaciones significativas, esto debido a las acciones de rebombeo de filtraciones hacia el depósito de relaves Enlozada.

En el agua subterránea de los piezómetros del estribo derecho no se han identificado cambio alguno en sus características hidroquímicas a través del tiempo entre el 2013 y 2018. Asimismo, las relaciones binarias ($Ca-SO_4$, $Sr-SO_4$, $Ca-Cl$ y $Sr-Cl$) muestran que no se relacionan con el agua del sobrenadante del depósito de relaves Enlozada.

En la zona II, el agua subterránea de los piezómetros aguas abajo del sistema de colección de filtraciones (ASB-40, ASB-55, ASB-50, ASB-53, ASB-51 y ASB-52) presentaron concentraciones de cloruros mayores en comparación a los piezómetros aguas arriba (ASB-48, ASB-119 y ASB-116), concordantes con las características hidroquímicas y las relaciones binarias ($Cl-Br$ y $Cl-Na$). Estas altas concentraciones de



cloruros se deberían a la hidratación de rocas volcánicas, dispersas en forma de bolsones interconectadas por medio de fallas y fracturas en sentido NE-SW, que incrementaron la relación Cl/Br y que pudieron haber formado un acuífero semiconfinado, inferido del perfil tomográfico L-16 que concuerda con el perfil en planta (30 m de profundidad) realizado por SMCV.

En la zona III, el agua subterránea de los piezómetros aguas abajo del Pad 4A (ASB-16), Pad 4B (ASB-62) y planta SX/EW (ASB-22) fueron de tipo sulfatada cálcica con concentraciones de iones mayoritarios entre 400 meq-l y 1200 meq-l, pH ácidos (2,65 a 3,57 unidades) y elevadas concentraciones de arsénico, cadmio, cobalto, cobre, níquel, plomo y zinc, debido al aporte de las infiltraciones de soluciones PLS de los componentes mineros mencionados. Estas filtraciones son captadas en la presa Huayrondo y recirculadas mediante pozos de rebombeo, ubicados aguas arriba y aguas abajo de dicha presa, observándose bajas resistividades en el perfil tomográfico L-9 que infieren la existencia de filtraciones remanentes; sin embargo, 500 m aguas abajo de este sistema de recirculación se encuentra el piezómetro ASB-17 que registró un pH neutro, con menores concentraciones de sulfatos y metales que se mantuvieron similares desde el 2013 al 2018. Cabe indicar que, estas filtraciones fueron declaradas en el Plan de Adecuación y Manejo Ambiental (1997) y previstas en el Estudio de Impacto Ambiental del Pad 4B (2010).

En la zona IV, el agua subterránea en los piezómetros aguas abajo del DDM Suroeste (ASB-75, ASB-43 y ASB-71) y del DDM Oeste (ASB-63 y ASB-64) fue de tipo sulfatada cálcica, con concentraciones de iones mayoritarios entre 15 - 25 meq-l, y las concentraciones de sulfatos y metales no registraron variaciones significativas entre el 2014 y 2018.



9. BIBLIOGRAFÍA

Acosta, J.; Rivera, R.; Valencia, M.; Chirif, H.; Huanacuni, D., et al. (2009) –Mapa metalogenético del Perú 2009, informe inédito. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 17 p.

Acosta, R., Ríos, B., Rieradevall, M., Prat, N. (2009). Propuesta de un Protocolo de Evaluación de la Calidad Ecológica de Ríos Andinos (C.E.R.A) y su Aplicación a dos Cuencas en Ecuador y Perú. *Limnetica*, 28(1), 35-64.

Alcalá, F.J.; Custodio, E. (2008). Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal. *Elsevier. Journal of Hydrology* (2008) 359, 189– 207.

Autoridad Nacional del Agua. (2011). Informe técnico N° 108-2011-ANA-AAA I C-0/SDCPRH/ MPPC-GRB. Segundo monitoreo de la calidad de agua en la cuenca Chili - Arequipa. realizado del 24 al 28 de octubre de 2011.

Autoridad Nacional del Agua. (2012). Informe técnico N° 001 -2012-ANA-PMGRH-GBR/AAA ICO-SDGCRH/MPPC. Tercer Monitoreo Participativo de la calidad del agua en las cuenca Quilca - Chili.

Autoridad Nacional del Agua. (2012). Informe técnico N° 001-2012-PMGRH – CUENCA CHILI /LGEQ-AAA I C-0/ SDGCRH/ MPPC. Segundo monitoreo de la calidad de agua en la cuenca Quilca-Chili - Arequipa.

Autoridad Nacional del Agua. (2012). Informe técnico N° 002 -2012-ANA-PMGRH-GBR/AAA ICO-SDGCRH/MPPC. Primer monitoreo de calidad de aguas del río Chili - Arequipa.

Autoridad Nacional del Agua. (2012). Informe técnico N° 011 -2012-ANA-PMGRH-GBR/AAA ICO-SDGCRH/MPPC. Primer monitoreo de calidad de agua superficial en la cuenca Quilca-Chili - Arequipa.

Autoridad Nacional del Agua. (2013). Informe técnico N° 001 -2013- PMGRH-CUENCA CHILI/LGEQ. Primer monitoreo de calidad de agua en la cuenca Quilca-Chili, realizado del 21 de enero al 01 de febrero del 2013.

Autoridad Nacional del Agua. (2013). Informe técnico N° 004-2013-PMGRH – CUENCA CHILI /LGEQ. Tercer Monitoreo Participativo de la Calidad del Agua Superficial en la Cuenca Quilca Chili, realizado del 03 al 25 de octubre del 2013.

Autoridad Nacional del Agua. (2014). Informe Técnico N.º 007-2014-PMGRH-Cuenca Quilca-Chili/LGEQ.Cuarto monitoreo participativo en la cuenca Quilca-Chili, periodo 2014.

Autoridad Nacional del Agua. (2014). Informe técnico N° 001 -2014- PMGRH-CUENCA CHILI/LGEQ. Primer monitoreo de calidad de agua en la cuenca Quilca-Chili, realizado del 29 de enero al 10 de febrero del 2014.

Autoridad Nacional del Agua. (2014). Informe técnico N° 003 -2014- PMGRH-CUENCA CHILI/LGEQ. Segundo monitoreo de calidad de agua en la cuenca Quilca-Chili, realizado del 27 de marzo al 01 de abril del 2014.

Autoridad Nacional del Agua. (2014). Informe técnico N° 005 -2014- PMGRH-CUENCA CHILI/LGEQ. Tercer monitoreo de calidad de agua en la cuenca Quilca-Chili, realizado del 02 al 08 de mayo.



Autoridad Nacional del Agua. (2014). Informe técnico N° 007 -2014- PMGRH-CUENCA CHILI/LGEQ. Cuarto monitoreo de calidad de agua en la cuenca Quilca-Chili, realizado del 27 de octubre al 03 de noviembre.

Autoridad Nacional del Agua. (2014). Informe técnico N° 08-2014-ANA-AAA.CO/ALA-CH-ECA/JCM., Segundo Monitoreo Participativo de la Calidad del Agua Superficial en la Cuenca Quilca Chili, realizado del 04 al 14 de marzo del 2013.

Autoridad Nacional del Agua. (2016). Informe técnico N° 046-2015-ANA-AAA.CO/ALA-CH-ECA/JCM., Primer Monitoreo Participativo de la Calidad del Agua Superficial en la Cuenca Quilca Chili, realizado del 14 al 22 de setiembre del 2015.

Autoridad Nacional del Agua. (2016). Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales, aprobado mediante Resolución Jefatural N.° 010-2016-ANA.

Autoridad Nacional del Agua. (2017). Resolución Directoral N.° 2851-2017-ANA/AAA I C O. Autoriza a favor de Sociedad Minera Cerro Verde el mantenimiento y limpieza de la estación de bombas I Congata así como de las estructuras de descarga de agua de la planta de tratamiento de aguas residuales, distrito de Uchumayo, provincia de Arequipa, departamento de Arequipa.

Autoridad Nacional del Agua. (2018). Resolución Directoral N.° 1210-2018-ANA/AAA I C O. Autoriza a favor de Sociedad Minera Cerro Verde la limpieza, mantenimiento, reparación y protección de estructuras hidráulicas de estación de bombas I, estructura de descarga de PTAR y áreas vecinas del cauce del río Chili, distrito de Uchumayo, provincia de Arequipa, departamento de Arequipa.

Canadian Council of Ministers of the Environment (2002). Canadian Environmental Quality Guidelines. Sediment. Quality Guidelines for Protection of Aquatic Life – Fresh water (Valores guía de calidad ambiental de Canadá para sedimentos en cuerpos de agua dulce).

Consejo Nacional del Ambiente - CONAM. 2005. Gesta Zonal del Aire Arequipa. Plan a Limpiar el Aire: Arequipa.

Custodio, E., y Llamas, M.R. (1996). Hidrología Subterránea. 2a ed. Barcelona, España: Omega.

D.M., V.H. Resh and R.S. King. (2008). Use of Aquatic Insects in Biomonitoring. In: Merritt R.W., K.W. Cummins and M.B Berg (Eds.). An Introduction to the Aquatic Insects of North America. Kendall/Hunt Publishing Company. United States of America.

Dirección General de Salud Ambiental. (2005). Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos. Perú.

Domínguez, E. & Fernández, H. (2009). Macroinvertebrados Bentónicos Sudamericanos. Sistemática y Biología. Fundación Miguel Lillo. Tucumán-Argentina.

Environmental Protection Agency. 2018. Use of Airborne, Surface, and Borehole Geophysical Techniques at Contaminated Sites EPA/625/R-92/00. Disponible en: <https://www.epa.gov/quality/use-of-airborne-surface-and-borehole-geophysical-techniques-at-contaminated-sites-reference-guide>

Environmental Protection Agency - EPA. (2016). Standard Operating Procedure-SOP #2016, Sediment Sampling. Disponible en:



https://www.epa.gov/sites/production/files/documents/r8-src_eh-02.pdf. [10 de febrero de 2018]

Environmental Protection Agency – EPA. (2018), “SPECIATE 4.2-Speciation Database Development Documentation, EPA/600/RT-09/038. Disponible en: <http://www.epa.gov/ttn/chief/software/speciate/index.html>

Freeport- McMoRan. 2017. Caracterización química en muestras de PM10 obtenidas en el segundo monitoreo ambiental participativo realizado el 14 de junio de 2017 en los distritos de Uchumayo, Tiabaya, Hunter, Quequeña y Yarabamba. Sociedad Minera Cerro Verde.

GC Ground S.A.C. 2014. Reporte geofísico. Estudio de tomografía geoeléctrica. Proyecto Cerro Verde Tinajones. Noviembre 2014.

GC Ground S.A.C. 2017. Reporte geofísico. Tomografía geoeléctrica. Proyecto Ares del seepage- Quebrada Enlozada.

GC Ground S.A.C. 2018. Reporte geofísico. Estudio de tomografía geoeléctrica. Polarización Inducida y Resistividad Linga SCS. Mayo 2018.

Henry, R.C. (1991) Multivariate receptor model. In: Hopke, P.K., ed. Receptor modeling for air quality management. Amsterdam, Elsevier, pp 117-147.

Hopke P.K., (2000). A guide to positive matrix factorization. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711, USA.

Hopke, P.K., (2003). Recent developments in receptor modeling. Journal of Chemometrics 17, 255-265.

INGEMMET. (2018). Perímetros de protección de manantiales en la zona oriental de Arequipa. Informe Técnico N.º A6799. Abril-2018.

Jost, L. (2006). Entropy and diversity. Oikos, 113: 363-375.

Klemm, D. J., Lewis, P. A., Fulk, F. & Lazorchak, J. M. (1990). Macroinvertebrate Field and Laboratory Methods for Evaluating the Biological Integrity of Surface Waters, EPA.600/4-90/030

Loke, M.H., 2009. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys. CRC Press, Boca Raton, London, New York.

Loke, M.H., Acworth, I., Dahlin, T., 2003. A comparison of smooth and blocky inversion method in 2D electrical imaging surveys. Explor. Geophys. 34, 182–187.

Loke, M.H., Barker, R.D., 1995. Least-square deconvolution of apparent resistivity pseudo-sections. Geophysics 60 (6), 499–523.

Lopez, J. Rey , J., Sandoval, S. y Rodriguez, M. (2007). Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (tomografía eléctrica 2D y 3D) Instituto Geofísico Sismólogo Ing. F.S. Volponi. Facultad de Cs. Exactas. Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan and School of Physics. University of Science of Malaysia. Penang. Malaysia.

Magurran, A. (1987). Diversidad ecológica y su medición. Edit. Vedral ediciones. Primera edición. Barcelona – España.



Miras, A y Galan, E. (1992). Distribución, características generales y aplicaciones de la Barita del suroeste español (Badajoz y Sevilla). Boletín Geológico y Minero, 103(5), 118.

MWH, 2005. Cerro Verde Tailing Storage Facility Final Design. Prepared for Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. November 2005.

MWH, 2008. Final Report Evaluation of Seeps & Potential Impacts Quebrada Enlozada Tailing Storage Facility. Prepared for Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. December 2008.

MWH, 2017. Investigación hidrogeológica de la presa Huayrondo. Elaborado para Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. Abril 2017.

OEFA. (2015). Informe de monitoreo ambiental participativo de calidad de aire realizado en el distrito de Jacobo Hunter, provincia y departamento de Arequipa. Informe N.º 263-2015-OEFA/DE-SDCA.

OEFA. (2015). Informe de monitoreo de calidad del aire en el distrito de Jacobo Hunter, provincia y departamento de Arequipa. Informe N.º 081-2015-OEFA/DE-SDCA.

OEFA. (2016). Informe del monitoreo ambiental de calidad de agua superficial y sedimento en el río Chili y afluentes, realizado del 14 al 18 de mayo de 2016. Informe N.º 276-2016-OEFA/DE-SDCA.

OEFA. (2018). Informe de visita de reconocimiento para el desarrollo del Plan de Evaluación Ambiental en el área de influencia de la unidad de producción Cerro Verde. Informe N.º 100-2018-OEFA/DEAM-STEC.

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería - OSINERGMIN. (2008). Informe de monitoreo participativo en la unidad de producción Cerro Verde: Sociedad Minera Cerro Verde. Informe N.º 02-MA-TEC-2008. Junio 2008.

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería - OSINERGMIN. (2008). Supervisión especial de calidad de aire y aguas. U.M Cerro Verde. Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. Informe N.º 07-2008-SE-SMCV/AUDITEC. Setiembre 2008.

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería - OSINERGMIN. (2009). Supervisión especial de calidad de aire y aguas. U.M Cerro Verde. Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. Informe N.º 01-2009-SE-SMCV/AUDITEC. Enero 2009.

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería - OSINERGMIN. (2009). Informe de supervisión especial correspondiente al cuarto monitoreo participativo. U.M Cerro Verde. Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. Marzo 2009.

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería - OSINERGMIN. (2009). Informe de supervisión especial correspondiente al quinto monitoreo participativo. U.M Cerro Verde. Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. Informe N.º 08-ES-2009-ACOMISA. Mayo 2009.

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería - OSINERGMIN. (2009). Informe de supervisión especial correspondiente al sexto monitoreo participativo. U.M Cerro Verde. Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. Informe N.º 15-ES-2009-ACOMISA. Junio 2009.

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería - OSINERGMIN. (2009). Informe de supervisión especial correspondiente al séptimo monitoreo participativo. U.M



Cerro Verde. Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. Informe N.º 20-ES-2009-ACOMISA. Setiembre 2009.

Ospina, R., Aguirre, H y Parra, H. (2007). Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disimiles. *Scientia et Technica* Año XIII. 34, 274.

Owens, P. N., Batalla, R. J., Collins, A. J., Gomez, B., Hicks, D. M., Horowitz, A. J., Kondolf, G. M., Marden, M., Page, M. J., Peacock, D. H., Petticrew, E. L., Salomons, W., & Trustrum, N. A. (2005). Fine-grained sediment in river systems: environmental significance and management issue. *River Research and Applications*, 21, 693–717.

Paatero, P., Tapper, U., (1994). Positive matrix factorization - a nonnegative factor model with optimal utilization of error estimates of data values. *Environmetrics* 5, 111-126.

Peet, R. (1974). The measurement of species diversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 5 285–307.

Pérez, 2016. Criterios para el diseño de la cortina de inyecciones de la presa de arranque del depósito de relaves Linga del proyecto de expansión de la unidad minera Cerro Verde-Arequipa.

Pielou, E. (1975). *Ecological Diversity*. Jhon Wiley, New York. 165 pp.

Querol X., Alastuey A., Rodríguez S., Plana F., Mantilla E., Ruiz C.R., 2001a. Monitoring of PM10 and PM2.5 around primary particulate anthropogenic emission sources. *Atmospheric Environment* 35, 845-858.

Resolución Directoral N.º 383-2015-PRODUCE/DVMYPE-I/DIGGAM Declaración del Impacto Ambiental– Concretos Supermix S.A. Proyecto La Enlozada

Roldán G. (2003). Bioindicación de la calidad del agua en Colombia. Uso del método BMWP/ Col. Primera Edición. Editorial Universidad de Antioquia. Colombia. Rosenberg Santoso M., Hopke P.K., Hidayat, A., y Dwiana, L.D. (2008). Source identification of the atmospheric aerosol at urban and suburban sites in Indonesia by positive matrix factorization. *Science of the Total Environment*. 397. 229-237.

Schlumberger Water Services Perú S.A. (2009). Modelo hidrogeológico de la cuenca Huayrondo. 5402-R1. Agosto 2008.

Schlumberger Water Services Perú S.A. (2009). Geochemical model for prediction of PLS migration in Quebrada Huayrondo. 5402-R2. September 2009.

Schlumberger Water Services Perú S.A. (2010). Hydrogeological Study Of The Linga Valle.

Schlumberger Water Services Perú S.A. (2011). Estudio hidrogeológico de área de la fauna Cerro Verde.

Schlumberger Water Services. Perú S.A. (2011). Estudio hidrogeológico del área de la fauna Cerro Verde.

Sokal, R.R. & Michener, C.D. (1958) A Statistical Methods for Evaluating Relationships. *University of Kansas Science Bulletin*, 38, 1409-1448.



Sulca P. (2012). Caracterización hidrogeología, hidrogeoquímica e Isotópica de los acuíferos de la subcuenca del río Chili". Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional San Agustín. Arequipa.

Trejo R, Alarcón M.T., Martínez Y., Romero P, Salvador J. Niveles de fluoruros en el agua de los pozos de la ciudad de Durango. Ingeniería Hidráulica en México 1997;12:51-57.

Wedepohl, K.H., 1995. The composition of the continental-crust. Geochimica et Cosmochimica Acta 59, 1217-1232

10. ANEXOS

- Anexo 1: Mapas
- Anexo 2: Reportes de campo
- Anexo 3: Reportes de resultados
- Anexo 4: Caracterización hidroquímica
- Anexo 5: Análisis mineralógico por microscopía electrónica
- Anexo 6: Modelo receptor
- Anexo 7: Perfiles de suelo y polvo sedimentado
- Anexo 8: Fotografías y videos
- Anexo 9: Requerimiento de información proporcionada por SMCV