

# Anexo D

**Evaluación Hidrogeológica del  
“Santuario Nacional Lagunas  
de Mejía”, provincia de Islay,  
departamento de Arequipa**



Handwritten signature in blue ink, appearing to be "J. A. M." followed by a flourish.



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección

"Año de la Consolidación del Mar de Grau"  
"Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú"



**INFORME N° 00120-2016-OEFA/DE-SDLB-CEAI**

**A :** LÁZARO WALTHER FAJARDO VARGAS  
Subdirector (e) de la Línea de Base y Agentes Contaminantes

**DE :** LUIS ÁNGEL ANCCO PICHUILLA  
Coordinador (e) de Evaluaciones Ambientales Integrales

**OSCAR ARTURO TEJADA CANO**  
Especialista en Evaluaciones Ambientales Integrales

**JOSÉ CARLOS FARFÁN MEZA**  
Tercero Evaluador

**ASUNTO :** Evaluación hidrogeológica del "Santuario Nacional Lagunas de Mejía" y ámbito del Proyecto Tía María - año 2016.

**REFERENCIA:** Planefa 2016

**FECHA :** Lima,

29 DIC 2016

2016-101-52720

Tenemos el agrado de dirigirnos a usted con relación al asunto de la referencia, a fin de informar lo siguiente:

**I. INFORMACIÓN GENERAL**

**1. Detalles de la evaluación ambiental:**

a.	Zona evaluada	Lagunas del Área Natural Protegida "Santuario Nacional Lagunas de Mejía" y área del Proyecto Tía María		
b.	Ámbito de influencia	Santuario Nacional Lagunas de Mejía y ámbito del Proyecto Tía María.		
c.	Problemática de la zona evaluada	Desconocimiento de las características hidrogeológicas en el área de influencia del Proyecto Tía María y en el "Santuario Nacional Lagunas de Mejía".		
d.	¿A pedido de qué se realizó la actividad?	Planefa 2016		
e.	¿Se realizó en el marco de un espacio de diálogo, mesa de diálogo o mesa de desarrollo?	SI	NO	X

**2. Detalles del diagnóstico ambiental:**

a.	Salidas y fechas de monitoreo	Visita de reconocimiento	----
		Prospección geofísica	18/03/16 al 24/03/16
		Monitoreo de agua	04/05/16 al 22/05/16
		Evaluación hidrogeológica	16/05/16 al 22/05/16
b.	Componentes y puntos de monitoreo evaluados	Agua superficial	37 puntos de monitoreo
		Suelo	09 líneas de tomografía



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

"Año de la Consolidación del Mar de Grau"  
"Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú"

3. Equipo profesional:

Los profesionales encargados de la ejecución de la Evaluación hidrogeológica del "Santuario Nacional Lagunas de Mejía" y ámbito del Proyecto Tía María se detallan en la siguiente tabla:

Ítem	Apellidos y Nombres	Profesión	Actividad	Periodo de realización
01	Mónica Jaimes Borda	Ing. Geólogo	Prospección geofísica	18 al 24 de marzo de 2016
03	Patricia Núñez Ramírez	Ing. Ambiental	Monitoreo de agua	04 al 22 de mayo de 2016
04	Zulay Guillermo Paccori	Bióloga		
05	Mónica Jaimes Borda	Ing. Geólogo	Evaluación hidrogeológica	16 al 22 de mayo de 2016
06	José Carlos Farfán Meza	Ing. Geólogo		



OBJETIVO

Evaluar las condiciones hidrogeológicas del "Santuario Nacional Lagunas de Mejía" con énfasis en las áreas de influencia de los administrados fiscalizables por el OEFA, el cual se encuentra desarrollado en el Anexo N° 1, que se adjunta y forma parte del presente informe.

III. ANTECEDENTES

5. El presente informe se realiza dando cumplimiento a la función evaluadora del OEFA, establecida en la ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental (SINEFA), cuyo ejercicio permite establecer el diagnóstico de la calidad ambiental en forma integrada y continua, con énfasis en aquellas actividades fiscalizables por el OEFA, comprendiendo acciones de vigilancia, monitoreo y otras similares según sus competencias, para asegurar el cumplimiento de las normas ambientales. Asimismo, obedece a lo establecido en el Plan Anual de Evaluación y Fiscalización Ambiental 2016 (en adelante, Planefa 2016) aprobado mediante resolución de consejo directivo N° 050-2015-OEFA/CD, publicada el 22 de diciembre de 2015.

IV. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

6. El análisis se encuentra desarrollado en el Anexo N° 1, denominado Evaluación hidrogeológica del "Santuario Nacional Lagunas de Mejía" y ámbito del Proyecto Tía María - año 2016 que se adjunta y forma parte del presente informe.

Handwritten signature and initials



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Organismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

"Año de la Consolidación del Mar de Grau"  
"Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú"

## V. CONCLUSIÓN

7. En vista que el informe de Evaluación hidrogeológica del "Santuario Nacional Lagunas de Mejía" y ámbito del Proyecto Tía María - año 2016 cuenta con el sustento técnico requerido, el equipo profesional que elaboró el informe se sirve elevar dicho documento a la Coordinación de Evaluaciones Ambientales Integrales a efectos que se proponga su aprobación ante la Dirección de Evaluación.

Atentamente,

**LUIS ÁNGEL ANCCO PICHUILLA**

Coordinador (e) de Evaluaciones Ambientales Integrales  
Dirección de Evaluación  
Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

**OSCAR ARTURO TEJADA CANO**

Especialista de Evaluaciones Ambientales Integrales  
Dirección de Evaluación  
Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

**JOSÉ CARLOS FARFÁN MEZA**

Tercero Evaluador  
Dirección de Evaluación  
Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Organismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

"Año de la Consolidación del Mar de Grau"  
"Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú"

Lima, 29 DIC 2016

Visto el Informe N° 00120-2016/OEFA-DE-SDLB-CEAI y habiéndose verificado que su contenido se encuentra enmarcado en el ejercicio de la función evaluadora, así como su coherencia normativa; el Subdirector (e) de la Línea de Base y Agentes Contaminantes recomienda su APROBACIÓN a la Dirección de Evaluación, razón por la cual se TRASLADA el presente Informe.

Atentamente,

---

**LÁZARO WALTHER FAJARDO VARGAS**  
Subdirector (e) de la Línea de Base y Agentes Contaminantes  
Dirección de Evaluación  
Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

29 DIC 2016

Visto el Informe N° 00120-2016/OEFA-DE-SDLB-CEAI y en atención a la recomendación de la Coordinación de Evaluaciones Ambientales Integrales, así como de la Subdirección de la Línea de Base y Agentes Contaminantes, la Dirección de Evaluación ha dispuesto aprobar el presente Informe.

Atentamente,

---

**FRANCISCO GARCÍA ARAGÓN**  
Director de Evaluación  
Dirección de Evaluación  
Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente



---

# EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL "SANTUARIO NACIONAL LAGUNAS DE MEJÍA" Y ÁMBITO DEL PROYECTO TÍA MARÍA- AÑO 2016



---

COORDINACIÓN DE EVALUACIONES  
AMBIENTALES INTEGRALES

DIRECCIÓN DE EVALUACIÓN

Diciembre 2016



### ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN.....	4
2.	ANTECEDENTES.....	5
3.	OBJETIVOS .....	5
3.1	Objetivo general .....	5
3.2	Objetivos específicos .....	5
4.	ALCANCE.....	6
5.	ÁREA DE ESTUDIO .....	6
6.	MARCO CONTEXTUAL .....	8
6.1	El ciclo hidrológico .....	8
6.2	El flujo de agua subterránea .....	9
6.3	Parámetros hidrogeológicos .....	10
6.4	Unidades hidrogeológicas.....	12
6.5	Sistema de flujos de aguas subterráneas .....	14
6.6	Composición química del agua subterránea .....	15
6.7	Conceptos básicos de Geofísica.....	16
7.	METODOLOGÍA.....	19
7.1	Información geológica.....	19
7.2	Información hidrogeológica.....	20
7.3	Datos hidroquímicos .....	22
7.4	Información Geofísica .....	27
8.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	30
8.1	Geología.....	30
8.2	Hidrogeología .....	38
8.3	Hidroquímica .....	45
8.4	Geofísica .....	61
8.4.1	Interpretación y análisis de los perfiles de tomografía geoelectrica .....	61
8.5	Modelo conceptual hidrogeológico.....	70
9.	CONCLUSIONES .....	79
10.	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS .....	81
11.	ANEXOS .....	85



*[Handwritten signature]*



### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6- 1. Valores estimados de la porosidad total y eficaz (%) ..... 10

Tabla 6- 2. Tabla convencional de permeabilidad expresada en magnitud de la permeabilidad (K) ..... 11

Tabla 6- 3. Valores de permeabilidad de terrenos naturales (no consolidados) establecidos..... 11

Tabla 6- 4. Valores estimados de la conductividad hidráulica (metros /día) ..... 11

Tabla 6- 5. Valores de resistividad de algunos materiales en ohmios.metro ..... 19

Tabla 7- 1. Balance iónico de fuentes de agua superficial y subterránea del área de estudio ..... 24

Tabla 7- 2. Descripción de los perfiles de tomografía geoelectrica..... 28

Tabla 8- 1. Valores de conductividad hidráulica comparados con el cuadro de Benítez, 1963 ..... 41

Tabla 8- 2. Caracterización de unidades hidrogeológicas ..... 45

Tabla 8- 3. Distribución del índice Magnesio - Calcio ..... 54

Tabla 8- 4. Niveles piezométricos y descripción de la geología de los piezómetros .... 58

Tabla 8- 5. Resultados Isotópicos de Deuterio y Oxígeno 18..... 59

Tabla 8- 6. Resistividades en sedimentos relacionados a la calidad de agua ..... 63

Tabla 8- 7. Valores de resistividad de algunos tipos de agua..... 64



### ÍNDICE DE FIGURAS



Figura 5- 1. Ubicación hidrográfica del Santuario Nacional Lagunas de Mejía ..... 7

Figura 5- 2. Mapa de ubicación de las lagunas que conforman el SNLM. .... 8

Figura 6- 1.Ciclo hidrológico del agua, esta figura representa el movimiento continuo y cíclico del agua en su estado sólido, líquido y vapor (1) Evaporación (2) Evapotranspiración (3) Precipitación (4) Infiltración. .... 9

Figura 6- 2.Tubería horizontal llenada con arena para demostrar el experimento de Darcy ..... 10

Figura 6- 3. Sistema hidrogeológico, donde se identificas las unidades hidrogeológicas (IGME en Sulca, 2010) ..... 13

Figura 6- 4. Clasificación de los tipos acuífero desde el punto de vista hidráulico (IGME en Sulca, 2010)..... 14

Figura 6- 5. Sistema de flujos de agua subterránea, donde se aprecian el flujo local, intermedio y regional, en relación a la profundidad y tiempo de recorrido; tomado de Tóth (2000). .... 15

Figura 6- 6. Esquema de la resistividad de un medio..... 17

Figura 7- 1.Esquema de ensayos de infiltración con carga constante y carga variable respectivamente. .... 20

Figura 7- 2.Ensayo de infiltración por carga constante realizado en depósitos marinos ubicado en el Santuario Lagunas de Mejía. .... 21

Figura 7- 3.Representación internacional de colores para sistemas acuíferos ..... 22

Figura 7- 4. Diagrama de Stiff, nótese que los vértices señalan el tipo de agua y simultáneamente el desplazamiento horizontal señala el grado de mineralización de la concentración. .... 26

Figura 7- 5. Diagrama de Piper representan el tipo de agua de acuerdo a sus concentraciones de los elementos mayoritarios. .... 26

Handwritten signature



Figura 7- 6. Receptor EIREC PRO de 10 canales.....28

Figura 7- 7. Transmisor de corriente .....28

Figura 8- 1.Perfil y sección geológica A-A' ubicado en el SNLM. ....35

Figura 8- 2.Perfil y sección geológica B-B' ubicado en el SNLM. ....36

Figura 8- 3.Perfil y sección geológica C-C' ubicado en el proyecto Tía María. ....37

Figura 8- 4.Distribución de la conductividad en diferentes depósitos cuaternarios. ....39

Figura 8- 5. Distribución de la conductividad en diferentes tipos de litología en el proyecto Tía María.....40

Figura 8- 6. Ubicación del acuífero poroso no consolidado Mejía .....43

Figura 8- 7. Diagrama de Piper: A. aguas cloruradas cálcicas y sódico-potásicas B: las aguas cloruradas sódico-potásicas en el área de estudio. ....47

Figura 8- 8. Diagrama Scatter de evolución de flujos subterráneos, en su mayoría los puntos se plotean en la franja de flujo intermedio y regional .....48

Figura 8- 9. Mapa Hidroquímico del área de estudio.....50

Figura 8- 10. Diagrama rNa/rCl de las aguas superficiales del SNLM y aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María. ....52

Figura 8- 11.Diagrama de rMg/rCa en las aguas superficiales del SNLM y aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María .....53

Figura 8- 12.Distribución de rMg/rCa en las aguas superficiales del SNLM y aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María .....53

Figura 8- 13.Diagrama de rB/rCl en las aguas superficiales del SNLM y aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María .....55

Figura 8- 14.Distribución de boro en las aguas superficiales del SNLM y aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María .....56

Figura 8- 15. Diagrama rSr/rCl en las aguas superficiales del SNLM y aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María .....57

Figura 8- 16. Relación de  $rCa/(Ca+SO_4) / rNa/(Na+Cl)$  en las aguas superficiales del SNLM y aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María .....58

Figura 8- 17. Gráfico de  $\delta_2H$  y  $\delta_{18}O$  en las aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María .....60

Figura 8- 18. Gráfico de  $\delta_{18}O$ /altitud de las aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María .....61

Figura 8- 19.Tomografía geoelectrica-1 .....65

Figura 8- 20. Tomografía geoelectrica-2 (TG-2).....65

Figura 8- 21. Tomografía geoelectrica-3 .....66

Figura 8- 22. Tomografía geoelectrica-4 .....67

Figura 8- 23.Tomografía geoelectrica-5 .....67

Figura 8- 24.Tomografía geoelectrica-6 .....68

Figura 8- 25.Tomografía geoelectrica-7 .....69

Figura 8- 26.Tomografía geoelectrica-8 .....69

Figura 8- 27.Tomografía geoelectrica-9 .....70

Figura 8- 28. Modelo Hidrogeológico 2D A-A' .....74

Figura 8- 29. Modelo Hidrogeológico 2D B-B' .....75

Figura 8- 30. Modelo Hidrogeológico 2D C-C' .....76

Figura 8- 31.Modelo Hidrogeológico 2D .....77

Figura 8- 32.Modelo Hidrogeológico Conceptual 2D Laguna de Mejía.....78



Handwritten signature

## 1. INTRODUCCIÓN

1. El Santuario Nacional Lagunas de Mejía (en adelante SNLM), está ubicado en el distrito de Mejía, provincia de Ilay en el departamento de Arequipa a escasos metros del mar. Su extensión es de 690.6 hectáreas e incluye varios tipos de hábitats: totorales, pantanos, monte ribereño, gramadales y playas arenosas. Es considerado como uno de los **humedales** más importantes de la costa peruana. Además fue designado como un Sitio Ramsar<sup>1</sup> en 1992, este humedal que abarca la desembocadura del río Tambo son considerados como un área importante para aves migratorias. (*BirdLife International, Semanp, 2016*)
2. Los humedales constituyen ecosistemas frágiles y se encuentran en una posición intermedia entre los ecosistemas terrestres y acuáticos. Las regiones mediterráneas de clima semiárido se caracterizan por una climatología con precipitaciones escasas, una fuerte estacionalidad y una elevada evapotranspiración potencial, lo que genera una dinámica particular del humedal. Por lo general, estos factores climáticos condicionan la permanencia de la lámina de agua en los humedales. Sin embargo, la presencia de acuíferos con niveles freáticos próximos a la superficie topográfica, convierten a las aguas subterráneas en la principal entrada del recurso al sistema, garantizando la permanencia de la lámina de agua durante todo el ciclo hidrológico, o por lo menos, retrasando su desecación (*Llamas, 1992; Winter y Llamas, 1993; Custodio, 2001 en IGME, 2009, pág. 153*).
3. El presente informe busca dar a conocer el comportamiento hidrogeológico en el área de influencia del proyecto Tía María y el acuífero Mejía (lugar donde se ubica las lagunas de Mejía), a través del cual se determinará si existe una posible conexión hidráulica entre el proyecto Tía María, las Lagunas Mejía y río Tambo, así como determinar la posible influencia del mar en esta Lagunas. La evaluación hidrogeológica se basa en la información obtenida en campo (cartografiado geológico e hidrogeológico), muestreo de aguas superficiales y revisión bibliográfica de trabajos realizados por EAS, 2003 y Southern Perú Copper Corporation, 2003 de donde se obtuvo información para una reinterpretación de los datos obtenidos.
4. Los trabajos de campo se realizaron en el mes de abril y mayo del 2016, el trabajo parte de un cartografiado hidrogeológico a escala 1:25 000, donde se zonifica los principales tipos de roca, suelos y estructuras diferenciando sus características permeables e impermeables, así como también la prospección geofísica por el método de resistividad multielectródico, basado en la modelización 2-D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas), para evaluar e identificar las características físicas del subsuelo, indicar las condiciones geo-estructurales, la existencia y profundidad de la napa freática, espesor del acuífero, intrusión marina y línea de mezcla (interfaz) agua dulce agua salada; también se realizó un inventario y el análisis de metales de las fuentes de aguas superficiales

<sup>1</sup> Sitios Ramsar es la Convención sobre los humedales de importancia internacional (Ramsar, Irán, 1971) es un tratado intergubernamental cuya misión es "la conservación y el uso racional de todos los humedales mediante acciones locales, regionales y nacionales y gracias a la cooperación internacional, como contribución al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo". A setiembre de 2012, 163 estados se han adherido a la convención como Partes Contratantes y más de 2 000 humedales de todo el mundo, con una superficie de más de 190 millones de hectáreas, han sido designados para ser inscritos en la lista de humedales de importancia internacional.



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Organismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

cercanos al entorno de las Lagunas de Mejía; que fueron analizados por laboratorios acreditados y certificados como NSF Envirolab S.A.C, AGQ Perú S.A.C e Inspectorate Services Perú SAC, utilizando métodos de Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES) y Espectrometría de Masa por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) para conocer su composición química y ser evaluados desde un punto de vista hidroquímico-isotópico con fines de conocer el tipo de agua y su posible origen.

## 2. ANTECEDENTES

5. Con la finalidad de establecer los puntos de monitoreo de calidad de agua, sedimento e hidrobiología, se realizó la primera visita de reconocimiento, desarrollada del 10 al 20 de diciembre de 2015. Los resultados obtenidos fueron reportados en el Informe N° 00058-2016-OEFA/DE-SDLB-CEAI, de fecha 03 de mayo de 2016.
6. Mediante el Informe N° 00070-2016-OEFA/DE-SLDB-CEAI, de fecha 03 de mayo de 2016, se aprobó el Plan de Evaluación Ambiental de la cuenca Tambo (en adelante PEA cuenca Tambo), en el cual entre sus objetivos principales se consideró evaluar la calidad de agua, sedimento e hidrobiología, flora y fauna del SNLM. Adicionalmente a estos objetivos, se propuso caracterizar los bofedales y lagunas de esta área natural protegida. En el mismo documento se describe la problemática ambiental y las actividades que se realizarán en la evaluación ambiental de la cuenca Tambo. Esto de acuerdo con los lineamientos del Plan de Evaluación y Fiscalización Ambiental para el año 2016 (en adelante, Planefa).
7. Para el desarrollo del presente estudio, los profesionales de la Dirección de Evaluación realizaron tres salidas de campo. La primera salida se realizó del 18 al 24 de marzo de 2016, donde se desarrolló la prospección geofísica de las lagunas y áreas adyacentes en el SNLM. La segunda salida se realizó del 04 al 22 de mayo de 2016, para evaluar la calidad de agua superficial, sedimento e hidrobiología a lo largo de la cuenca Tambo. Finalmente, la tercera salida se realizó del 16 al 22 de mayo de 2016 a fin de realizar las evaluaciones de flora, fauna e hidrogeología de las lagunas del SNLM.

## 3. OBJETIVOS

### 3.1 Objetivo general

8. Evaluar las condiciones hidrogeológicas del Santuario Nacional Lagunas de Mejía con énfasis en las áreas de influencia de los administrados fiscalizables por el OEFA.

### 3.2 Objetivos específicos

9. Determinar las unidades hidrogeológicas en el Santuario Nacional Lagunas de Mejía y en área de influencia del proyecto Tía María.
10. Realizar la caracterización hidroquímica de las lagunas del Santuario Nacional de Mejía y de las aguas subterráneas del área de influencia del proyecto Tía María.

11. Realizar la caracterización geofísica en el Santuario Nacional Lagunas de Mejía.

#### 4. ALCANCE

12. El presente estudio refleja las condiciones hidrogeológicas actuales en el Santuario Nacional Lagunas de Mejía y el ámbito del Proyecto minero Tía María, el cual se centra en el análisis geológico, hidrogeológico, hidroquímico y geofísico, cuya evaluación de campo se realizó a través del monitoreo de calidad de agua del 04 de mayo al 22 de mayo de 2016.

#### 5. ÁREA DE ESTUDIO

13. El área de estudio corresponde al Santuario Nacional Lagunas de Mejía y área de influencia del proyecto Tía María, abarca los distritos de Mejía, Cocachacra y Deán, provincia de Ilay y región Arequipa. Geográficamente se ubica al oeste de la vertiente occidental de la faja costera de Arequipa entre las coordenadas UTM siguientes: Norte 8104736 y 8117672, Este 192528 y 205256, cuyas alturas aproximadas se encuentran entre 650 msnm (parte más alta) y 0 msnm (parte baja). Respecto a la hidrografía, el área de estudio se localiza en la vertiente del Pacífico en la desembocadura del río Tambo y la Intercuenca 1319<sup>2</sup>, (ver Figura 5- 1).

14. El Santuario Nacional Lagunas de Mejía (SNLM), se ubica al noroeste de la desembocadura del río Tambo en las Pampas de Iberia y está conformada por las lagunas Iberia, Sur, Mejía y Boquerón (ver Figura 5- 2).

15. El proyecto Tía María, al estar situado en la región Costa a una altitud entre 350 msnm a 1 050 msnm, y a aproximadamente 20 km del litoral marítimo del Pacífico Sur, posee un clima que está altamente influenciado por la acción de la corriente de Humboldt, de aguas frías. Según la clasificación climática de Köpen, al ámbito del proyecto le corresponde el tipo climático semi- cálido muy seco (desértico o árido subtropical). En la zona se registra una temperatura promedio anual entre los 18 y 19 °C (*Ausenco Perú SAC, 2013*).



<sup>2</sup>

Codificación establecida en la Resolución Ministerial N° 033-2008-AG, Aprueban Metodología de Codificación de Unidades Geográficas de Pfafstetter, Memoria Descriptiva y el Plano de Delimitación y Codificación de las Unidades Hidrográficas del Perú.

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

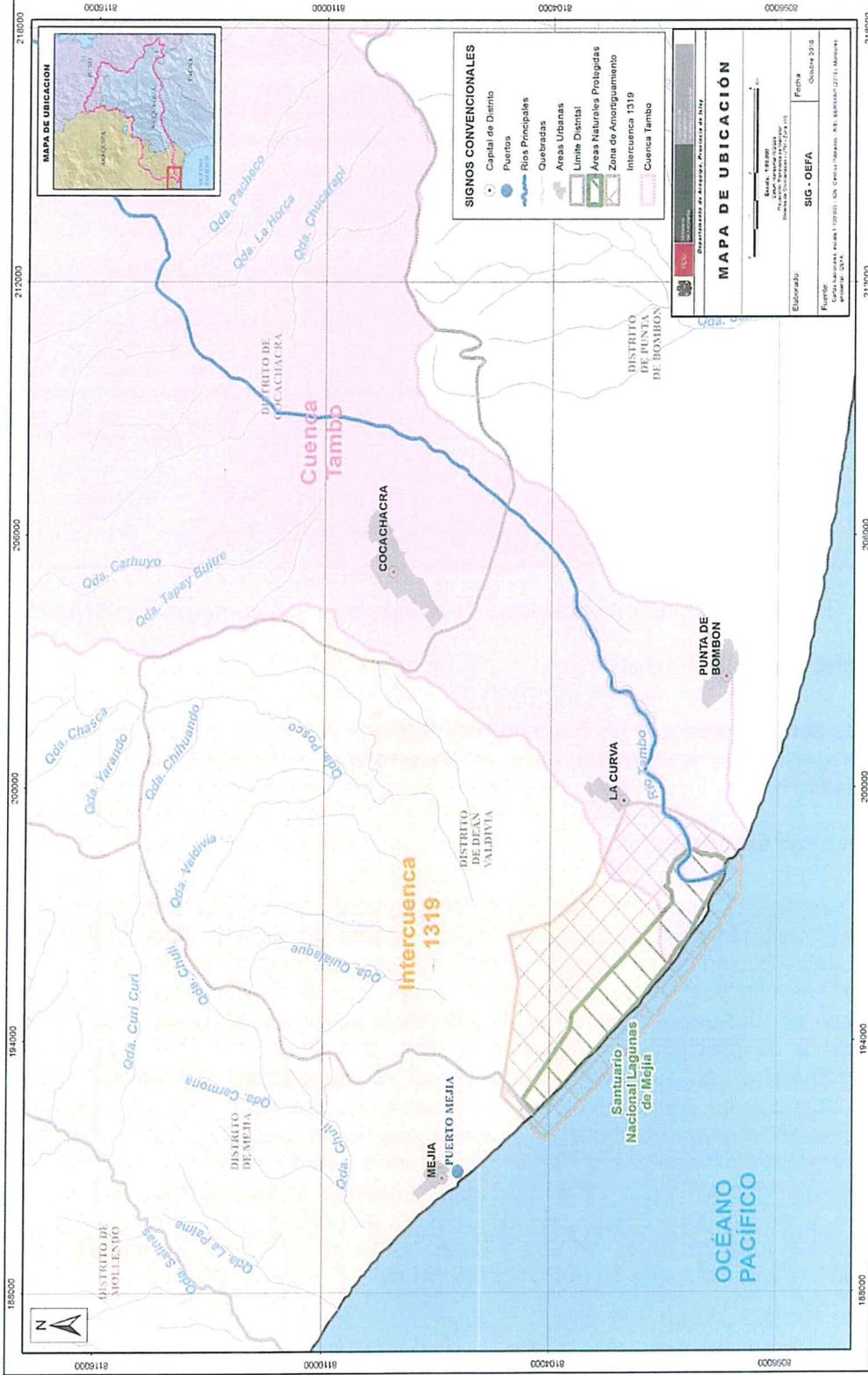
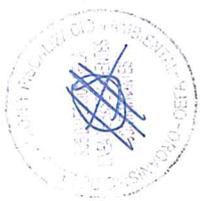


Figura 5- 1. Ubicación hidrográfica del Santuario Nacional Lagunas de Mejía.



Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

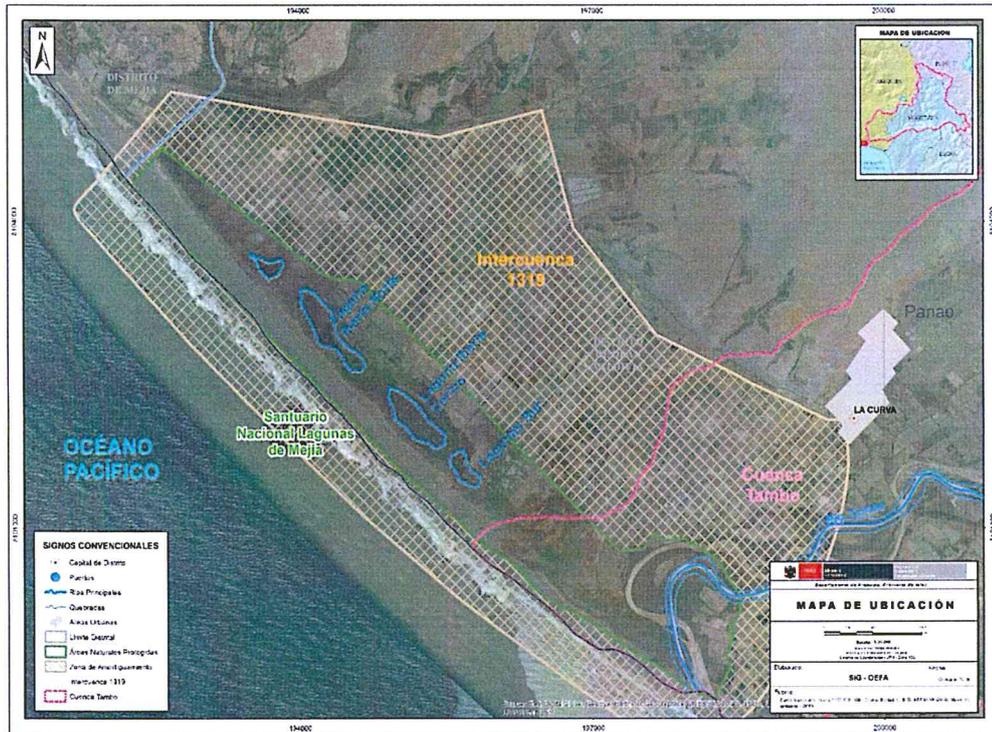


Figura 5- 2. Mapa de ubicación de las lagunas que conforman el SNLM.



6. MARCO CONTEXTUAL

Esta sección presenta los fundamentos teóricos y técnicos para la interpretación hidrogeológica, necesarios para el desarrollo y entendimiento del presente estudio.

6.1 El ciclo hidrológico

17. La circulación del agua a través del océano, la atmósfera y la tierra se le conoce como ciclo hidrológico; este se considera como un sistema abierto energizado por la radiación solar (Weight, 2004). El agua es evaporada del océano y de grandes cuerpos de agua, formando nubes que son arrastradas por el viento hacia los cuerpos continentales, dichas nubes se condensan gradualmente dando paso a la precipitación (lluvia o nieve), una parte de esta agua regresa directamente al océano por medio de la escorrentía superficial, otra es almacenada en capas de hielo en los glaciares, otra retorna a la atmósfera por medio de la evapotranspiración o sublimación y el resto se infiltra al subsuelo recargando los cuerpos de agua subterránea (ver Figura 6- 1). El 97 % de la cantidad total del agua en la tierra está contenida en los océanos; las capas de hielo y los glaciares contienen el 2 %; el agua subterránea contiene el 1 % de la cantidad total de agua; los ríos y lagos contienen el 0,009 %, mientras que el 0,001 % está presente en la atmósfera (Appelo & Postma, 2005).

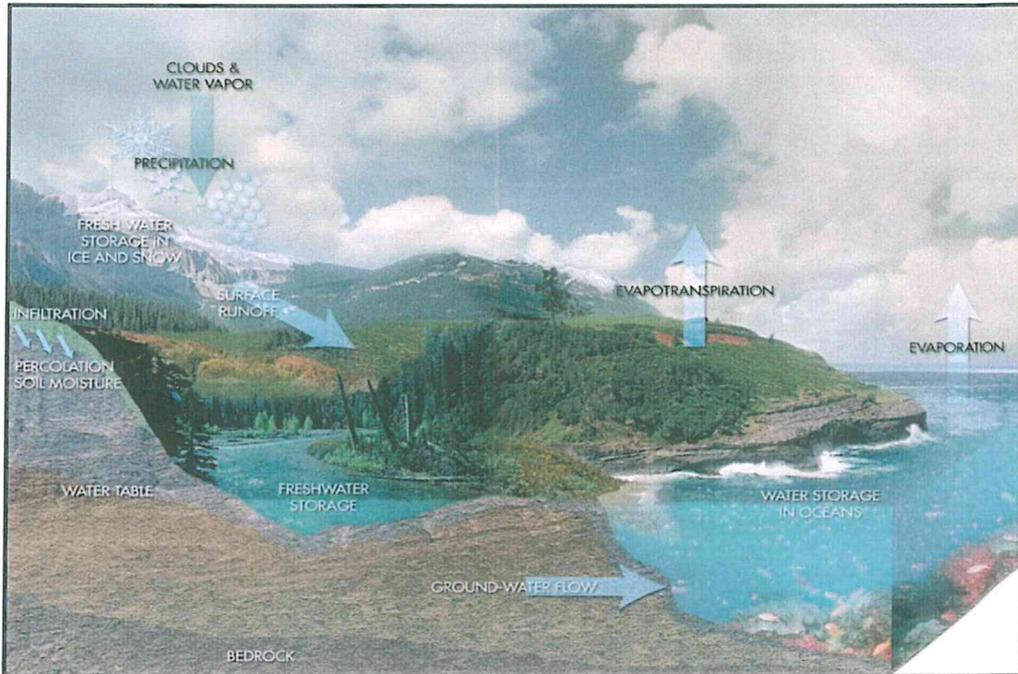


Figura 6- 1. Ciclo hidrológico del agua<sup>3</sup>, esta figura representa el movimiento continuo y cíclico del agua del agua en su estado sólido, líquido y vapor (1) Evaporación (2) Evapotranspiración (3) Precipitación (4) Infiltración.

## 6.2 El flujo de agua subterránea

18. Los estudios de flujo de agua subterránea se basan en la ley de Darcy, quien experimentó con un filtro de arena contenido en un tubo horizontal (ver Figura 6-2) y observó que la descarga ( $Q$ ) en un medio poroso es proporcional a la diferencia en la altura de agua o carga hidráulica ( $h$ ) entre los extremos, e inversamente proporcional a la longitud del flujo neto ( $L$ ), además el flujo también es proporcional a la sección transversal de la tubería ( $A$ ); la constante de proporcionalidad es la Conductividad Hidráulica ( $K$ ) (Fetter, 1980).

$$Q = -KA \left( \frac{h_a - h_b}{L} \right)$$

Dónde:

$Q$  = Flujo o caudal de salida ( $L^3/T$ ).

$K$  = Permeabilidad o Conductividad hidráulica ( $L/T$ ).

$A$  = Área transversal al flujo ( $L^2$ ).

$L$  = Distancia entre piezómetros ( $L$ ).

$(h_a - h_b)$  = Pérdida de Carga ( $L$ ).

<sup>3</sup>

Disponible en [http://www.csr.utexas.edu/grace/gallery/other/misc/water\\_cycle\\_sys.html](http://www.csr.utexas.edu/grace/gallery/other/misc/water_cycle_sys.html).

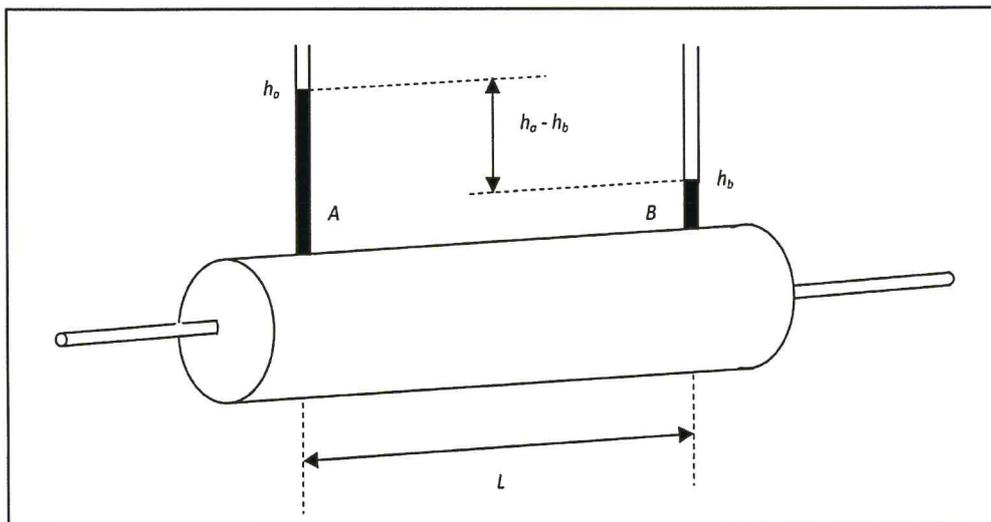


Figura 6- 2.Tubería horizontal llenada con arena para demostrar el experimento de Darcy

### 6.3 Parámetros hidrogeológicos

19. Los parámetros hidrogeológicos condicionan el movimiento y almacenamiento de las aguas subterráneas, las cuales son medibles principalmente en base a la porosidad y permeabilidad.

#### 6.3.1. Porosidad de los materiales

20. La porosidad es la propiedad de un material de almacenar agua, la misma que se define como "fracción de espacios vacíos que contiene un material sólido respecto al volumen total". Sin embargo, en los estudios hidrogeológicos, para conocer cómo se mueve el agua a través del acuífero, tiene más interés el término de «porosidad eficaz». Según la Unesco (2012), se define como la relación entre el volumen de agua que puede ser drenado por gravedad de un medio poroso inicialmente saturado y el volumen total del medio poroso. Por lo tanto, la porosidad eficaz no representa más que una porción pequeña de la porosidad total. Esta observación es importante puesto que las reservas útiles de un material acuífero están condicionados por la porosidad eficaz (Custodio & Llamas, 2001). En la Tabla 6- 1 se reportan los valores de porosidad total y eficaz de algunos materiales.

Tabla 6- 1. Valores estimados de la porosidad total y eficaz (%)

Materiales	Total	Eficaz
Arcillas	40 a 60	0 a 5
Limos	35 a 50	3 a 19
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50	10 a 28
Arena gruesa o bien clasificada	21 a 50	22 a 35
Grava	25 a 40	13 a 26

Fuente: Sanders & Arche.

**6.3.2. Permeabilidad de los materiales**

21. La permeabilidad es la capacidad de la roca o del terreno para transmitir agua. De acuerdo con Mook & Vries (2002), esta propiedad determina la relación entre la velocidad y el gradiente hidráulico, que da origen al flujo de agua a través de la roca o del medio sólido. El coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica se define como el caudal que pasa por una sección del acuífero bajo un gradiente a temperatura fija o determinada (Custodio & Llamas, 2001). Se representan valores de permeabilidad en función de la conductividad hidráulica para los diferentes tipos de rocas y materiales cuaternarios (ver Tabla 6- 2, Tabla 6- 3 y Tabla 6- 4).

**Tabla 6- 2.** Tabla convencional de permeabilidad expresada en magnitud de la permeabilidad (K)

Valores (m/día)	Permeabilidad										
	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	1	10	$10^2$	$10^3$	$10^4$
Calificación	Impermeable		Poco permeable		Algo permeable		Permeable		Muy permeable		
	Acuícludo		Acuífardo		Acuífero pobre		Acuífero medio a bueno		Acuífero		
Tipo de Materiales	Arcilla compacta Granito		Limo arenoso Limo Arcilla Limosa		Arena fina Arena limosa Caliza fracturada		Arena limpia Grava Arena fina		Grava limpia		

Fuente: Benítez, 1963

**Tabla 6- 3.** Valores de permeabilidad de terrenos naturales (no consolidados) establecidos.

Material	K (cm/s)	K(m/día)
Grava limpia	> 1	> 1000
Arena gruesa limpia	1 a $10^{-2}$	1000 a 10
Mezcla de arena	$10^{-2}$ a $5 \cdot 10^{-3}$	10 a 5
Arena fina	$5 \cdot 10^{-3}$ a $10^{-3}$	5 a 1
Arena limosa	$2 \cdot 10^{-4}$ a $10^{-4}$	2 a 0.1
Limo	$5 \cdot 10^{-4}$ a $10^{-5}$	0,5 a 0,001
Arcilla	$< 10^{-6}$	< 0,001

Fuente: Silin-Bekchurin.

**Tabla 6- 4.** Valores estimados de la conductividad hidráulica (metros /día)

Materiales		Domónico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Sedimentos	Grava	25 a 2500	$100$ a $10^5$	$100$ a $10^6$	10 a 1000	
	Grava con arena					
	Arena gruesa	0,1 a 500	$0,01$ a $1000$	1 a 1000	1 a 100	1 a 100
	Arena media	0,1a 50				
	Arena fina	0,02a 20			0,01 a 1	0,01 a 1
	Arena arcillosa			0,01 a 100	0,001 a 0,1	
	Silt, loess	$10^{-4}$ a 2	$10^{-4}$ a 1	$10^{-4}$ a 1	0,001 a 0,1	$10^{-4}$ a 1
	Arcilla	$10^{-6}$ a $4 \cdot 10^{-4}$	$10^{-7}$ a $10^{-3}$		$10^{-6}$ a $10^{-3}$	$10^{-6}$ a $10^{-3}$
	Arcilla marina Inalterada	$10^{-7}$ a $2 \cdot 10^{-4}$		$10^{-11}$ a $10^{-7}$		

Materiales		Doméxico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Rocas Sedimentarias	Calizas carstificadas	0,1 a 2000	0,05 a 0,5	0,1 a 1000		0,1 a 10 <sup>7</sup>
	Calizas, dolomías	10 <sup>-4</sup> a 0,5	0,001 a 0,5	10 <sup>-4</sup> a 1		10 <sup>-4</sup> a 1
	Areniscas	3*10 <sup>-5</sup> a 0,5	10 <sup>-5</sup> a 1	10 <sup>-5</sup> a 1		
	Argilitas (siltstone)	10 <sup>-6</sup> a 0,001				
	Pizarras sedimentarias (Shale) intactas	10 <sup>-8</sup> a 2*10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-8</sup> a 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-8</sup>		10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-8</sup>
	Pizarras sed. (Shale) fracturadas/alteradas		10 <sup>-4</sup> a 1			
Rocas cristalinas	Basalto inalterado, sin fracturar		10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-3</sup>			10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-3</sup>
	Basalto fracturado/vesicular cuaternario		10 a 1000			0,1 a 10 <sup>6</sup>
	Escorias basálticas		0,001 a 1000			
	Basalto permeable	0,03 s 2000		0,02 a 1000		
	Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	10 <sup>-9</sup> a 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-9</sup> a 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-9</sup> a 10 <sup>-5</sup>		10 <sup>-9</sup> a 10 <sup>-5</sup>
	Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	0,001 a 25	10 <sup>-5</sup> a 1	0,0005 a 20		10 <sup>-5</sup> a 1
	Granito alterado	0,3 a 5				
	Gabro alterado	0,05 a 0,3				

Fuente: Adaptación de varios autores

#### 6.4 Unidades hidrogeológicas

22. Las unidades hidrogeológicas se clasifican de acuerdo a la capacidad de los materiales para almacenar y transmitir el agua subterránea. Por otro lado, las condiciones de movimiento están restringidos a la gradiente hidráulica, litología, morfología, estructuras geológicas (fallas y fracturas), además de su recarga y descarga (ver Figura 6- 3). A continuación, se describen las unidades hidrogeológicas según el tipo de materiales.

##### a) Acuífero:

23. Son formaciones geológicas capaces de almacenar y transmitir aguas subterráneas, bajo un gradiente hidráulico. Buenos acuíferos usualmente se desarrollan en formaciones con contenido de arena, grava y rocas fracturadas

##### b) Acuitardo:

24. Formación geológica de baja permeabilidad, que almacena agua pero lo transmiten lentamente, pero es considerable en términos de flujos regionales. Las arcillas limosas o arenosas pueden servir como ejemplo de este tipo de unidad.

**c) Acuícludo:**

25. Formación geológica que contiene agua subterránea, incluso hasta la saturación, no tiene la capacidad de transmitir agua. Los limos y las arcillas son característicos de este tipo de unidades.

**d) Acuífugo:**

26. Formación geológica impermeable que no almacena ni transmite agua subterránea. Los tipos de rocas característicos de estas unidades son los granitos o esquistos inalterados y no fracturados



Figura 6- 3. Sistema hidrogeológico, donde se identifican las unidades hidrogeológicas (IGME en Sulca, 2010)

27. Por otro lado, cabe mencionar que los acuíferos se clasifican según el tipo de textura y porosidad (Kresic, 2009), así como por su presión hidrostática (ver Figura 6- 4).

**a) Según la textura y porosidad**

- **Acuíferos Porosos no consolidados:** denominados también acuíferos detríticos, están formados por materiales aluviales principalmente.
- **Acuíferos Kársticos:** Corresponden a acuíferos en rocas carbonatadas (caliza o dolomías), estos acuíferos se originan por procesos de karstificación o disolución de materiales calcáreos.
- **Acuíferos Fisurados:** Formación geológica afectadas por procesos mecánicos, donde la circulación del agua se produce por fisuras y fallas geológicas. Este tipo de rocas lo conforman principalmente de areniscas y lavas andesíticas, dacíticas y basálticas.

## b) Según la presión hidrostática

- **Acuíferos libres:** También llamados no confinados o freáticos, estos acuíferos se encuentran en contacto directo con la superficie del terreno, donde la superficie freática se encuentra sometida a la presión atmosférica.
- **Acuíferos confinados** (o acuífero cautivo): corresponden a formaciones geológicas permeables completamente saturadas de agua, confinadas entre dos capas o estratos que podemos asumirlo como impermeables, ya sea acuícludos o acuífugos. Al perforar este acuífero, la superficie piezométrica está por encima del nivel freático.
- **Acuíferos semiconfinados:** corresponden a situaciones similares a los de acuíferos confinados, pero con la particularidad de que el estrato confinante corresponde a un acuitardo, en lugar de un acuífugo o acuícludo (teóricamente). Por la tanto, los acuíferos semiconfinados pueden recibir una cierta recarga.



Handwritten signature and initials in blue ink.

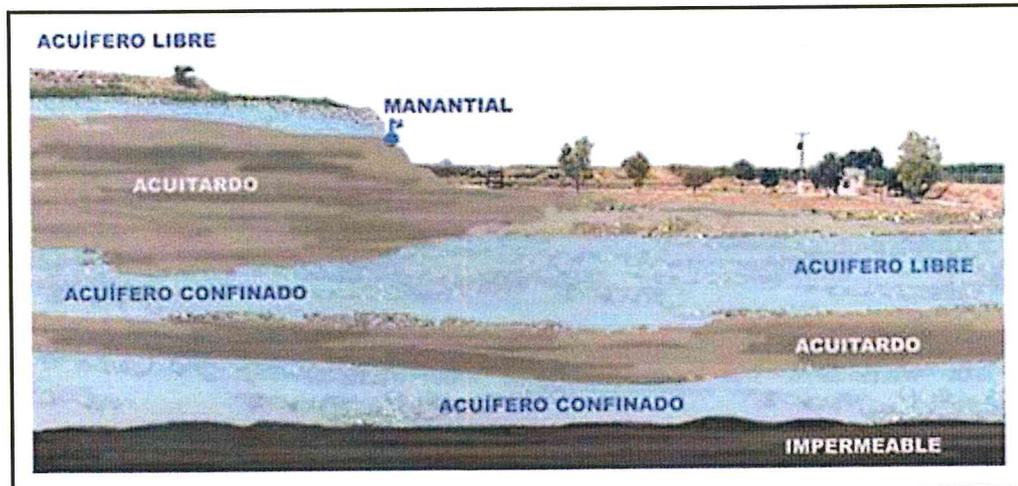


Figura 6- 4. Clasificación de los tipos acuífero desde el punto de vista hidráulico (IGME en Sulca, 2010)

## 6.5 Sistema de flujos de aguas subterráneas

28. Los parámetros que rigen el funcionamiento del agua subterránea bajo el efecto gravitacional son el clima, la topografía y el referente geológico (Tóth, 2000). Éstos permiten la formación de tres sistemas generales de flujo: local, intermedio y regional, en los que el tiempo de residencia del agua subterránea es de menor a mayor, respectivamente (ver Figura 6- 5). Cada flujo presentan su zona de recarga, tránsito y descarga particular. Comparando la respuesta físico-química de un flujo local con uno regional, el último presenta mayor profundidad y distancia de recorrido lo que le permite tener mayor interacción agua-roca; por tal razón, el agua en su zona de descarga presenta mayor temperatura, menor contenido de oxígeno disuelto, mayor salinidad y pH más alcalino.

### 6.5.1 Sistema de flujos locales

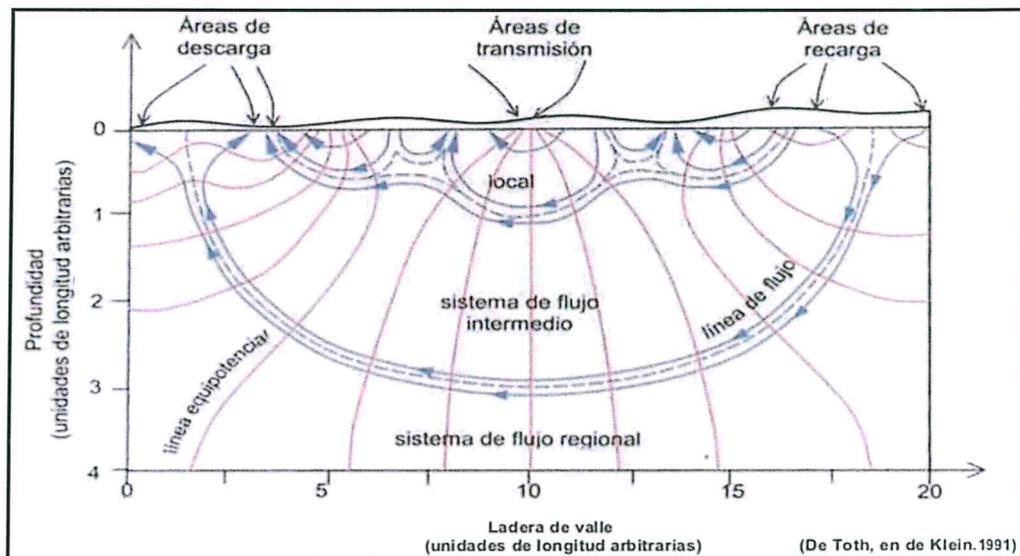
29. Corresponden a sistemas de corto tránsito por ende de corto tiempo de residencia de las aguas subterráneas en una unidad hidrogeológica (meses), son recargados en la parte alta de una topografía local y esta descarga en los lados adyacentes, baja salinidad y de descarga estacionales.

### 6.5.2 Sistema de flujos intermedios

30. Presentan áreas de recarga y descarga separadas, por una o más elevaciones topográficas y bajas. Se caracterizan por el incremento de las sales en el agua subterránea y mayor tiempo de residencia de los flujos que los sistemas locales. La descarga a partir de la infiltración podría demorar décadas o siglos.

### 6.5.3 Sistema de flujos regionales

31. Las áreas de recarga abarcan hasta la línea divisoria de una cuenca y el área de descarga abarca hasta los valles más bajos, se caracterizan por presentar mayor salinidad debido al mayor tiempo de residencia del agua en el acuífero, la descarga a partir de la infiltración podría demorar en milenios o en millones de años.



**Figura 6- 5.** Sistema de flujos de agua subterránea, donde se aprecian el flujo local, intermedio y regional, en relación a la profundidad y tiempo de recorrido; tomado de Tóth (2000).

## 6.6 Composición química del agua subterránea

32. La composición química del agua inicia a través del ciclo hidrológico, donde se incorporan al agua un conjunto de sustancias generalmente inorgánicas. La incorporación de los constituyentes al agua es debida a su elevado poder disolvente y a sus propiedades de combinación. Esta disolución comienza incluso antes de que se incorpore al sistema de flujo subterráneo propio de cada acuífero. Gases, aerosoles, polvo y sales diversas, presentes en la atmósfera, reaccionan con el agua marcando el primer esbozo del quimismo del agua de

infiltración. Una vez infiltrada el agua con sus características químicas, el agua interactúa con el medio geológico determinando a si la evolución de su quimismo, esta evolución está condicionada a diferentes factores como la naturaleza y disposición espacial de los materiales, superficie y duración del contacto, temperatura, presión, gases y grado de saturación del agua en relación con las distintas sustancias incorporables, etc. Finalmente esta concentración del agua se determinará en la cantidad de iones disueltos que esta posee.

33. Los iones disueltos en las aguas subterráneas se suelen dividir en mayoritarios, minoritarios y trazas. Los iones mayoritarios son cloruro, bicarbonato, sulfato, calcio, magnesio, sodio y potasio. Eventualmente el nitrato puede ser mayoritario aunque raramente es de origen natural. Los iones minoritarios son aquellos que se encuentran habitualmente formando menos del 1% del contenido iónico total. Los más importantes son: bromuro, yoduro, sílice, litio, estroncio, fosfato, nitrito, hierro, manganeso, aluminio, amonio, sulfuro y fluoruro. Los elementos traza se encuentran en cantidades inferiores como plomo, cromo, cobre, cobalto, titanio, etc.

### 6.7 Conceptos básicos de Geofísica

34. El presente apartado está dirigido a la presentación de los aspectos teóricos más importantes relacionados con el estudio geofísico mediante el método de tomografía geoelectrica, esto con el fin de facilitar la comprensión de los resultados obtenidos en el presente estudio

#### 6.7.1 Propiedades físicas geoelectricas

35. Los métodos geofísicos se basan en la medición de campos naturales y artificiales que están influenciados por la distribución de rocas que tienen propiedades físicas diferentes. El conocimiento de las propiedades físicas de los distintos tipos de roca y minerales es un prerequisite para la interpretación exitosa de técnicas geofísicas. Otro requisito es que exista un contraste suficientemente fuerte entre las propiedades físicas del objeto buscado y las de las rocas que lo contienen (Geuna, 2013).

#### 6.7.2 Resistividad y conductividad

36. La ley de Ohm, que se aplica normalmente a los circuitos eléctricos, explica el principio físico en el que se basan todos los métodos geoelectricos:

$$\Delta V = R \cdot I \quad (1.1)$$

Dónde:

$\Delta V$  = es la diferencia de potencial (en voltios)

$R$  = es la resistencia eléctrica (en Ohmios.metro)

$I$  = es la corriente (en amperios)

La resistencia es la relación del voltaje sobre la corriente:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (1.2)$$

37. La resistencia no nos dice nada sobre las dimensiones y la naturaleza del material a través del cual la corriente circula. Para describir la propiedad física de un medio tridimensional, se debe introducir el concepto de resistividad. La resistencia de un medio varía linealmente con la longitud "L" del medio atravesado y de manera inversamente proporcional al área "A" de la superficie atravesada (ver. Figura 6- 6)

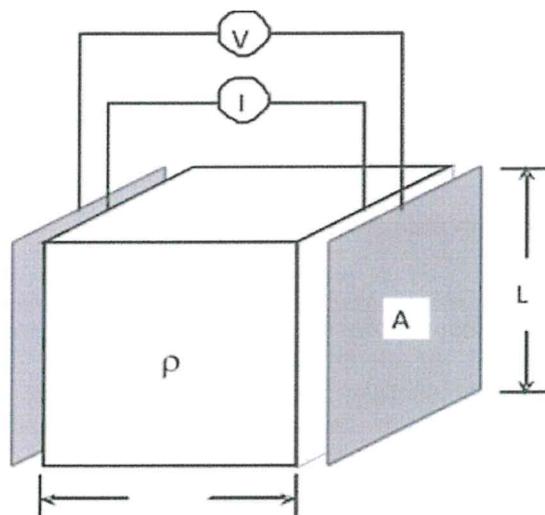


Figura 6- 6. Esquema de la resistividad de un medio

\* $\rho$  es la resistencia R por unidad de volumen.

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (1.3)$$

Dónde:

$\rho$  = es la constante de proporcionalidad de la resistividad "Rho".

Esto nos muestra la dificultad de la corriente en atravesar el medio:

$$R = R \cdot \frac{A}{L} = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{A}{L} \quad (\Omega - m) \quad (1.4)$$

La conductividad es la inversa de la resistividad:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (\text{mho/m}) \text{ Siemens} \quad (1.5)$$

38. La resistividad es la oposición que ofrecen los cuerpos al paso de la corriente eléctrica. En geofísica, el concepto de resistividad aparente es frecuentemente utilizado. Esta no necesariamente es representativa de los valores de resistividad intrínseca de algunos de los elementos constituyentes del suelo, ni de un simple promedio de estos, constituye un medio de normalización de medidas en función de la geometría del sistema de medición. La resistividad aparente está definida por:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \cdot K (\Omega - m) \quad (1.6)$$

Dónde:

K = es el factor geométrico de la configuración de electrodos utilizado.

39. La relación entre la resistividad aparente y la resistividad verdadera, es una relación compleja. Para determinar la resistividad verdadera del subsuelo a partir de los valores de la resistividad aparente, se aplica la técnica de la "inversión" (Loke, 2004), generando así imágenes del subsuelo representados por los valores de resistividad verdadera de las diferentes zonas o estructuras del subsuelo.

### 6.7.3 Conductividad electrolítica y porosidad

- 
40. Se distingue en los minerales y en las rocas dos clases de conductividad: i) la metálica o electrónica, la misma que posee ciertos minerales que conducen electricidad a través de electrones y ii) la conductividad electrolítica la que conduce corriente eléctrica siempre y cuando el material contenga agua, en este caso existe transporte de iones con el paso de la corriente y en función de la cantidad de sales ionizadas disueltas en ellas.

- 
41. Los materiales geológicos que constituyen el subsuelo se caracterizan por presentar unos valores de resistividad eléctrica en función a: i) la composición litológica de las partículas minerales, ii) la porosidad, iii) el contenido de agua y sales en ella. En estas condiciones la resistividad aparente de la roca se relaciona directamente con la resistividad eléctrica del fluido contenido en sus poros a través de la ecuación de Archie mediante el denominado factor de formación, de la siguiente forma: (Busquet et al., 1996):

$$\rho_a = F \rho_w \quad (1.7)$$

Dónde:

$\rho_a$  = es la resistividad aparente global del terreno

$F$  = es la resistividad aparente del fluido contenido en los poros

$\rho_w$  = es el factor de formación de una roca y depende a su vez de:

$$F = a \varphi^{-m} S^{-2} \quad (1.8)$$

Dónde:

$\varphi$  = es la porosidad

$S$  = es el grado de saturación de los poros

$a$  Y  $m$  son constantes empíricas que dependen de la textura de la roca

42. En depósitos no consolidados, la resistividad aumenta si se incrementa el tamaño de la granulometría predominante, pero en todos los casos, la resistividad en las rocas disminuye dependiendo el contenido de agua mineralizada en sus poros. (E. Custodio / M. R. Llamas, 2001).
43. Los depósitos no consolidados se refieren a fragmentos de roca y granos de minerales que varían desde fracciones de milímetros (tales como arcillas, limos y arenas finas) hasta varios decímetros. (E. Custodio / M. R. Llamas, 2001).

44. Al contrario, las rocas consolidadas (comúnmente llamadas "roca fresca") consisten en partículas minerales que han sido litificadas por el calor y la presión, o han sido cementados por reacciones químicas y precipitación de sustancias disueltas dentro de la masa sólida. (E. Custodio / M. R. Llamas, 2001).
45. Las resistividades de las capas de sedimentos pueden ser relacionadas con la naturaleza u origen de las mismas, además de ello, en caso que se trate de sedimentos no consolidados, la resistividad puede estar relacionada al contenido de agua en sus poros o fracturas, al contenido salino del agua y al tamaño de los granos de los depósitos. (E. Custodio / M. R. Llamas, 2001).
46. La mayoría de minerales formadores de rocas son aislantes (silicatos, carbonatos, etc.), estos minerales son considerados dieléctricos, es decir tienen unos valores de resistividad eléctrica muy elevados.
47. En estas condiciones la resistividad aparente depende esencialmente de la porosidad y de la conductividad de fluidos contenidos en sus poros, condicionados en parte por procesos geológicos.
48. Las rocas de una misma génesis presentan valores de resistividad que varían dentro de ciertos rangos típicos, lo que permite caracterizarlas. La Tabla 6- 5 muestra las resistividades de algunos medios o tipos de materiales.

**Tabla 6- 5.** Valores de resistividad de algunos materiales en ohmios.metro

Tipo de agua y roca	Resistividad ( $\Omega.m$ )
Aguas subterráneas en granito y roca hipogénica	20 - 100
Aguas subterráneas en caliza y acarreos	20 - 50
Aguas salobres	1 - 10
Aguas potables superficiales	20 - 300
Agua del mar	menor de 0,2
Agua destilada	mayor de 500
Arcillas y margas	10 - 100
Calizas y areniscas	50 - 3 000
Pizarras	50 - 300
Rocas hipogénicas y metamórficas	100 - 10 000
Gravas	100 - 10 000
Arenas	130 - 1 000
Limos	30 - 500

Fuente: E. Custodio / M. R. Llamas, 2001.

## 7. METODOLOGÍA

49. Para llevar a cabo la evaluación hidrogeológica, fue necesario utilizar información geológica, hidrogeológica, hidroquímicas e isotópica. A continuación se describen cada metodología utilizada.

### 7.1 Información geológica

50. Los datos geológicos fueron obtenidos del mapeo realizado por el OEFA en las salidas de campo a una escala 1:50 000 y complementados con la siguiente

información estudio hidrogeológico de Proyecto Tía María realizado por Ausenco Perú SAC para Souther Perú Copper Corporation, de donde se obtuvo información de la estratigrafía local de la perforación de 8 piezómetros y finalmente de los cuadrángulos geológicos de Punta Bombon (35-s) y Clemesi (35-t) de la Carta Geológica Nacional a Escala 1: 100 000, realizados por Ingemmet.

51. Con el mapeo y la información existente se obtuvo el mapa geológico (ver Anexo 1 – Mapa 1.1). Este fue procesado utilizando el programa ArcGis para obtener el mapa y modelo geológico correspondiente.

## 7.2 Información hidrogeológica

52. La información hidrogeológica se obtuvo en base a los resultados obtenidos del mapa geológico, mapeo hidrogeológico y ensayos infiltración por el método realizados. Asimismo se obtuvo información adicional sobre resultados de pruebas de permeabilidad, niveles piezométricos, ubicación de piezómetros, entre otros, del estudio hidrogeológico realizado por Ausenco Perú SAC en el proyecto Tía María.

### 7.2.1 Pruebas de permeabilidad (K) por el método de Lefrang

53. El ensayo de Lefrang, consiste en provocar la infiltración puntual de agua sobre el subsuelo, bajo una carga determinada. Para ello se utiliza un tubo de diámetro fijo (permeámetro) introducido en el subsuelo (fractura o poros que se pretende medir). Asimismo, se vierte un volumen de agua en el permeámetro, la misma que será absorbida o infiltrada generando un descenso en función de la carga (caudal) y del tiempo (ver Figura 7- 1).

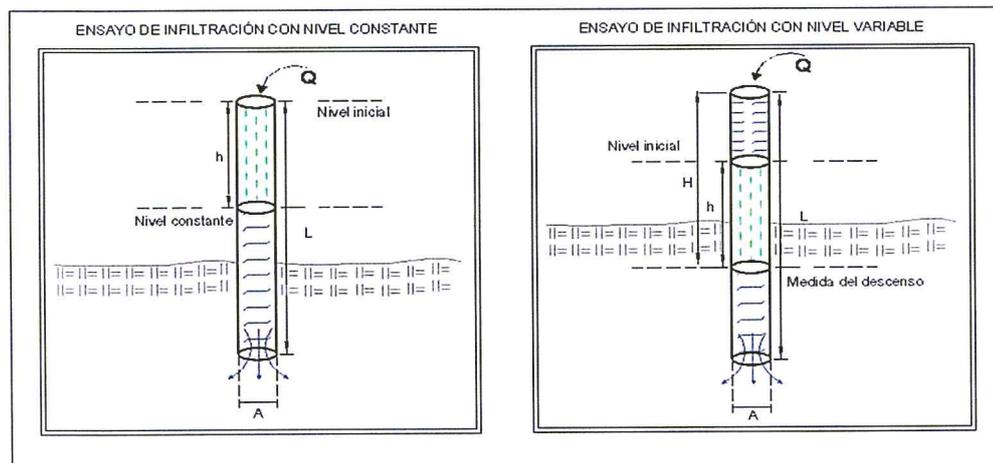


Figura 7- 1. Esquema de ensayos de infiltración con carga constante y carga variable respectivamente.

54. La variación que se tiene con este tipo de ensayos es que el coeficiente de permeabilidad varía con la heterogeneidad de la roca, la profundidad de penetración del tubo, el lugar específico donde se realizó el ensayo (sobre suelo o sobre afloramiento rocoso), el número de ensayos efectuados y el método aplicado (carga constante y carga variable). Los ensayos de infiltración tienen dos métodos de cálculo.

55. El primer método es por permeámetros de carga constante (ver Figura 7- 2). El principio de este método consiste en hacer pasar a través de una longitud dada, «L» (longitud del permeámetro), un cierto volumen de agua «Q», durante un tiempo determinado «t». Conociendo la altura de la carga de agua «h», y la sección «A» de la muestra (diámetro del tubo), el coeficiente de permeabilidad de Darcy o conductividad hidráulica «K» se obtiene por esta expresión (Castany, 1975).

$$K = \frac{QL}{At h}$$

56. El segundo es método es el de permeámetros de carga variable. En este caso, un volumen determinado de agua «dQ» pasa a través del permeámetro de longitud «L» y de sección «A», en un intervalo de tiempo «dt», bajo una carga  $h_0 - h = dh$ . Según la ley de Darcy, se obtiene por la siguiente expresión (Castany, 1975).

$$K = \frac{dQ L}{A dt dh}$$



Figura 7- 2. Ensayo de infiltración por carga constante realizado en depósitos marinos ubicado en el Santuario Lagunas de Mejía.

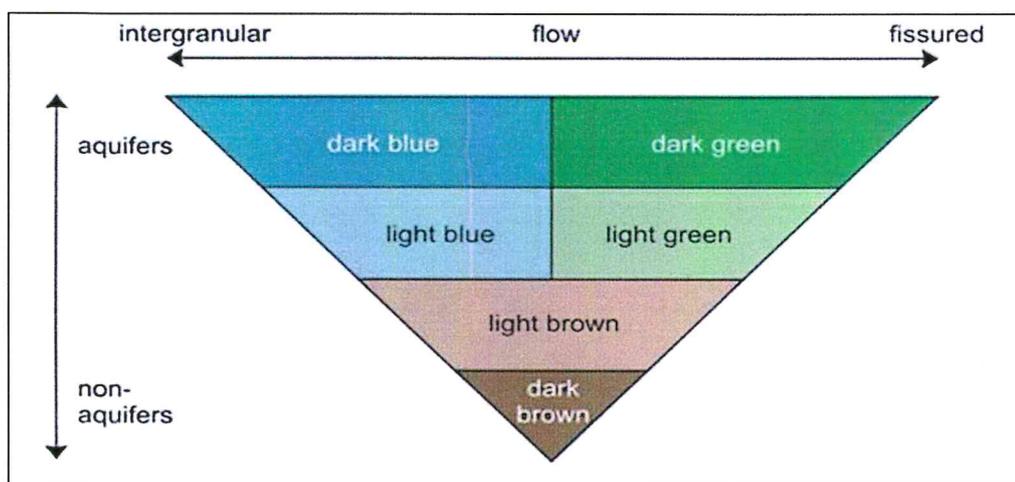
57. En los ensayos realizados en el acuífero Mejía se utilizó el método de carga constante y para calcular los valores de conductividad hidráulica se utilizó el software Aqtesolv 4.5.

### 7.2.2 Caracterización hidrogeológica

58. El mapa hidrogeológico parte de la caracterización hidrogeológica sobre la base del cartografiado geológico y se complementa con los resultados de parámetros

hidrogeológicos de permeabilidad y porosidad, manifestaciones de aguas subterráneas, condiciones de descarga e información climática (precipitación pluvial). Estos parámetros permiten elaborar el mapa hidrogeológico, zonificando las rocas y suelos con características de almacenamiento y circulación de aguas subterráneas, además de rocas con características poco permeables.

59. Para la elaboración del mapa hidrogeológico se consideró las recomendaciones establecidas en el manual para la elaboración de mapas hidrogeológicos de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH), (*Struckmeier y Margat, 1995*). En la Figura 7- 3 se presenta los colores establecidos para la elaboración de mapas hidrogeológicos. Los colores celestes representan acuíferos de tipo acuíferos porosos no consolidados o acuíferos fisurados, los colores verdes representan acuíferos de tipo fisurados sedimentarios y/o kársticos, el color morado en tonos más claros representa los acuíferos fisurados volcánico-sedimentarios y los tonos más oscuros representa a los fisurados volcánicos y el color marrón representa formaciones impermeables o de baja permeabilidad.



Fuente: Struckmeier y Margat, 1995

Figura 7- 3. Representación internacional de colores para sistemas acuíferos

### 7.3 Datos hidroquímicos

60. La base de datos presenta 38 fuentes con datos químicos y parámetros de campo, de los cuales este mismo número se utilizara para el análisis de parámetros de campo (pH, T° y CE) y 31 fuentes para análisis hidroquímico (ver Anexo 3).
61. Los análisis químicos se obtuvieron a partir de 31 muestras de agua distribuidas en 22 fuentes de agua superficial de las lagunas de Mejía y río Tambo, 8 corresponden a piezómetros ubicados en el proyecto Tía María y un punto corresponde agua de mar. Cabe señalar que no se tomó para el análisis hidroquímico 7 muestras que corresponden a los códigos AG-84, AG-85, AG-86, AG-87, AM-02 AM-04 y AM-05 por no presentar datos de concentración de cloruros.
62. Las muestras para análisis químico fueron obtenidas durante una salida de campo realizado en el mes mayo del 2016 que corresponde a una época de

estiaje. Se midieron parámetros de campo como: conductividad eléctrica, pH, Temperatura y oxígeno disuelto en cada punto de muestreo.

63. Para los análisis isotópicos se tomaron 8 fuentes de agua subterránea que corresponden a piezómetros ubicados en el proyecto Tía María y un valor que corresponde a la composición isotópica promedio del agua de mar del océano pacífico obtenida del estudio denominado "Los Isótopos Ambientales en el Estudio de la Intrusión Marina" realizado por el Organismo Internacional de la Energía Atómica Viena, 1988.
64. La medición de los parámetros de campo fue realizada para conocer las características in situ de las aguas superficiales en el área de estudio y para conocer en alguna medida las tendencias de la misma que ayudaran en la interpretación de los resultados. Las muestras para análisis químico se utilizaron para caracterizar químicamente las aguas, su evolución en su paso a través de la roca y alguna influencia del medio con el que han interactuado. Los análisis de isótopos ambientales fueron utilizados para conocer las principales fuentes de recarga del agua subterránea y la posible interacción agua-roca.

### 7.3.1 Balance iónico (B.I)

65. Se inicia con el control de calidad de los resultados reportados por el laboratorio, el cual consiste 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 (Arnórsson, 2000). Según Nordstrom *et al.* (2008) el B.I está comprendido entre -20 % y +20 %, donde los valores que superan este rango no deberían ser considerados. El balance iónico se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$B.I = 100 * \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}}$$

66. Se calculó el B.I de los 31 puntos de muestreo, donde solamente el punto SA-01 presenta un B.I de 21,3 %, por lo cual debió ser descartado. Sin embargo, debido a las altas concentraciones en cloruros (13279.0 mg/L) y sodio (4997.0 mg/L) que presento dicho punto es que se consideró incluirlo en el análisis hidroquímico (ver Tabla 7- 1). Posterior a ello se procesó la información, teniendo como primer resultado la base de datos, del mismo que se obtendrá análisis de relaciones binarias de los elementos, diagramas químicos, mapas hidroquímicos y entre otros, lo cual nos proporcionara información para caracterizar las aguas subterráneas



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

Tabla 7- 1. Balance iónico de fuentes de agua superficial y subterránea del área de estudio

Punto de muestreo	Cationes mg/l					Aniones mg/l					Cationes meq/l					Aniones meq/l					B.I	
	Ca2+	Mg2+	K+	Na+	Σ cat	HCO3-	Cl-	SO42-	NO3-	Σ an	Ca2+	Mg2+	K+	Na+	Σ cat	HCO3-	Cl-	SO42-	NO3-	Σ an	%	%
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/l	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l	meq/l		
AG-88	627,00	337,10	50,59	856,10	1870,79	108,50	2317,00	653,00	26,31	3104,81	31,29	27,74	1,29	37,24	97,56	1,78	65,35	13,60	0,42	81,15	-9,18	
AG-89	119,40	26,35	21,32	346,60	513,67	170,00	622,50	242,40	0,54	1035,44	5,96	2,17	0,55	15,08	23,75	2,79	17,56	5,05	0,01	25,40	3,36	
AG-90	116,40	26,75	22,18	347,50	512,83	145,80	505,00	273,50	0,39	924,69	5,81	2,20	0,57	15,12	23,69	2,39	14,24	5,69	0,01	22,34	-2,95	
AG-91	130,90	30,38	25,17	382,50	568,95	184,70	687,50	220,70	0,65	1073,55	6,53	2,50	0,84	16,64	26,31	3,03	18,83	4,60	0,01	28,46	0,28	
AG-92	130,20	58,96	63,55	906,60	1159,31	370,20	1152,00	622,20	0,05	2144,45	6,50	4,85	1,63	39,43	52,41	6,07	32,49	12,95	0,00	51,52	-0,86	
AG-93	131,10	59,06	62,50	871,60	1124,26	372,40	1162,00	597,60	0,05	2132,05	6,54	4,86	1,60	37,91	50,91	6,10	32,78	12,44	0,00	51,32	0,40	
AG-94	140,20	63,32	68,51	903,00	1175,03	436,90	1232,00	488,40	0,05	2157,35	7,00	5,21	1,75	39,28	53,24	7,16	34,75	10,17	0,00	52,08	-1,10	
AG-95	148,30	64,55	70,33	875,50	1158,68	431,70	1172,00	394,40	0,05	1998,15	7,40	5,31	1,80	38,08	52,59	7,08	33,06	8,21	0,00	48,35	-4,21	
AG-96	142,10	62,54	70,45	832,40	1107,49	426,10	1252,00	518,30	0,05	2196,45	7,09	5,15	1,80	36,21	50,25	6,99	35,31	10,79	0,00	53,09	2,75	
AG-97	169,60	77,04	71,35	590,70	908,69	274,50	1222,00	632,70	0,05	2129,25	8,46	6,34	1,82	25,69	42,32	4,50	34,47	13,17	0,00	52,14	10,40	
AG-98	123,50	63,15	67,66	878,20	1132,51	282,90	1272,00	562,10	0,05	2117,05	6,16	5,20	1,73	38,20	51,29	4,64	35,88	11,70	0,00	52,22	0,90	
AG-99	107,20	72,42	73,59	1000,00	1253,21	207,60	1970,00	772,20	0,05	2949,85	5,35	5,96	1,88	43,50	56,69	3,40	55,57	16,08	0,00	75,05	13,94	
AG-100	106,70	74,47	71,10	943,40	1195,67	93,90	1472,00	632,80	0,05	2196,75	5,32	6,13	1,82	41,04	54,31	1,54	41,52	13,18	0,00	56,24	1,75	
AG-101	106,20	70,66	73,53	1025,00	1275,59	198,40	1332,00	737,20	0,05	2267,65	5,30	5,83	1,88	44,58	57,60	3,25	37,57	15,35	0,00	56,17	-1,25	
AG-102	79,25	64,34	66,51	924,00	1134,10	99,70	1282,00	742,80	0,05	2124,55	3,95	5,29	1,70	40,19	51,14	1,63	36,16	15,47	0,00	53,26	2,03	
AG-103	86,57	65,76	68,77	968,70	1189,80	134,50	1282,00	401,20	0,14	1817,84	4,32	5,41	1,76	42,14	53,63	2,20	36,16	8,35	0,00	46,72	-6,88	
AG-104	77,32	57,45	71,79	890,00	1096,56	217,10	1342,00	555,80	0,05	2114,95	3,86	4,73	1,84	38,71	49,13	3,56	37,85	11,57	0,00	52,98	3,77	
AG-105	82,77	64,99	70,15	942,40	1160,31	101,40	1472,00	657,00	0,05	2230,45	4,13	5,35	1,79	40,99	52,26	1,66	41,52	13,68	0,00	56,86	4,21	
AG-106	126,60	86,56	88,43	1154,00	1455,59	437,80	2430,00	498,90	0,12	3366,82	6,32	7,12	2,26	50,20	65,90	7,18	68,54	10,39	0,00	86,11	13,30	
AG-107	171,10	139,50	132,60	1678,00	2121,20	568,30	2816,00	711,70	0,16	4096,16	8,54	11,48	3,39	72,99	96,40	9,32	79,43	14,82	0,00	103,57	3,59	
AG-108	143,10	143,20	160,40	1982,00	2428,70	583,90	2916,00	848,50	0,23	4348,63	7,14	11,78	4,10	86,21	109,24	9,57	82,25	17,67	0,00	109,49	0,12	
AG-109	603,30	315,80	58,70	1020,00	1997,80	7,10	2627,00	864,30	25,53	3523,93	30,10	25,99	1,50	44,37	101,96	0,12	74,10	18,00	0,41	92,62	-4,80	
AM-L	395,60	1181,30	380,10	9127,40	11084,40	149,00	18702,00	2301,00	-	21152,00	19,74	97,21	9,72	397,02	523,68	2,44	527,52	47,91	-	577,87	4,92	
PZ-1	511,00	134,00	134,00	654,00	1433,00	138,00	1647,00	1851,00	-	3636,00	25,50	11,03	3,43	28,45	68,40	2,26	46,46	38,54	-	87,26	12,11	
PZ-2	623,00	110,00	110,00	621,00	1464,00	145,00	1614,00	1589,00	-	3348,00	31,09	9,05	2,81	27,01	69,96	2,38	45,53	33,08	-	80,99	7,30	
PZ-3	578,00	146,00	146,00	683,00	1553,00	111,00	1939,00	1689,00	-	3739,00	28,84	12,01	3,73	29,71	74,30	1,82	54,69	35,17	-	91,68	10,47	
PZ-4	722,00	209,00	209,00	854,00	1994,00	143,00	2153,00	1628,00	-	3924,00	36,03	17,20	5,35	37,15	95,72	2,34	60,73	33,90	-	96,97	0,65	
PZ-6	111,00	24,00	24,00	283,00	442,00	117,00	544,00	337,00	-	998,00	5,54	1,97	0,61	12,31	20,44	1,92	15,34	7,02	-	24,28	8,59	
PZ-7	145,00	85,00	85,00	597,00	912,00	173,00	1054,00	446,00	-	1673,00	7,24	6,99	2,17	25,97	42,37	2,84	29,73	9,29	-	41,85	-0,62	
PZ-8	662,00	438,00	438,00	1340,00	2878,00	218,00	2745,00	1123,00	-	4086,00	33,03	36,04	11,20	58,29	138,56	3,57	77,43	23,38	-	104,38	-14,07	
SA-1	631,00	317,00	317,00	4997,00	6262,00	210,00	13279,00	2799,00	-	16288,00	31,49	26,09	8,11	217,36	283,04	3,44	374,55	58,28	-	436,27	21,30	

Fuente: Elaboración propia y tomada de Ausenco Perú SAC, 2013 e Ingemmet para los resultados químicos de los piezómetros



Handwritten signature



### 7.3.2 Selección de la serie analítica

67. La serie analítica, se seleccionó con la finalidad de describir las propiedades de los componentes hidroquímicos de las aguas subterráneas. Los parámetros más importantes medidos y analizados fueron los fisicoquímicos, tales como: pH, temperatura, conductividad eléctrica, carbonatos y bicarbonatos. Parámetros inorgánicos: sulfato, cloruros y nitratos. 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, P, Pb, Hg, Se, Si, Sn, Sr, Tl, Ti, V, Zn, entre los principales (serie estándar para metales totales y disueltos). La serie analítica, se seleccionó con la finalidad de describir las propiedades de los componentes hidroquímicos de las aguas subterráneas.
68. En cada estación de muestreo, se registraron las coordenadas UTM del punto (proyección WGS 84) y la descripción de la ubicación de los puntos. Se tomaron parámetros de campo (pH, temperatura, conductividad eléctrica y OD, etc.) y se recolectaron las muestras respectivas para los análisis en laboratorio. Para la toma de parámetros en campo, se utilizó un equipo multiparámetro de marca HACH.



### 7.3.3 Diagramas hidroquímicos

69. Los diagramas hidroquímicos permitieron caracterizar las aguas en función a su concentración de sales, su predominancia catiónica y aniónica (tipo de agua) e interacción con la parte orgánica y roca; dichos diagramas (Stiff, Piper entre otros) fueron obtenidos mediante la aplicación del software Aquachem versión 2011.



#### a. Diagrama de Stiff

70. Esta gráfica está compuesta por tres 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  $\text{Na}^+$  se confronta con el  $\text{Cl}^-$ , el  $\text{Ca}^{+2}$  con el  $\text{HCO}_3^-$  y el  $\text{Mg}^{+2}$  con el  $\text{SO}_4^{-2}$  (a veces también se pueden mostrar otros dos iones, como el  $\text{Fe}^{+2}$  contra el  $\text{NO}^3$ ). Todos los ejes horizontales están a la misma escala (lineal) y las concentraciones están dadas en meq/L.
71. Dos características sobresalen en este tipo de diagrama de forma simultánea, por un lado permite visualizar claramente diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular) y por otro, permite dar idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica de Stiff). En la Figura 7- 4 se muestran algunas apreciaciones de este diagrama que caracterizan varios tipos de aguas y su relación con el posible origen y ocurrencia. También los diagramas de Stiff se presentarán en un mapa, el mismo que tomará la denominación de mapa hidroquímico, donde se visualizará la variación espacial de la mineralización del agua en el acuífero y/o unidad hidrogeológica.

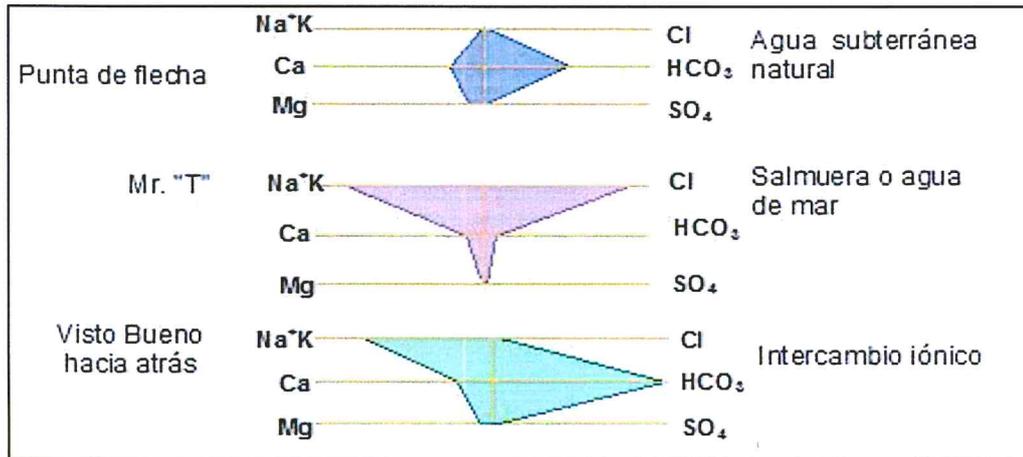


Figura 7- 4. Diagrama de Stiff, nótese que los vértices señalan el tipo de agua y simultáneamente el desplazamiento horizontal señala el grado de mineralización de la concentración.

**b. Diagrama de Piper**

72. Es una de las gráficas más utilizadas para estudios hidroquímicos, el cual incluye la interacción simultánea entre aniones y cationes. Las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas dentro del diagrama (Custodio, 1965). Este diagrama está formado por dos triángulos equiláteros, donde se representan los cationes y aniones mayoritarios. Los vértices del triángulo de cationes están representados por  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  y  $K^+$ , y los vértices del triángulo de aniones por  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$  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 cationes y aniones.
73. Las concentraciones de los iones dadas en meq/L se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes respectivamente. En cada triángulo se reúnen solo tres aniones y tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100 % de un anión o catión (ver Figura 7- 5).

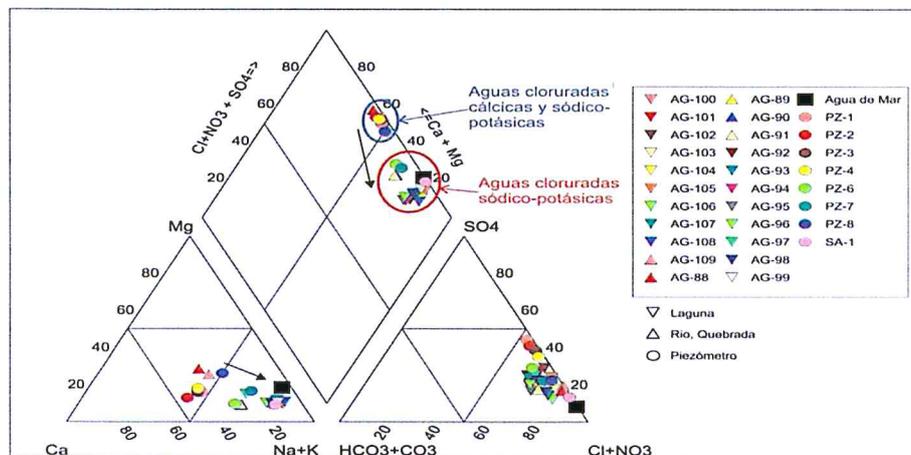


Figura 7- 5. Diagrama de Piper representan el tipo de agua de acuerdo a sus concentraciones de los elementos mayoritarios.



### 7.3.4 Relaciones iónicas

74. En este ítem se integrará los aspectos hidroquímicos, a través de indicadores, que se obtienen de los análisis de las aguas. El agua subterránea y el agua superficial puede ser influenciado por el medio que lo rodea quiere decir que puede influir sobre la relación de iones disueltos; también pueden darse procesos modificadores que inciden sobre los aspectos recién mencionados.

#### Relación Magnesio-Calcio

75. El valor elevado de la relación  $rMg/rCa$  cuando se presenta el problema de intrusión salina constituye un índice para determinar la existencia del problema, ya que esta proporción se presenta en valores bajos, normalmente entre 0,2 y 1 en aguas continentales y en agua de mar presenta valores cercanos a 5. Por lo tanto, una rápida elevación de este índice se considera como indicativa de contaminación, en especial cuando se acompaña del aumento de los cloruros y de la relación  $rMg/rCa$ . A veces esta relación puede verse afectada por fenómenos de reducción de sulfatos (*Custodio y Llamas, 1996*).

### 7.3.5 Evaluación de isótopos ambientales oxígeno ( $^{18}O$ ) y deuterio ( $D_2$ )

76. Para la evaluación isotópica se tomaron valores de estudios previos realizados en el proyecto Tía María<sup>4</sup>; asimismo, se tomaron valores isotópicos del Océano Pacífico<sup>5</sup> con la finalidad de analizar la interacción agua-roca y la recarga de las aguas subterráneas identificadas en el ámbito de influencia del proyecto Tía María.
77. Los isótopos del oxígeno ( $\delta_{18}O$ ) y del hidrógeno ( $\delta_2H$ ) fueron analizados por el laboratorio Isotope Tracer Technologies INC en Ottawa – CANADÁ por medio del analizador PICARRO L2130 – i, donde el sistema de medición está basado en el tiempo que utiliza el láser de infrarrojo cercano para cuantificar las características espectrales de moléculas en un gas que pasa a través de una cavidad de medición óptica (*EAS, 2013*).

### 7.4 Información Geofísica

78. Para el cumplimiento del objetivo planteado en el presente estudio, se optó por utilizar el método de “tomografía geoelectrica” debido a su amplia gama de aplicaciones, sobretudo en geología e hidrogeología.

#### 7.4.1 Equipos y materiales

79. El equipo de tomografía utilizado en el presente estudio estuvo compuesto por:
- Un receptor;
  - Un transmisor;
  - Un motor generador; y
  - Accesorios (cables, electrodos, radios Motorola, etc.).

<sup>4</sup> EAS realizó el estudio hidroquímico e isotópico de la zona del proyecto de Tía María para Southern Peru Copper Corporation – SPCC.

<sup>5</sup> Gonfiantini & Araguas

80. 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 un motogenerador de corriente. Las fotografías de estos equipos se pueden observar en la Figura 7- 6 y Figura 7- 7.



Figura 7- 6. Receptor EIREC PRO de 10 canales



Figura 7- 7. Transmisor de corriente



#### 7.4.2 Trazo de líneas de tomografía Geoeléctrica

81. Las actividades de campo consistieron en realizar nueve (9) líneas de tomografía geoeléctrica<sup>6</sup>, los cuales se distribuyeron y agruparon en zonas según su distancia a la línea de costa, con el objetivo de conocer el alcance o impacto que podría tener la intrusión marina en el acuífero Mejía. Estas zonas se distribuyeron de la siguiente manera:

- **Zona I:** En esta zona se encuentran ubicadas las tomografías TG-1, TG-2 y TG-3, las cuales están más próximas a la línea de costa y cerca al emplazamiento de las lagunas del SNLM.
- **Zona II:** En esta zona se encuentran ubicadas las tomografías TG-4, TG-5 y TG-6, las cuales están en un área con intensa actividad agrícola.
- **Zona III:** En esta zona se encuentran ubicadas las tomografías TG-7, TG-8 y TG-9, las cuales se encuentran más alejadas de la línea de costa y una actividad agrícola poco intensa.

82. La Tabla 7- 2 presenta la descripción de cada línea de tomografía geoeléctrica, tales como su extensión, la zona a la que pertenecen, el espaciamiento entre los electrodos, la profundidad alcanzada y el rango de resistividades.

Tabla 7- 2. Descripción de los perfiles de tomografía geoeléctrica

Tomografía Geoeléctrica	Zona	Extensión (m)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Profundidad alcanzada (m)	Rango de resistividades ( $\Omega.m$ )
TG-1	ZONA I	550	50	172	0,46 – 400,0

<sup>6</sup> La línea de tomografía geoeléctrica es una línea de investigación geofísica colocada sobre el terreno, en la cual se colocan una serie de electrodos, delimitando la extensión del perfil geoeléctrico que se desea obtener.

Tomografía Geoeléctrica	Zona	Extensión (m)	Espaciamiento entre electrodos (m)	Profundidad alcanzada (m)	Rango de resistividades ( $\Omega \cdot m$ )
T-G2		990	90	200	0,07 - 32,2
TG-3		550	50	212	0,15 - 4,28
TG-4	ZONA II	550	50	197	0,31 - 200
TG-5		1100	100	345	0,12 - 83,5
TG-6		550	50	215	0,06 - 18,5
TG-7	ZONA III	550	50	250	0,12 - 30,0
TG-8		330	30	85	0,31 - 110,0
TG-9		550	50	200	1,93 - 604,0

Fuente: Elaboración propia.

### 7.4.3 Configuración utilizada en el estudio, Polo – Dipolo

83. Se llama configuración de electrodos al patrón según el cual los electrodos de emisión de corriente y de recepción de potencial son dispuestos sobre el suelo para efectuar las mediciones de resistividad.
84. La configuración Polo–Dipolo tiene buena cobertura horizontal, la fortaleza que ofrece su señal, es significativamente más alta comparada con otras configuraciones y esta a su vez, no es tan sensible al ruido telúrico. (López, 1999).
85. La configuración Polo-Dipolo requiere de un electrodo remoto (infinito) para la inyección de corriente al terreno, este electrodo debe ponerse lo suficientemente lejos de la línea del sondeo para facilitar una profundidad de investigación mayor. (López, 1999)

### 7.4.4 Mediciones en las líneas de tomografía Geoeléctrica

86. Para la obtención de los perfiles geoeléctricos se realizaron mediciones en las líneas de tomografía geoeléctrica 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.
87. El proceso de medición se llevó a cabo de la siguiente manera: El operador del transmisor (Tx), realizará 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 es ingresado al Rx y se realiza las mediciones, en cada medida se deberá considerar los valores de resistividad y cargabilidad. Una vez registrado y almacenado en el receptor, el operador de Rx indica al Operador de Tx para que corte el flujo de corriente y este a su vez indicará al personal de cable de corriente que la corriente está cortada y pueden

avanzar al siguiente punto, de esta manera completar la línea de investigación del subsuelo.

88. Los datos obtenidos en campo se almacenan 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.

#### 7.4.5 Procesamiento de datos

89. El análisis de los resultados está compuesto por dos etapas, la primera una revisión de los datos y la segunda un proceso de inversión que nos da como resultado la obtención de los perfiles geoelectricos.

- **Revisión de datos**

90. En esta etapa se validan los datos y se eliminan valores incoherentes o ruidos generados por factores externos como: malas conexiones y errores de valores de intensidad. Se validan los valores de diferencias de potencial mayores a 0,1 mV

- **Proceso de inversión**

91. Para este proceso se utiliza el Software RES2DINV, de la empresa GEOTOMO. El programa utiliza técnicas y métodos numéricos relacionados a procesos de inversión para producir un modelo 2D.

92. La base de datos previamente validada y empleada para la generación de pseudo-secciones (perfiles geoelectricos) será exportada a un formato específico para el proceso de inversión, en el cual se transforman las resistividades aparentes obtenidas de la salida de campo, a valores de resistividad real, obteniendo de esta manera, una solución más precisa para las anomalías determinadas.

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIONES

93. Esta sección presenta los resultados de la caracterización geológica, hidrogeológica, hidroquímica y geofísica del Santuario Nacional de Lagunas de Mejía y del área de influencia del proyecto Tía María.

### 8.1 Geología

94. El área de estudio está conformada por diferentes unidades litológicas que varían de edades del precámbrico hasta el cuaternario reciente y conforman una secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas, cubiertas principalmente hacia la costa, formada por materiales no consolidados de tipo aluvial, coluvial y eólico. La Figura 8- 1, Figura 8- 2, Figura 8- 3 representan secciones geológicas que muestran la estimación de los espesores con respecto a la profundidad y el contacto litológico. En el Anexo 1 – Mapa 1.1 se muestra la distribución espacial de las formaciones geológicas en el área de estudio.



### 8.1.1 Complejo Basal de la Costa Ppe-gn (Paleo-proterozoico)

95. Se trata de un conjunto de rocas metamórficas e intrusivas antiguas (paleo-proterozoico) descritas por Bellido y Narváez (1960) que constituyen la Cadena Costanera al noroeste del río Tambo orientada siguiendo la dirección NO – SE, (ver Anexo 1 – Mapa 1.1). Están constituidos por gneises graníticos, color gris verdoso con bandas claras de plagioclasas, feldespatos y cuarzo alineados, intercaladas con bandas oscuras constituidas principalmente por minerales máficos (oscuros - básicos) tipo horblenda, biotita y otros minerales oscuros y también se aprecian que las biotitas se alteran a cloritas.
96. De acuerdo con el estudio hidrogeológico del Proyecto Tía María presentado por Ausenco Perú SAC (2013), se describe la estratigrafía en las perforaciones de los piezómetros de Pz1 a Pz9 y SA-1, donde el basamento gnéisico presenta venillas de pirita y pirita diseminada a una profundidad promedio de 130 m. Esta disposición de la pirita se debe principalmente por estar cerca del núcleo de mineralización donde precisamente están proyectados los tajos del proyecto. Otro dato importante que se recoge en el estudio de impacto ambiental del proyecto Tía María (2013), sobre la litología del complejo basal gnéisico menciona que *“En la zona de Pampa Cachendo, sector Cerro Cumbre, el afloramiento de gneis presenta venillas de sal, diseminaciones de hematita y pirita, así como granos de cuarzo. La alteración hidrotermal es propilítica, apreciándose diseminaciones de epidota y clorita”*. Estos minerales son producto de la alteración de minerales primarios, los cuales son propensos a ser disueltos e incorporados al agua subterránea, incrementando su mineralización.



### 8.1.2 Grupo Cabanillas D-ca (Devónico medio)

97. Los primeros trabajos realizados en esta área fueron realizados por Newell *et al.* 1945; y posteriormente por Sánchez *et al.* 2000 quienes actualizan el cuadrángulo de Punta de Bombón, y describen que la formación Cabanillas aflora en las cercanías del poblado de Cocachacra que está próximo a la localidad de Chucarapi. Su litología está compuesta por cuarcitas blancas de grano medio a grueso bien clasificados en bancos de 0,3 - 0,4 m de espesor, también presentan laminación sesgada y algunos canales, y lutitas silicificadas, contienen fósiles encontrados en las cercanías del poblado de Cocachacra; estos organismos fósiles se consideran del devoniano medio. En el sector del proyecto Tía María afloran areniscas con intercalación de lutitas silicificadas, conglomerados fluviales, dolomitas rosadas con niveles de lutitas roras, también presentan yesos (ver Anexo 1 – Mapa 1-1).

### 8.1.3 Formación Chocolate Ji-cho (Jurásico Inferior)

98. Formación geológica de origen volcánico aflora en el área de estudio en los alrededores del Proyecto Tía María, Sánchez *et al.* (2000) mencionó que la formación Chocolate está compuesta generalmente por lavas de andesitas, dacitas y aglomerados volcánicos y algunos subvolcánicos, se observan texturas porfíricas con escasas plagioclasas en una matriz afírica gris oscura; sobre las lavas de color gris verdoso a gris oscuro, se tienen aglomerados volcánicos que se caracterizan por tener líticos de andesitas y dacitas porfíricas dentro de una matriz afanítica color gris verdosa. La formación Chocolate en el tajo proyectado la “Tapada” se encuentra yaciendo en discordancia angular sobre el Grupo

Cabanillas y directamente en discordancia angular sobre el Complejo Basal de la Costa; asimismo subyace en discordancia angular a la Formación Guaneros (ver Figura 8- 3).

#### 8.1.4 Formación Guaneros Js-gu-i (Jurásico superior)

99. Se describe como unidad geológica volcánica – sedimentaria, la cual aflora al noreste del área de estudio. Está constituida por areniscas y lutitas intercaladas con derrames y brechas volcánicas que se encuentran en la quebrada de Guaneros (ver Anexo 1 – Mapa 1.1).

#### 8.1.5 Formación Moquegua PN-mo (Paleógeno – Neógeno)

100. Sánchez *et al.* (2000) describe a esta secuencia sedimentaria de edad Oligoceno – Mioceno inferior como areniscas intercaladas con arcillas arenosas y conglomerados, también fue estudiada por Bellido y Guevara (1963), quienes los dividen a esta formación en dos miembros. El miembro inferior presenta una composición arcillo arenosa de color rojo, con algunos yesos que se ha optado por denominarlo como Formación Sotillo y el miembro superior areno-tobáceo conglomerático que se ha cartografiado como Formación Moquegua. Las rocas de esta unidad afloran en los extremos del valle de río Tambo, en las proximidades del poblado de Cocachacra; se caracterizan por presentar pendientes moderadas a fuertes, a veces pueden ser medianamente competentes por el cemento de evaporitas que presentan, su litología está compuesta por conglomerados polimícticos, areniscas de grano medio a grueso intercaladas con limolitas de color rojo y beige (ver Anexo 1 – Mapa 1.1).



#### 8.1.6 Formación Camaná Nm-ca (Mioceno inferior)

101. Formación Camaná descrita por primera vez por Ruegg (1952) en la localidad de Camaná, como una secuencia de sedimentos marinos compuestos por areniscas calcáreas abigarradas. En el valle de Tambo al oeste de Cocachacra, en las inmediaciones del poblado Paraíso afloran arcillas bentónicas, limonitas y areniscas de coloración blanco amarillenta (ver Anexo 1 – Mapa 1.1).

*[Handwritten signature]*

#### 8.1.7 Formación Millo Np-mi (Pliocena)

102. Se denomina así a una secuencia sedimentaria de conglomerados y areniscas tobáceas, de acuerdo a Sanchez *et al.* (2000). Los afloramientos que se observan en las proximidades de la localidad del poblado del Fiscal están constituidos por conglomerados polimícticos, areniscas en una matriz tobácea y con algunos epiclastos de andesita, dacita y de rocas intrusivas, que tienen formas subredondeadas a redondeados (ver Anexo 1 – Mapa 1.1). La Formación Millo en el área de estudio aflora en ambas márgenes del río Tambo con una expansión considerable y yace en discordancia erosional sobre la formación Moquegua. Se considera que esta unidad se acumuló en el Plioceno (ver Figura 8- 1, Figura 8- 2 y Figura 8- 3).

#### 8.1.8 Depósitos Cuaternarios

103. Abarca gran parte del área de estudio desde el sector de Cocachacra hasta las lagunas de Mejía. Representa la cobertura reciente pleistocénica y holocénica no



PERÚ

Ministerio  
del AmbienteOrganismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

consolidada del cuaternario donde se han diferenciado tres tipos de depósitos marinos, aluviales y fluviales (ver Anexo 1 – Mapa 1.1).

#### a) Depósitos marinos Qh-m

104. Al noreste del valle Tambo se aprecian los depósitos marinos en forma alargada paralela a la línea de costa (Anexo 1 – Mapa 1.1). En el corte del canal de irrigación de Mejía, se observan arenas bien estratificadas de color gris a gris azulado con lentes de gravas que presentan conchas marinas aún vivientes, las cuales evidencian su origen marino, además estos materiales contienen sales precipitadas en coloraciones blanquecinas. Por otro lado, Sánchez *et al.* (2000) las describe como conglomerados polimícticos y areniscas medias a gruesas mal clasificadas, las cuales están cubiertas por depósitos aluviales.

#### b) Depósitos aluviales Qpl al y Qh-al.

105. Estos depósitos se han acumulado en forma de amplios conos aluviales de piedemonte a la salida de las quebradas al terreno llano. Posteriormente, nuevas corrientes cortaron estos depósitos formando en algunos sitios unas terrazas en sus flancos (Bellido & Guevara, 1963). En el área de estudio, los depósitos aluviales se encuentran formando extensas planicies que corresponden a un antiguo cono de deyección aluvial, dispuestas en espesores que superan los 200 metros de profundidad (ver sección 8-6). Hacia la parte inferior se encuentran los depósitos más antiguos (pleistocenos) y hacia la superficie los más recientes (holocenos), esto se corrobora con la observación de campo en el sector de Bocanegra al norte oeste del área de estudio donde las gravas están compactas e incipientemente cementadas por arenas y arcillas que además muestran una estratificación en favor de la pendiente.

106. La litología de los depósitos aluviales varía según el recorrido de las quebradas, presentando materiales con mayor diámetro a las laderas de los cerros, está conformado por bloques, y gravas redondeados a subangulosos heterogéneos de mayor diámetro, heterométricos y no consolidados en una matriz arenosa gruesa.

#### c) Depósitos Fluviales Qh-fl

107. Se encuentran en todo el curso del río Tambo, conformados por gravas redondeadas en una matriz areno limosa y algunas arenas y limos acarreados mayormente durante la época de las crecidas.

### 8.1.9 Rocas Intrusivas

108. La actividad magmática ha dado como resultado la presencia de diversos cuerpos mayormente plutónicos en el área de estudio (cuadrángulo de Punta de Bombón); estos han sido registrados de acuerdo a su composición mineralógica, características petrográficas, relaciones de contacto según algunas dataciones realizadas por estudios anteriores. Especialmente se encuentran distribuidos en gran parte del área de estudio tanto en el sector de proyecto Tía María y al norte del SNLM. (ver Anexo 1 – Mapa 1.1).





PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Organismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

**a) Batolito Atico – Camaná O-gd/gr – O-gr (Ordoviciano-Siluriano Inferior)**

109. Sánchez *et al.* (2000) describe que los intrusivos se caracterizan por presentar una textura holocristalina, grano grueso, constituida por cristales de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, minerales máficos y en mayor proporción biotitas, algo alteradas a clorita y con coloraciones pardo rojiza y algunas hornablendas. Las rocas se describen mayormente como granitos y granodioritas de grano grueso que se encuentran emplazadas dentro del Complejo Basal, afloran en los Cerros Cangallo y Curicuri, también en el balneario de Mejía (ver Anexo 1; Mapa 1.1). El rasgo distintivo de estas rocas es el gran desarrollo de sus cristales. La edad de estos eventos magmáticos se ha establecido en base a la relación que existe con las rocas huésped y algunas dataciones radiométricas que han sido reportadas en las localidades de Mejía, Camaná, etc, por diferentes investigadores en rocas similares, cuyos valores corresponden al Ordoviciano – Siluriano inferior (430 – 460 M.A.).



**b) Batolito de La Costa**

**Súper Unidad Coles Jim-pc/di-h – Jim-pc/gd-h - Jim-pc/mzdc (Jurásico Inferior a medio)**

110. Los mejores afloramientos de este complejo magmático se encuentran ubicados en los alrededores de los componentes mineros proyectados del proyecto Tía María (cerro Bronce) prolongándose hacia el suroeste manera de pequeños cuerpos aislados que forman parte de la cadena costanera. Sánchez *et al.* (2000) describe a esta litología como: granodioritas, monzonitas, y diorita de hornblenda; generalmente son de grano medio y algunas de grano grueso. Sus relaciones de contacto indican que se encuentran atravesando rocas del complejo Basal de la Costa, rocas de paleozoico (Grupo Cabanillas) y a la Formación Chocolate del Jurásico inferior. Las dataciones isotópicas que se han practicado por diversos laboratorios muestran valores entre 190 -150 M.A., las que concuerdan aproximadamente con las relaciones de campo.



**Súper Unidad Ilo KP-di – Ki-II/di (Cretáceo inferior)**

111. Están constituida por granodioritas de hornblenda, diorita cuarcífera dioritas e incluso algunos cuerpos de granito; generalmente son de grano medio y conforman plutones con morfología característica; afloran en el tajo proyectado la Tapada del proyecto Tía María, intruyen cortando a la Formación Chocolate y plutones de la Súper unidad Punta Coles. Según Sánchez *et al.* (2000), las dataciones hechas en rocas de la Súper Unidad Ilo han presentado valores entre 110-90 M.A., que corresponden esencialmente al Cretáceo inferior y concuerdan con las relaciones de contacto geológico.



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú



Handwritten signature

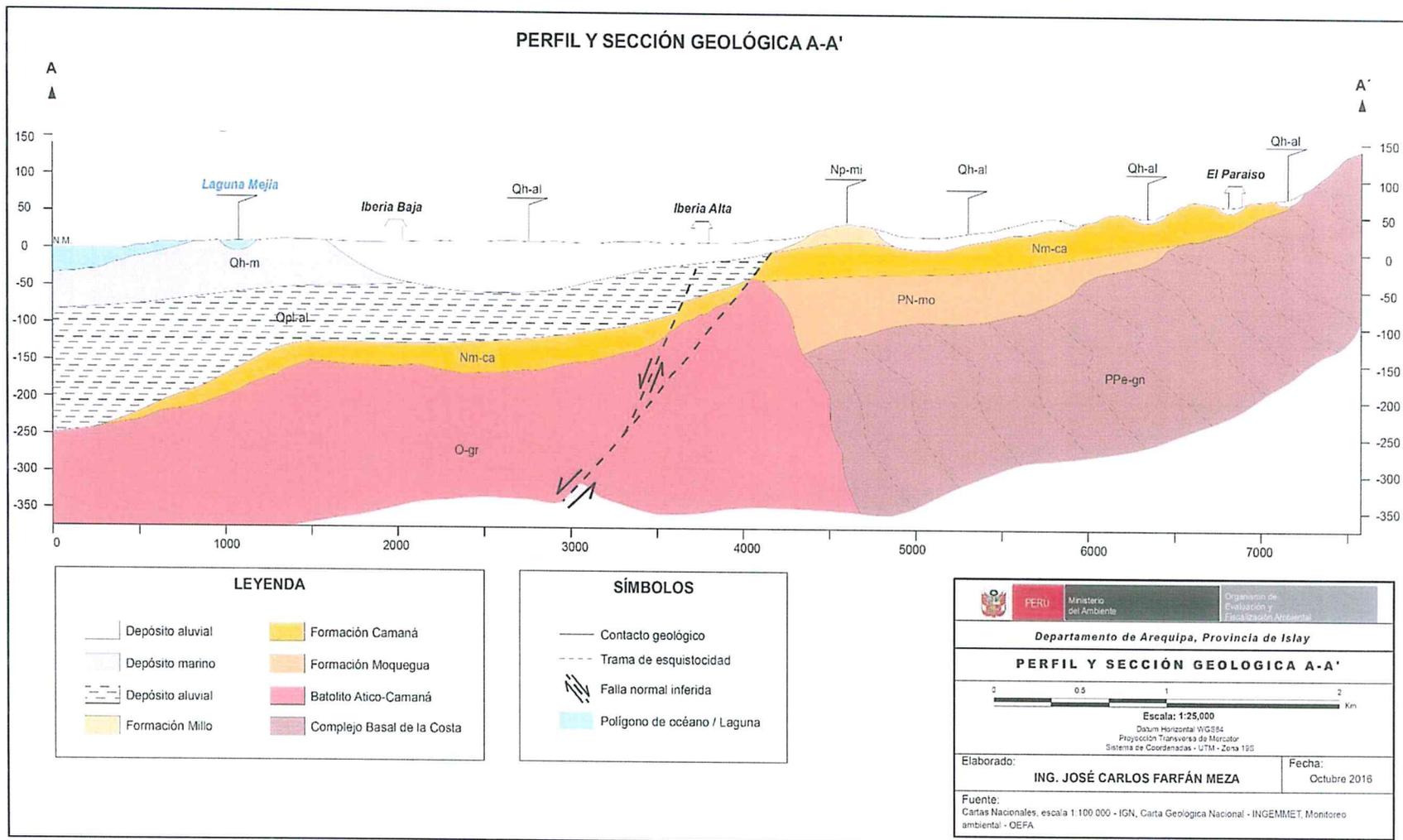


Figura 8- 1. Perfil y sección geológica A-A' ubicado en el SNLM.



PERÚ

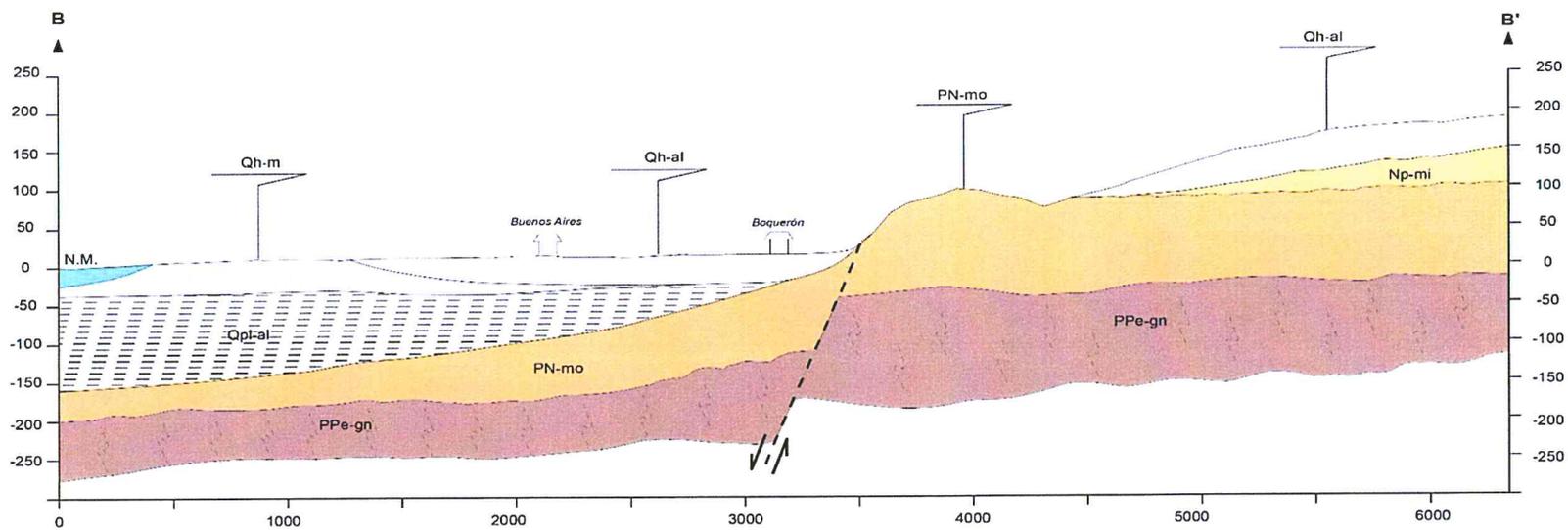
Ministerio del Ambiente

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

### PERFIL Y SECCIÓN GEOLÓGICA B-B'



LEYENDA	
	Depósito aluvial
	Depósito marino
	Depósito aluvial
	Formación Millo
	Formación Moquegua
	Complejo Basal de la Costa

SÍMBOLOS	
	Contacto geológico
	Trama de esquistocidad
	Falla normal inferida
	Polígono de océano / Laguna

		Ministerio del Ambiente Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental
Departamento de Arequipa, Provincia de Islay		
<b>PERFIL Y SECCIÓN GEOLÓGICA B-B'</b>		
Escala: 1:25.000 Datum Horizontal WGS84 Proyección Transversa de Mercator Sistema de Coordenadas - UTM - Zona 19S		
Elaborado:	<b>ING. JOSÉ CARLOS FARFÁN MEZA</b>	Fecha: Octubre 2016
Fuente: Cartas Nacionales, escala 1:100 000 - IGN, Carta Geológica Nacional - INGEMMET, Monitoreo ambiental - OEFA.		

Figura 8- 2. Perfil y sección geológica B-B' ubicado en el SNLM.



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

### PERFIL Y SECCIÓN GEOLÓGICA C-C'

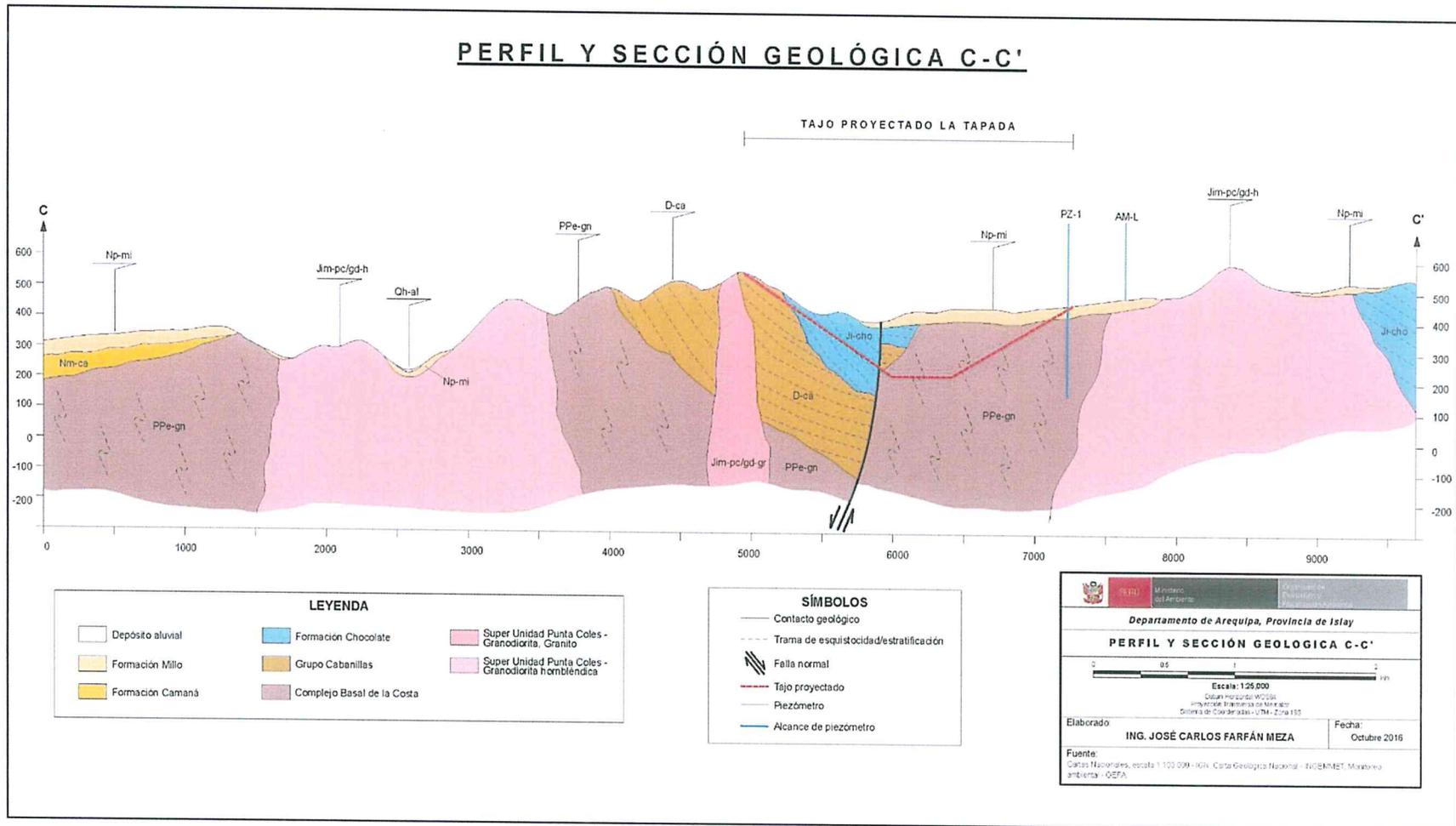


Figura 8- 3. Perfil y sección geológica C-C' ubicado en el proyecto Tía María.

## 8.2 Hidrogeología

112. La hidrogeología del área de estudio se sustentó en información de reconocimiento de campo (geología, hidrogeología y geofísica) y resultados hidroquímicos.
113. Se identificó la existencia del acuífero denominado Mejía, dentro del cual se ubica el SNLM. El acuífero comprende un área aproximada de 94,92 km<sup>2</sup> delimitado a partir del distrito de Cocachacra aguas abajo (ver Figura 8- 6). Los materiales que lo conforman corresponden a depósitos cuaternarios no consolidados, acumulados en forma de amplios conos de deyección. De acuerdo con los estudios geofísicos, el acuífero en el sector del santuario de Mejía presenta espesores variables sujetos a la morfología del basamento rocoso de edad ordovícica. Estos espesores pueden variar de 100 a 150 m de profundidad a partir de la superficie o cota de terreno y en contacto con el basamento rocoso. La napa freática se localiza hacia la superficie y hacia la parte continental varía en profundidades de 5 a 25 metros denotando así un acuífero tipo libre que tiene una recarga principalmente del río Tambo.



### 8.2.1 Parámetros hidrogeológicos

#### a) Porosidad de los materiales

114. Los materiales en el acuífero Mejía son materiales generalmente de tipo gravoso con matriz areno limoso. Por lo precedido, se determinó que la porosidad total se encuentra en el rango de 20 a 50 % y la porosidad efectiva de 3 a 19 % (ver Tabla 6- 1).

#### b) Permeabilidad o coeficiente de permeabilidad K (m/día)

115. De los 16 ensayos de infiltración realizados en el acuífero de Mejía, se determinó que las conductividades hidráulicas en los materiales marinos varían de 1,05 a 6,987 m/día y en depósitos aluviales de 0,9945 a 5,896 m/día (ver Figura 8- 4). Se precisa que los valores hallados son concordantes con la clasificación de conductividad hidráulica de los materiales cuaternarios presentados en la Tabla 6- 3 y Tabla 6- 4. El procesamiento de los datos obtenidos de campo respecto al cálculo de la conductividad hidráulica se presenta en el Anexo 2 (Figura 8- 4)

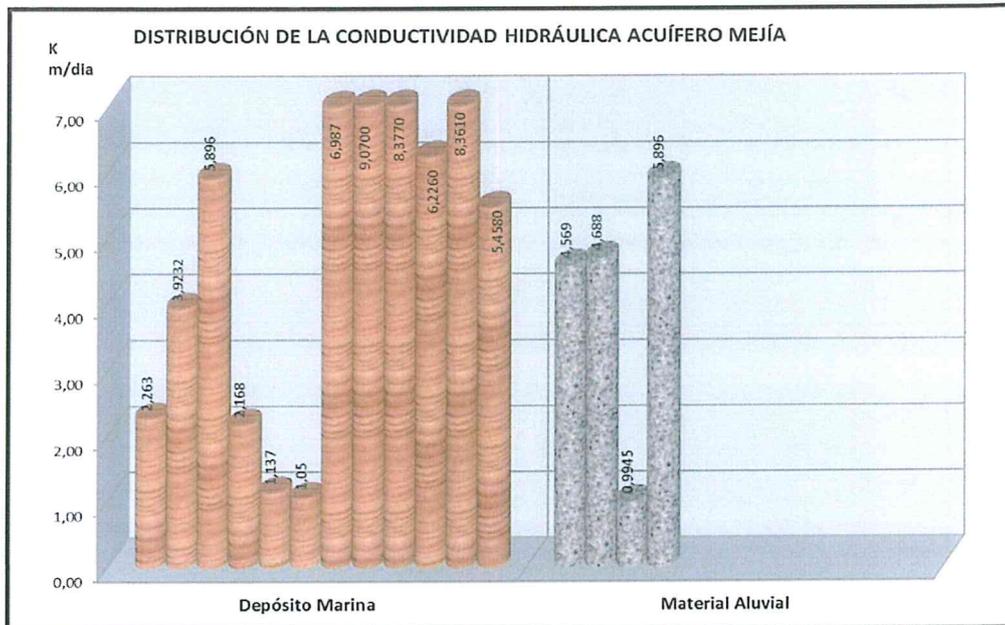


Figura 8- 4. Distribución de la conductividad en diferentes depósitos cuaternarios.



*[Handwritten signature]*

16. Por otro lado, Ausenco Perú SAC (2013), realizó pruebas de permeabilidad de tipo Lefrang carga variable (LCV) en los piezómetros del proyecto Tía María; donde se estimaron valores de permeabilidad a diferentes intervalos de profundidad a partir de los registros de producción de agua (PA) durante la perforación. El estudio también indica que se realizaron pruebas de tipo LCV en zonas ubicadas por encima del nivel freático (zona no saturada) en formaciones de baja permeabilidad como gneis y roca intrusiva, cuyos valores obtenidos de permeabilidad varían de  $2,93 \times 10^{-7}$  a  $1,44 \times 10^{-4}$  cm/s. Asimismo, se estimaron permeabilidades a partir de las mediciones de producción de agua durante la perforación, asumiendo que todo el intervalo analizado produce agua en toda la zona saturada, registrándose valores de  $1,94 \times 10^{-6}$  a  $2,07 \times 10^{-4}$  cm/s. Para efecto de interpretación se realizó la conversión de estos valores de cm/s a m/día (ver Figura 8- 5 y Tabla 8- 6).

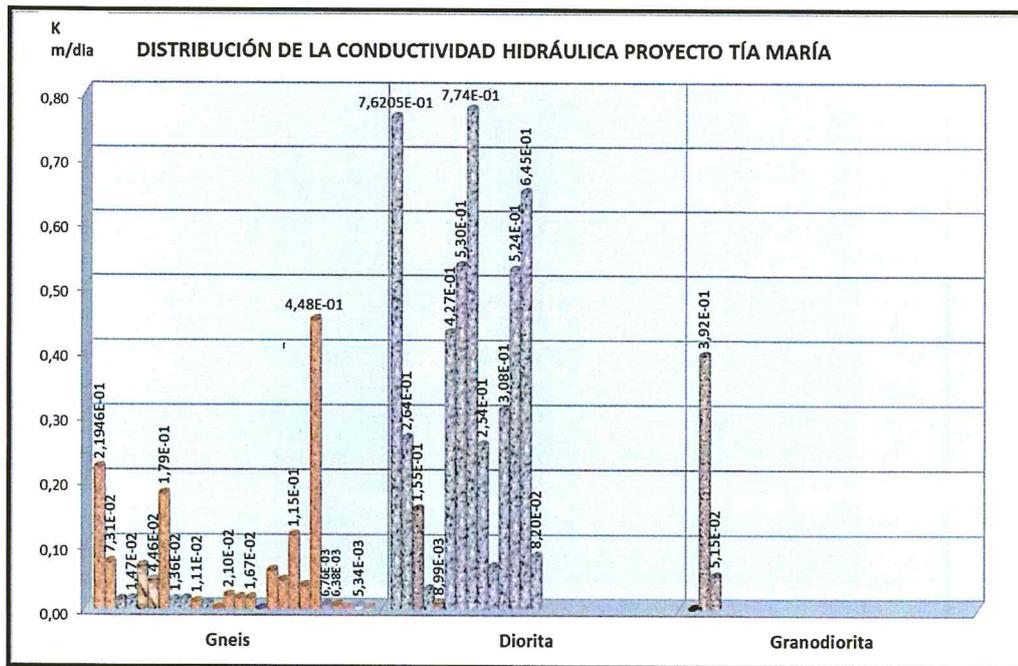


Figura 8- 5. Distribución de la conductividad en diferentes tipos de litología en el proyecto Tía María.

Fuente: Elaboración propia con valores tomados de Ausenco (2013).



*[Handwritten signature]*

117. Los valores de conductividad hidráulica obtenidos en el acuífero de Mejía y en las unidades hidrogeológicas del proyecto Tía María fueron comparados con los valores establecidos por Benítez, (1963), permitiendo determinar la clasificación hidrogeológica de las formaciones geológicas aluviales, marinos, gneis, diorita y granodiorita (ver Tabla 8- 1). De estos resultados, los materiales aluviales y marinos presentaron valores de conductividad hidráulica que varían de 0,9945 a 6,987 m/día, dichos valores nos permitieron clasificarlos como materiales permeables, correspondiente a la clasificación hidrogeológica de acuíferos. Asimismo, los resultados obtenidos para los gneis, dioritas, granodioritas y conglomerados con valores que varían de  $2,53 \times 10^{-04}$  a  $1,02 \times 10^{-01}$  m/día, pudieron ser clasificados en materiales algo permeables a poco permeable, clasificándolo como acuíferos pobres y acuitardos, respectivamente.
118. La clasificación de acuíferos pobres, posiblemente no refleja las características hidrogeológicas de estos materiales, debido a que podrían presentar fracturas muy localizadas, dicho criterio se sustenta con lo afirmado por Ausenco Perú SAC, que señala: "estos valores probablemente no sean representativos del área como un todo, dado que estos se basaron en pruebas de corta duración y de bajo caudal, las cuales solamente miden el área próxima a la perforación. Asimismo, muchas de las pruebas se realizaron en intervalos relativamente cortos, y pueden no haber caracterizado de forma completa cada perforación". Por lo tanto, para fines del presente estudio, estos materiales fueron clasificados como acuitardos.

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

Tabla 8- 1. Valores de conductividad hidráulica comparados con el cuadro de Benítez, 1963

N°	Código	Formación Geológica	Litología	Coordenadas		Conductividad Hidráulica (m/día) K	Clasificación	Clasificación Hidrogeológica	
				E	N				
1	PI-01	Depósitos Marinos	Arenas bien estratificadas de color gris a gris azulado con lentes de gravas, que contienen lentes de conchas marinas de especies aun vivientes del litoral y niveles de arcilla y limo.	197876	8099408	2,26E+00	Permeable	Acuífero Medio a bueno	
2	PI-02	Depósitos Marinos		197910	8099567	9,23E-01	Algo permeable	Acuífero pobre	
3	PI-03	Depósitos Marinos		197744	8099685	5,90E+00	Permeable	Acuífero Medio a bueno	
4	PI-04	Depósitos Marinos		197384	8099857	2,17E+00	Permeable	Acuífero Medio a bueno	
5	PI-06	Depósitos Marinos		196315	8100634	7,80E-01	Algo permeable	Acuífero pobre	
6	PI-08	Depósitos Marinos		195573	8101358	8,19E-02	Algo permeable	Acuífero pobre	
7	PI-09	Depósitos Marinos		195109	8101799	6,99E+00	Permeable	Acuífero Medio a bueno	
8	PI-10	Depósitos Marinos		194374	8102509	9,07E+00	Permeable	Acuífero Medio a bueno	
9	PI-11	Depósitos Marinos		193873	8103058	8,38E+00	Permeable	Acuífero Medio a bueno	
10	PI-12	Depósitos Marinos		193595	8103374	6,23E+00	Permeable	Acuífero Medio a bueno	
11	PI-13	Depósitos Marinos		193168	8103842	8,36E+00	Permeable	Acuífero Medio a bueno	
12	PI-14	Depósitos Marinos		192670	8104431	5,46E+00	Permeable	Acuífero Medio a bueno	
13	PI-15	Depósitos Aluvial		Gravas, arenas, limos con clastos redondeados a subredondeados y en algunas zonas angulosos a subangulosos.	193118	8105267	4,57E+00	Permeable	Acuífero Medio a bueno
14	PI-16	Depósitos Aluvial			194311	8105027	4,69E+00	Permeable	Acuífero Medio a bueno
15	PI-20	Depósitos Aluvial	197460		8103174	9,95E-01	Algo permeable	Acuífero pobre	
16	PZ-1	Complejo Basal de la Costa	Gneis	208672	8115080,1	1,02E-01	Algo permeable **	Acuífero pobre	
17	PZ-1	Suelo - Formación Millo*	Conglomerados polimícticos poco consolidados.	208672	8115080,1	4,56E-02	Poco Permeable	Acuitardo	
18	PZ-2	Suelo - Formación Millo*		208472	8114172,1	5,62E-01	Algo permeable **	Acuífero Pobre	
19	PZ-2	Roca Intrusiva	Diorita	208472	8114172,1	9,24E-02	Poco permeable **	Acuitardo	
20	PZ-3	Roca Intrusiva	Diorita	207610	8115032,1	3,02E-02	Poco Permeable	Acuitardo	
21	PZ-3	Complejo Basal de la Costa	Gneis	207610	8115032,1	4,20E-02	Poco permeable **	Acuitardo	
22	PZ-4	Roca Intrusiva	Diorita	205034	8115616,1	8,99E-03	Poco permeable	Acuitardo	
23	PZ-4	Complejo Basal de la Costa	Gneis	205034	8115616	3,79E-02	Algo permeable	Acuífero Pobre****	
24	PZ-5	Roca Intrusiva	Diorita	205058	8117315	4,06E-01	Algo permeable **	Acuífero Pobre***	
25	PZ-6	Roca Intrusiva	Diorita	205673	8117045	3,89E-01	Algo permeable **	Acuífero Pobre***	
26	PZ-7	Complejo Basal de la Costa	Gneis	205238	8113705,1	2,53E-04	Poco Permeable	Acuitardo	
27	PZ-8	Complejo Basal de la Costa	Gneis	202008	8115376,1	6,39E-02	Poco permeable **	Acuitardo	
28	PZ-9	Complejo Basal de la Costa	Gneis	201242	8121311	6,57E-03	Poco permeable **	Acuitardo	
29	SA-1	Complejo Basal de la Costa	Gneis	196061	8121821,9	2,87E-03	Poco permeable **	Acuitardo	
30	SA-2	Formación Millo*	Conglomerados polimícticos poco consolidados.	206287	8110486,1	4,00E-03	Poco permeable **	Acuitardo	
31	SA-3	Roca Intrusiva	Granodiorita	206482	8110373,2	2,22E-01	Algo permeable **	Acuífero pobre	

\* Según Ausenco, 2013 corresponde a Suelo. Verificando con la geología posiblemente corresponda a la Formación Millo (conglomerados).

\*\* Corresponde al promedio de pruebas de permeabilidad realizado en los piezómetros por Ausenco, 2013, en cada litología.

Fuente: Elaboración propia y valores registrados por Ausenco Perú SAC, (2013).



*[Handwritten signatures]*

## 8.2.2 Caracterización hidrogeológica

119. La caracterización hidrogeológica del área de estudio se realizó sobre la base del cartografiado geológico a una escala 1:50 000 (escala regional) y de la información de los parámetros hidrogeológicos (ver Tabla 8- 2).

### Unidades hidrogeológicas

120. El mapa hidrogeológico, presenta espacialmente unidades hidrogeológicas permeables y poco permeables (ver Anexo 1 Mapa 1.2), así también presenta la zonificación del acuífero poroso no consolidado Mejía que abarca una de las áreas de mayor extensión, seguida de los acuitardos intrusivos y metamórficos.

#### a. Acuífero Mejía

- 
121. Es de tipo poroso no consolidado libre, y es de extensión regional, políticamente abarca los distritos de Mejía, Cocachacra y Valdivia. Se extiende desde el extremo occidental de la cordillera de la costa hasta el límite con el océano Pacífico (Lagunas de Mejía), comprende una superficie de 94,92 km<sup>2</sup> aproximadamente. Corresponde a una zona desértica o de poca precipitación fluvial, por lo que el recurso hídrico subterráneo es de gran interés (ver Figura 8-6).

- 
122. El acuífero está constituido por los depósitos cuaternarios marinos, fluviales y aluviales este último en mayor extensión. Los depósitos aluviales resultan de la erosión de la cordillera andina y son transportados a manera de flujos efímeros producto de las cortas temporadas de lluvias extraordinarias que provocan huaycos y con ello el acarreo de materiales; los depósitos fluviales corresponden a materiales que son transportados y depositados en el cauce del río Tambo y los depósitos marinos se encuentran cerca de la línea de costa producto de la acción erosiva del mar. A cada material cuaternario se le ha asignado una clasificación hidrogeológica denominado acuífero poroso no consolidado (ver Tabla 8- 2).

- 
- 
123. La litología del acuífero Mejía está conformada por materiales heterogéneos gradados de lo más grueso a lo más finos (línea de costa), son gravas sub angulosos a redondeados en matriz arenosa o areno limoso intercaladas con arenas y limos y solamente arenas con niveles de limo como los que lo conforma las Lagunas de Mejía, los clastos de la grava en su mayoría son de roca metamórfica e intrusiva, presentan tamaños variados hasta de 15 cm de diámetro, también presentan bloques esporádicos hasta de 60 cm de diámetro. Estos materiales en general tienen propiedades de permeabilidad y porosidad favorables para la circulación y almacenamiento de las aguas subterráneas; así lo demuestran los ensayos de permeabilidad realizados en este tipo de materiales donde los valores varían de 0,9945 a 6,987 m/día.

124. De acuerdo con la prospección geofísica método resistivo de tomografía geoelectrica (ver sección 8.4) realizados en el acuífero Mejía, se evidenció que la secuencia de los depósitos cuaternarios presentan espesores mayores a 150 metros y a medida que se profundiza los materiales se densifican lo que se evidencia en el incremento de la resistividad eléctrica.

125. La profundidad del agua respecto al terreno o nivel freático varía de acuerdo con la proximidad de la línea de costa. Los niveles de agua de las Lagunas de Mejía muestran la interceptación de nivel freático con la cota topográfica lo cual evidencia a un acuífero de tipo libre, las zonas alejadas de la línea de costa presentan niveles piezométricos a profundidades que varían de -5 hasta -20 metros, ver capítulo de geofísica.
126. El acuífero de Mejía presenta zonas no saturadas y saturadas, las zonas no saturadas tienen espesores que varían de 0 a 25 metros, valores que se estiman en referencia al nivel freático. En las zonas saturadas no se pudieron determinar los espesores debido a que las resistividades demuestran bajos valores resistivos lo cual se puede interpretar que corresponden a zonas de arcillas o zonas saturadas que posiblemente alcancen espesores mayores a 150 metros.



*[Handwritten signature]*

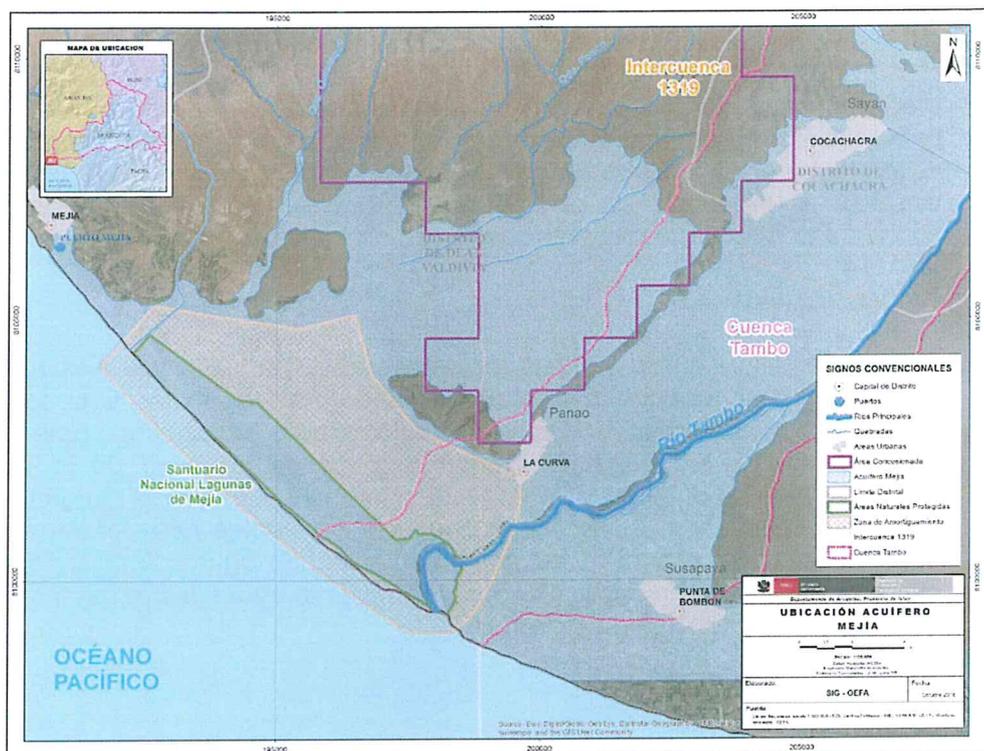


Figura 8- 6. Ubicación del acuífero poroso no consolidado Mejía

### b. Acuitardos

127. Es toda formación geológica capaz de almacenar aguas subterráneas en su interior pero por su escasa permeabilidad se transmite muy lentamente. En el área de estudio se ha clasificado a las unidades litológicas bajo estas características por presentar materiales de baja permeabilidad y por situarse en áreas donde la precipitación es escasa o prácticamente nula. Esta unidad hidrogeológica conforma un amplio dominio que bordean al acuífero Mejía, las unidades litológicas que lo conforman son rocas metamórficas, sedimentarias, volcánicas e intrusivas (ver Anexo 1- Mapa 1.2).

### Acuitardo sedimentario

128. Se localizan en todo el área de estudio, lo conforman las formaciones Millo, Camaná, Moquegua y Guaneros. Estos acuitardos presentan materiales densificados generalmente de conglomerados intercalados con areniscas tobáceas, arcillas y limonitas. En el mapeo hidrogeológico no se evidenció aguas subterráneas en estas formaciones pero no se descarta que a mayor profundidad podrían contener aguas subterráneas en zonas localmente permeables. Por lo expuesto se ha clasificado como Acuitardo sedimentario de escaso interés hidrogeológico (ver Tabla 8- 2).

### Acuitardo metamórfico

129. Presenta un amplio dominio espacial, el cual cubre un 60 % del área de estudio. (ver Anexo 1- Mapa-1.2). Según Ausenco Perú SAC esta unidad está constituida por gneis, granulitas y migmatitas, de color gris oscuro a verdoso y gris claro a rojizo, cuyos afloramientos se muestran en general muy fracturado y medianamente alterado. Asimismo, Ausenco Perú SAC considera a esta unidad como "acuifero roca madre" de baja permeabilidad intrínseca debido al reducido valor de porosidad. Esta denominación de acuifero roca madre difiere a la clasificación propuesta en el presente informe el cual es considerado como acuitardo debido a que presenta valores de baja permeabilidad.

### Acuitardo volcánico

130. Esta unidad aflora en los alrededores del proyecto Tía María (ver Anexo 1), hace referencia a la Formación Chocolate de edad Jurásico Inferior, está constituido por lavas de andesitas y dacitas, y aglomerados volcánicos. Este tipo de unidades desde su formación fueron deformados producto de la actividad tectónica, generando fallas y fracturas de diferentes direcciones otorgándole una porosidad secundaria, estas condiciones son favorables para formar acuiferos fisurados, pero en el área de estudio no se evidencio agua subterránea, aunque no se descarta que en profundidad podría hallarse aguas subterráneas, por ello se les ha clasificado como acuitardos.

### Acuitardo intrusivo

131. Se encuentran principalmente situados al noreste de área de estudio en el proyecto Tía María y a manera de pequeños cuerpos hacia la zona costera (ver Anexo 1 Mapa 1.2). Su litología lo conforman dioritas, monzodioritas, granodioritas, y granitos correspondientes al Batolito de costa y el Batolito Ático - Camaná, presentan porosidad secundaria producto de las fracturas y fallas, sin embargo normalmente en este tipo de materiales las fracturas no presentan continuidad por tanto el flujo de agua subterránea suele ser lento o cautivo. De acuerdo a Ausenco Perú SAC en los registros realizados en las perforaciones de los piezómetros se evidenció el aporte de las aguas subterráneas presentando tasas de producción bajas.



PERÚ

Ministerio  
del AmbienteOrganismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

Tabla 8- 2. Caracterización de unidades hidrogeológicas

Unidades Litológicas	Símbolo Geológico	Litología	Clasificación Hidrogeológica	Símbolo hidrogeológico	Descripción Hidrogeológica
Depósitos fluviales	Qh-fl	Gravas con matriz de arenas, clastos redondeados a subredondeados.	Acuífero Poroso No Consolidado	APNC-fl	Acuíferos de extensión local con área limitada de escaso interés hidrogeológico (caudales mínimos), constituido por gravas, cantos redondeados, ubicada en el curso de los ríos.
Depósitos aluviales	Qpl-al - Qh-al	Gravas, arenas, limos con clastos redondeados a subredondeados y en algunas zonas angulosos a subangulosos.	Acuífero Poroso No Consolidado	APNC-al	Acuífero continuo de extensión regional conformado por materiales permeables, con posibilidades de productividad considerable de agua subterránea debido a su espesor.
Depósitos Marinos	Qh-m	Arenas bien estratificadas de color gris a gris azulado con lentes de gravas, que contienen lentes de conchas marinas de especies aun vivientes del litoral	Acuífero Poroso No Consolidado	APNC-m	Acuíferos de extensión local conformando por materiales muy permeables, de baja productividad.
Formación Millo	Np-mi	Conglomerados polimíticos poco consolidados, intercalaciones areniscas tobáceas y areniscas conglomeradas.	Acuitardo Volcánico Sedimentario	ATS-mi	Materiales de escaso interés hidrogeológico de baja permeabilidad. No se descarta la presencia de agua subterránea en sus niveles permeables.
Formación Camaná	Nm-ca	Arcillas bentónicas, limonitas y areniscas de coloración blanco amarillenta, y niveles de conglomerado	Acuitardo sedimentario	ATS-ca	Acuitardo de extensión local, de baja permeabilidad por presentar materiales finos.
Formación Moquegua	PN-mo	Areniscas intercaladas con arcillas arenosas y conglomerados	Acuitardo sedimentario	ATS-mo	
Formación Guaneros	Js-gu	Unidad geológica volcánico - sedimentario, constituida por areniscas y lutitas intercaladas con derrames y brechas volcánicas	Acuitardo Volcánico Sedimentario	ATVS-gu	Acuitardo de extensión local pueden albergar agua subterránea en sus niveles permeables (Areniscas y lavas)
Formación Chocolate	Ji-cho	Lavas de andesitas, dacitas y aglomerados volcánicos texturas porfíricas con escasas plagioclasas en una matriz afírica.	Acuitardo Volcánico	ATV-cho	Acuitardo de extensión regional, presenta porosidad secundaria (fracturas) en lavas.
Grupo Cabanillas	D-ca	Cuarcitas blancas de grano medio a grueso bien clasificados, también presentan laminación sesgada y algunos canales, y lutitas silicificadas.	Acuitardo Metamórfico	ATM-ca	Acuitardo de extensión regional de baja permeabilidad y presentan porosidad secundaria.
Complejo Basal de la Costa	Ppe-gn	Rocas metamórficas e intrusivas antiguas: gneis con bandas oscuras.	Acuitardo Metamórfico	ATM- gn	Acuitardo de extensión regional de baja permeabilidad, alberga agua subterránea de flujos regionales, presentan porosidad secundaria principalmente.
Batolito de la Costa	Kp-di Ki-il/di	Rocas Intrusivas diorita, monzodiorita cuarzosa, granodiorita hornblendica, granodiorita, granito, diorita hornblendica.	Acuitardo Intrusivo	ATI-pc	Acuitardo de extensión regional, presenta porosidad secundaria (fracturas).
	Jim-pc/mzdc Jim-pc/gd-h Jim-pc/gd-gr Jim-pc/di-h				
Batolito de Atico-Camadá	O-gr O-gd/gr	Rocas Intrusivas granito, granodiorita	Acuitardo Intrusivo	ATI-ac	Acuitardo de extensión regional, presenta porosidad secundaria (fracturas).

Fuente: Elaboración propia

### 8.3 Hidroquímica

132. Se registraron 38 fuentes de agua, de los cuales 29 corresponden a fuentes de agua superficial, muestreadas por el OEFA; 08 corresponden a agua subterránea según la información de SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION (2009) y 01 muestra corresponde al agua de mar de Chorrillos según información proporcionada por Ingemmet, 2015<sup>7</sup>, (ver Anexo 3). Asimismo, de las 38 fuentes registradas, 37 fuentes se utilizó para la interpretación de resultados de los parámetros de campo y 31 fuentes para la interpretación hidroquímica. Cabe mencionar que la muestra de agua de mar

7

Se tomó el resultado de agua de mar de la base de datos de fuentes de agua de Ingemmet, debido a que presenta resultados de elementos mayoritarios completos, principalmente cloruros y que servirán para la interpretación de agua de mar <http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/index.html>

obtenida de Ingemmet presenta similitud con los datos químicos obtenidas por el OEFA 2016 en los resultados de parámetros de campo y elementos mayoritarios y minoritarios, de este último no se consideró en la evaluación hidroquímica los puntos AG-84, AG-85, AG-86, AG-87, AM-02, AM-04 y AM-05 por no presentar datos de cloruros, los cual es importante para los fines del estudio. La ubicación de las estaciones de inventario y muestreo con sus respectivos resultados fisicoquímicos se presenta en el Anexo 3.

### 8.3.1 Parámetros de campo

133. Para el análisis de los parámetros se consideró 37 fuentes que comprenden aguas superficiales, subterráneas y agua de mar.

#### pH

134. Los valores de pH presentaron una tendencia de neutra a básica (entre 7,2 y 9,7), salvo lugares puntuales donde el pH presenta comportamiento ligeramente ácido como es el caso del manantial (AG-88) con pH = 6,7 y de las filtraciones (AG-109) con pH = 4,43, ubicados en la quebrada Rosa María dentro del proyecto Tía María (ver Anexo 1; mapa 1.3).

#### Temperatura

135. Las temperaturas de las aguas de mar varía de 18,6 a 19,9 °C, las aguas superficiales de 20,3 a 28,5 °C y las aguas subterráneas (piezómetros) varían de 16,3 a 24,6 °C, (ver Anexo 3). Al compararlos con la temperatura media anual máxima (19 °C), solo las aguas superficiales se incrementan en 5 °C, indicando posiblemente que estas aguas presentan incremento en su temperatura por la exposición a la superficie y la acción mecánica del movimiento.

#### Conductividad eléctrica

136. Permitió representar la variación del contenido de iones en las aguas superficiales y subterráneas desde la línea de costa hacia el valle del río Tambo y ámbito del proyecto Tía María (ver Anexo 1; mapa 1.4). El aumento de la conductividad en los ríos (desde su nacimiento hasta su desembocadura) es un proceso natural en las cuencas hidrográficas, y refleja la acumulación de iones que se produce por el drenado y lavado de los suelos con el discurrir de las aguas (Confederación hidrográfica del Ebro, 1998). Este proceso se suscita en el recorrido del río Tambo (cuenca baja) desde el punto AG-84 (2410  $\mu\text{s/cm}$ ) hasta la desembocadura AG-89 (2680  $\mu\text{s/cm}$ ), donde los valores de conductividad eléctrica presentaron un ligero incremento en 270  $\mu\text{s/cm}$ . Asimismo, en las lagunas de Mejía se observó el incremento considerable de la conductividad eléctrica (5190 a 10990  $\mu\text{s/cm}$ ), dicho incremento es propio en humedales costeros (por contacto con los materiales marinos y aporte del agua de mar), pero no se descarta otras fuentes relacionadas a las actividades antropogénicas desarrolladas en los alrededores del SNLM. Por otro lado, las aguas subterráneas en el Proyecto Tía María (piezómetros, manantiales y filtraciones) presentaron valores de conductividad que varían entre 2 667 a 38 800  $\mu\text{s/cm}$  (ver Anexo 1, Mapa 1.4). Estos valores elevados de conductividad eléctrica se atribuyen al factor geológico, sustentado en la presencia de rocas metamórficas alteradas con contenido de halita (sal de roca) en el ámbito proyecto Tía María.

Finalmente, los valores de agua de mar presentan valores que varían de 51 800 a 55 200  $\mu\text{s/cm}$ , propios del ambiente marino que se enriquecen debido principalmente a las concentraciones de cloruro de sodio y sulfatos.

### 8.3.2 Facies hidroquímicas

137. Para efectos de este análisis se utilizaron las concentraciones de los componentes iónicos mayoritarios del agua (cationes:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  y aniones:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ ) mediante los diagramas de Stiff, Piper y Scater.

#### Diagrama de Piper y Scater

138. Las fuentes muestreadas en el proyecto Tía María se agrupan en dos facies, el primer grupo de tipo clorurada-cálcica y sódico-potásica agrupa a los piezómetros PZ-1 al PZ-4 y PZ-8 y, los puntos de monitoreo AG-88 y AG-109 (manantiales y filtraciones en la quebrada Rosa María); estos puntos corresponden a fuentes de agua subterránea, cuya facie evidencia el mayor tiempo de residencia dentro de la unidad hidrogeológica y el lavado de sales como la halita. El segundo grupo de tipo clorurada sódico-potásica agrupa a las lagunas de Mejía (lagunas Sur, Iberia y Boquerón), agua de mar y piezómetros (PZ-6, PZ-7 y SA-01), dicha facie presenta el incremento de los aniones y cationes en las aguas superficiales, las cuales podrían estar asociadas al incremento de la salinización por aporte del agua de mar o al lavado de sales de depósitos marinos; por otro lado, las aguas subterráneas, muestran una concentración mayor por tiempo de permanencia dentro de los acuíferos metamórficos e intrusivos.

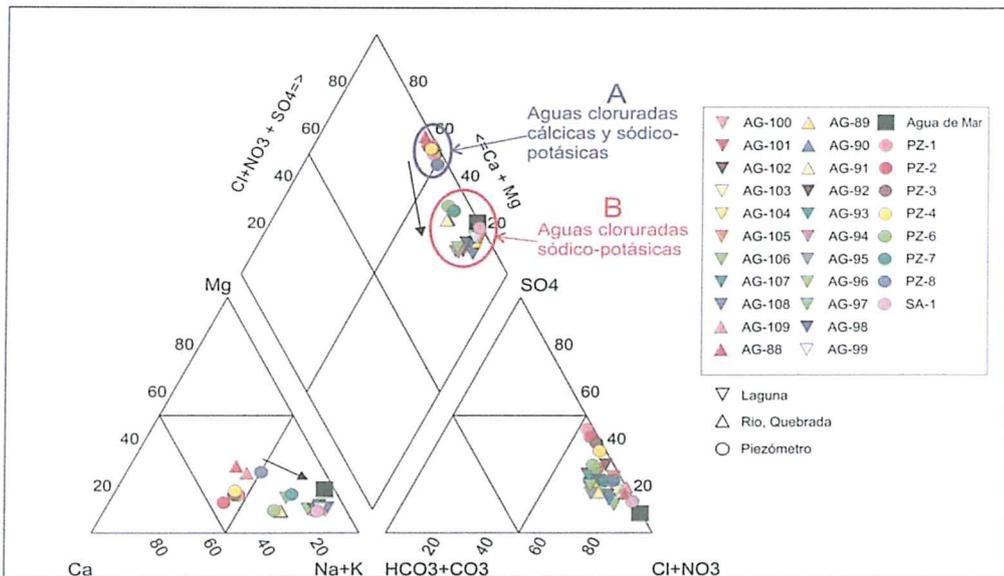


Figura 8- 7. Diagrama de Piper: A. aguas cloruradas cálcicas y sódico-potásicas B: las aguas cloruradas sódico-potásicas en el área de estudio.

139. Las predominancias químicas están relacionadas con la evolución de flujos subterráneos (Mifflin, 1988), los cuales fueron establecidas mediante el diagrama de Scatter en relación al  $\text{Na}+\text{K}$  y  $\text{Cl}+\text{SO}_4$  (ver Figura 8- 8). Las aguas subterráneas (piezómetros y manantiales) indicaron su relación con flujos

regionales, los cuales estarían asociados a aguas con mayor tiempo de residencia y circulación en las unidades hidrogeológicas (acuitardos). Referencialmente, se puede indicar que las aguas superficiales de las lagunas de Mejía y del río Tambo, se ubican en la franja de flujo intermedio y regional, evidenciando la presencia de elevadas concentraciones de sales mas no se podría afirmar que corresponda a una evolución de flujo asociada a la residencia prolongada en un acuífero.



*Handwritten signature and initials.*

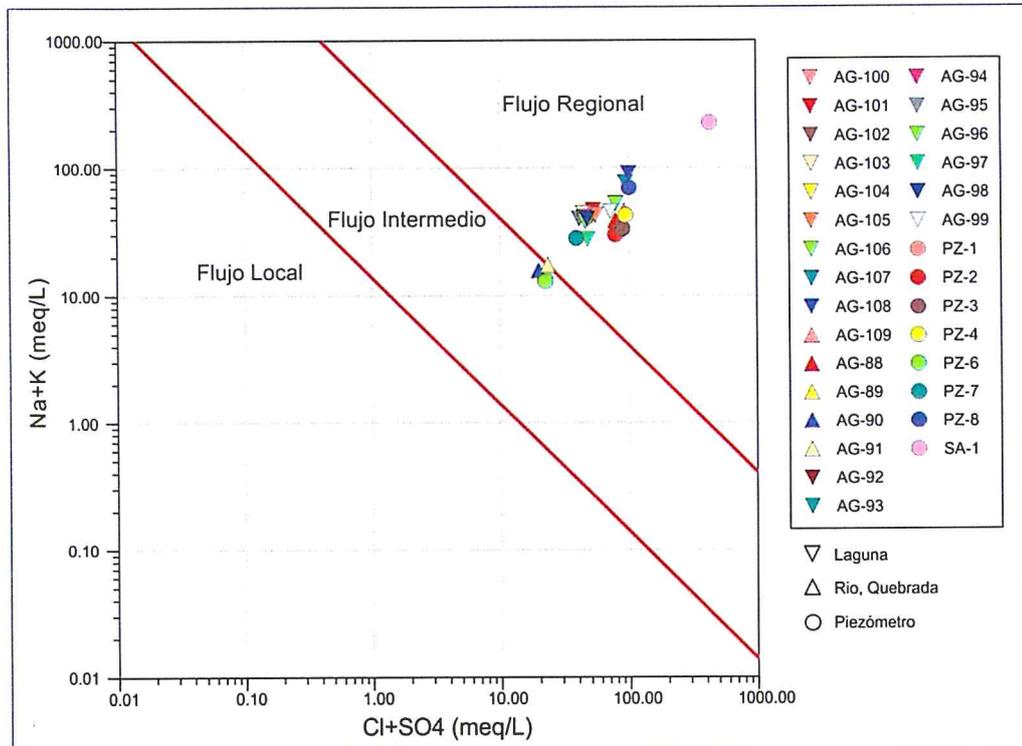


Figura 8- 8. Diagrama Scatter de evolución de flujos subterráneos, en su mayoría los puntos se plotean en la franja de flujo intermedio y regional

**Diagrama de Stiff**

140. Según las concentraciones de iones mayoritarios, el mapa hidroquímico de la zona de estudio (ver Figura 8- 9), fue dividido en cuatro grupos o rangos de valores hidroquímicos predominantes : de 0 a 30 meq/L (2 muestras), de 0 a 50 meq/L (12 muestras), de 0 a 100 meq/L (15 muestras) y de 0 a 400 meq/L (1 muestra)
141. El primer grupo está conformado por los puntos AG-89 y AG-90, ubicados en el río Tambo – sector Cocachacra. Estas aguas son de tipo clorurada sódicas con una concentración de 0-30 meq/L. El segundo grupo está constituido por 12 fuentes naturales de agua (ver Figura 8-9); de las cuales 10 (laguna Iberia Norte, desembocadura del río Tambo y agua subterránea de los piezómetros del proyecto Tía María) corresponden a la facie clorurada sódica, las cuales tendrían una influencia del aporte de sales de los materiales marinos y; dos (ámbito del proyecto Tía María) son de tipo clorurada sulfatada-sódica cálcica las cuales tendrían el aporte de sulfatos del yacimiento Tía María. El tercer grupo al igual que el segundo presentan el mismo predominio sulfatada clorurada y clorurada-



Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

sulfatada sódica-cálcica, esta tendencia también se reporta en las lagunas de Mejía y el proyecto Tía María, pero con un incremento de las concentraciones de iones de 50 a 100 meq/L. Cabe precisar que, para el caso de las lagunas de Mejía, específicamente el incremento podrían estar asociadas al aporte del agua de mar. Por último, se tiene que el punto SA-1 (piezómetro), el cual presenta un predominio de tipo clorurado sódico con concentración de iones de 400 meq/L. Esta concentración posiblemente esté asociado a la disolución de la halita (NaCl) presentes en las rocas gneisicas.





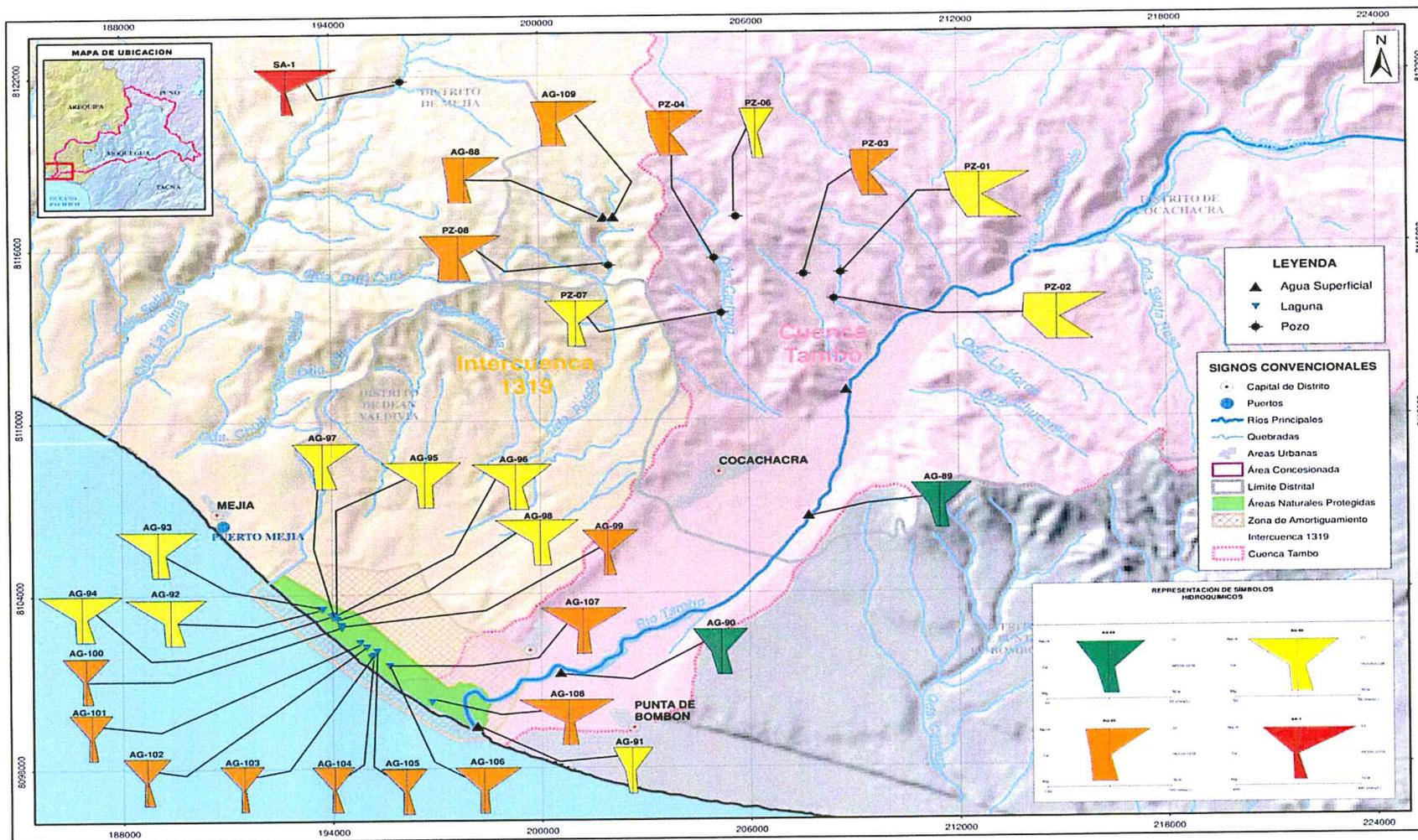
PERÚ

Ministerio del Ambiente

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú



Handwritten signature

Figura 8- 9. Mapa Hidroquímico del área de estudio



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Organismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

### 8.3.3 Relaciones hidroquímicas

142. La presencia de elevadas concentraciones de iones mayoritarios cloro, sodio, calcio y potasio, podrían ser resultado del aporte de las aguas marinas y/o depósitos marinos en las lagunas del SNLM y; de la mineralización del yacimiento para el caso del área de influencia del proyecto Tía María. Con la finalidad de profundizar lo mencionado, se realizó diagramas de relación que explique la procedencia de las aguas y su interacción con su entono.

#### Relación $rNa/rCl$

143. Para efectos de determinar la procedencia de los iones sodio y cloro, se trazaron dos líneas que se correlacionan, la primera en relación a la disolución de la halita con un ratio de 1:1 y la segunda en relación al agua de mar con un ratio de 0,75 (ver Figura 8- 10). De esta manera se explica que los puntos AG-97, AG-99 y AG-106 (lagunas Iberia norte, centro y sur) corresponden a agua de mezcla (agua continental y agua marina) con mayor presencia de agua mar. Por otro lado, las aguas subterráneas de los puntos AG-88, AG-109, SA-1 y PZ-1 al PZ-4, se sitúan por debajo de la línea de agua de mar, donde dicha relación evidencia el incremento del ion cloruro respecto al sodio, lo cual estaría relacionado a su retención por su baja solubilidad, no siendo absorbido significativamente, pasando a su fase acuosa pudiendo alcanzar concentraciones muy altas (Gómez *et al.*, 2010). Por otro lado, los puntos PZ-6 al PZ-8, se sitúan específicamente en la línea de agua de mar, dicho comportamiento estaría relacionado al aporte del ión sodio, debido a la alteración de algunos silicatos presentes en las rocas intrusivas, lo que estaría liberando el ion sodio a las aguas subterráneas (Gómez *et al.*, 2010). Respecto a AG-89 al AG-91 (río Tambo) y los puntos AG-92 al AG-94, AG-100, AG-101 al AG-105, AG-107 y AG-108 (lagunas de Mejía), dichos puntos se sitúan por encima de la línea de disolución de la halita, lo cual obedecería a un factor geológico, sustentado en el lavado de materiales marinos que presentan precipitados de sales (yesos, halitas, etc.).



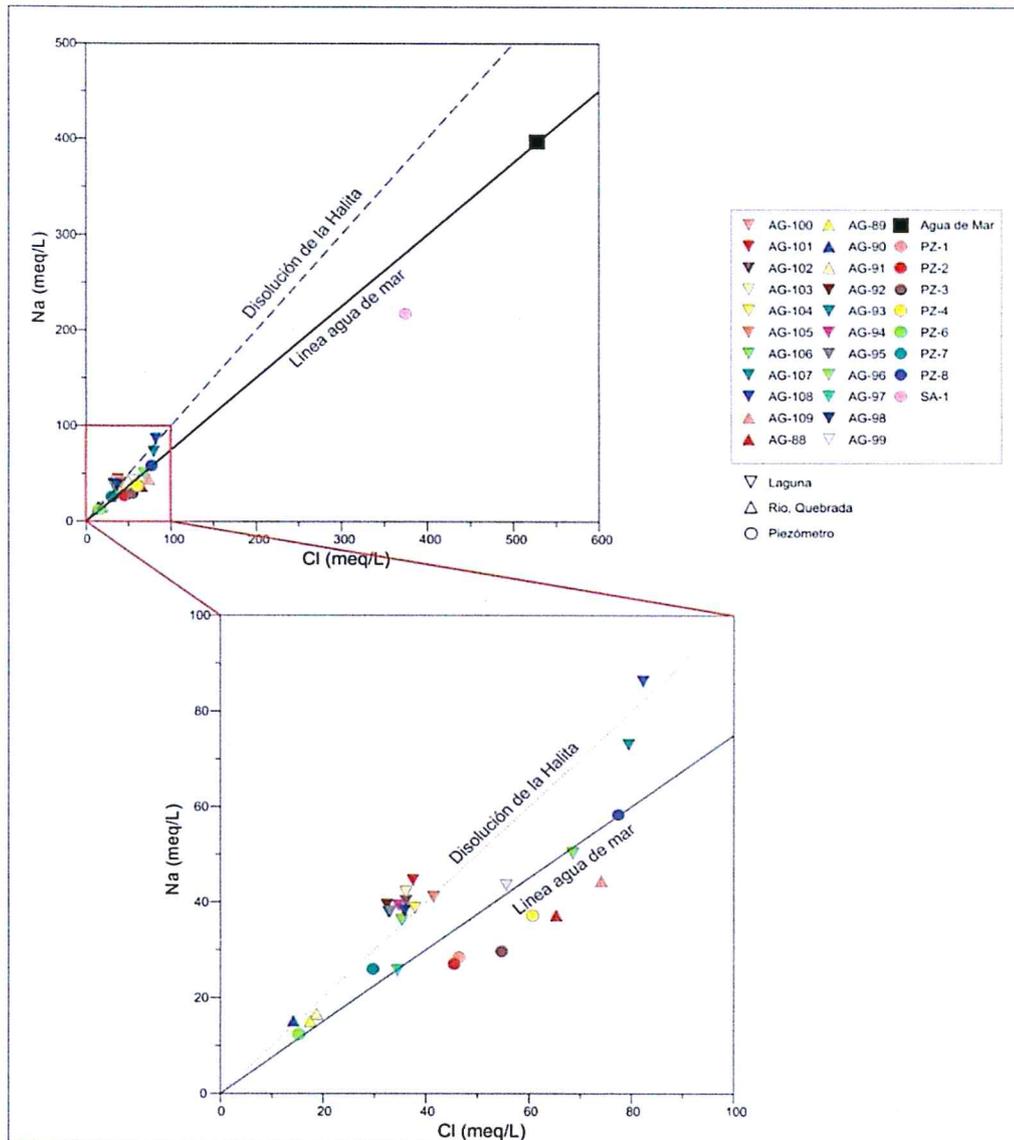


Figura 8- 10. Diagrama rNa/rCl de las aguas superficiales del SNLM y aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María.

### Relación rMg/rCa

144. La relación rMg/rCa constituye un indicio para determinar la intrusión marina o el aporte de las aguas de mar de forma natural. Las aguas continentales presentan valores de ratio rMg/rCa entre 0,2 y 1; y el agua de mar presenta un ratio mayor o igual a 5, los valores que se encuentran entre 1 y 5 constituyen un índice para determinar la existencia de intrusión salina y/o aporte del agua de mar<sup>8</sup> (ver Figura 8- 11). La distribución espacial de los puntos de monitoreo en las lagunas Mejía indica que parte de estas lagunas presentan aporte de agua de mar, posiblemente relacionada a la influencia de mareas altas. Por otro lado, las aguas superficiales del río Tambo y las aguas subterráneas del proyecto Tía María corresponderían a aguas continentales. No obstante, solo el punto PZ-8

<sup>8</sup> Para el presente estudio los términos "intrusión marina" se considerarán como aporte natural del agua de mar sobre las lagunas y/o acuífero.



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

(piezómetro) supera ligeramente la relación  $rCa/rMg$  en 1,09 (ver Figura 8- 12 y Tabla 8- 3).

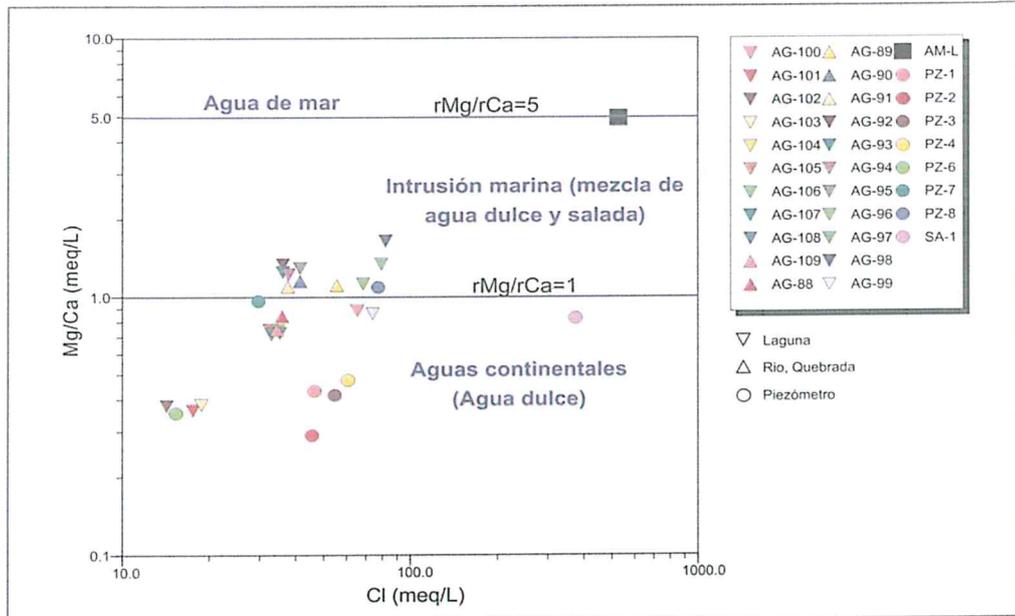


Figura 8- 11. Diagrama de  $rMg/rCa$  en las aguas superficiales del SNLM y aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María

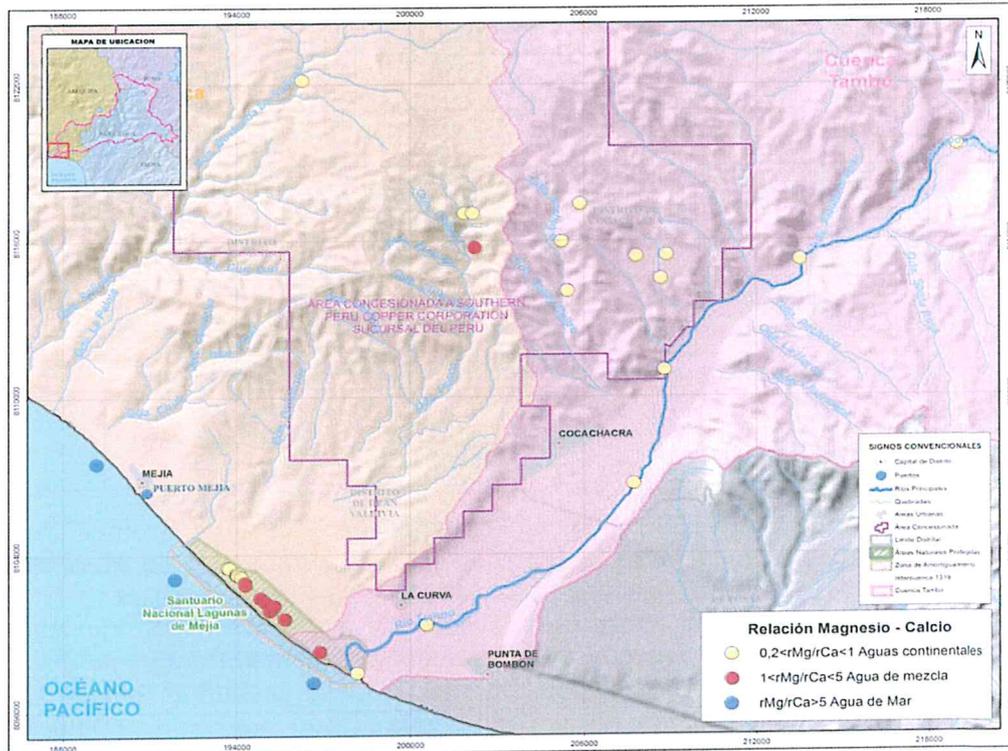


Figura 8- 12. Distribución de  $rMg/rCa$  en las aguas superficiales del SNLM y aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

Tabla 8- 3. Distribución del índice Magnesio - Calcio

N°	Punto de muestreo	Descripción del Lugar de Muestreo	WGS-84, Zona 19		pH	C.E. (µs/cm)	Mg2+ meq/l	Ca2+ meq/l	rMg/rCa
			Este	Norte					
1	AG-85	Río Tambo, anexo Pascana.	218996	8119634	8,23	2400	2,07	5,28	0,39
2	AG-86	Río Tambo, puente Santa Rosa.	213529	8115240	8,29	2360	2,15	5,47	0,39
3	AG-87	Río Tambo, puente Chucarapi.	208803	8111024	8,23	2410	2,24	5,67	0,40
4	AG-88	Manantial en la Q° Posco, Proyecto Tía María	201861	8117044	6,72	8210	27,74	31,29	0,89
5	AG-89	Río Tambo, antes del puente Freyre.	207719	8106667	8,11	2460	2,17	5,96	0,36
6	AG-90	Río Tambo., después del puente Freyre.	200562	8101286	8,29	2460	2,20	5,81	0,38
7	AG-91	Río Tambo, desembocadura al mar.	198164	8099448	8,01	2680	2,50	6,53	0,38
8	AG-92	Laguna Mejía.	193696	8103510	8,15	5580	4,85	6,50	0,75
9	AG-93	Parte media Laguna Mejía.	193732	8103500	8,12	5570	4,86	6,54	0,74
10	AG-94	Laguna Mejía al Sur	193989	8103258	7,59	5700	5,21	7,00	0,74
11	AG-95	Laguna de Mejía	194014	8103227	7,49	5690	5,31	7,40	0,72
12	AG-96	Mirador, Laguna Mejía.	194048	8103300	7,58	5700	5,15	7,09	0,73
13	AG-97	Laguna Iberia Norte, Lagunas de Mejía	194051	8103212	8,79	5700	6,34	8,46	0,75
14	AG-98	Laguna Iberia, Lagunas de Mejía	194146	8103138	8,02	5690	5,20	6,16	0,84
15	AG-99	Laguna Iberia, Lagunas de Mejía.	194273	8102932	8,10	6280	5,96	5,35	1,11
16	AG-100	Laguna Iberia centro, Lagunas de Mejía	194282	8102857	9,07	5700	6,13	5,32	1,15
17	AG-101	Laguna Iberia, Parte media	194806	8102348	8,25	6290	5,83	5,30	1,10
18	AG-102	Laguna Iberia, Lagunas de Mejía	194990	8102189	8,95	5730	5,29	3,95	1,34
19	AG-103	laguna Iberia, Lagunas de Mejía	195202	8101909	8,82	5850	5,41	4,32	1,25
20	AG-104	laguna Iberia, Lagunas de Mejía	195133	8101866	8,03	5190	4,73	3,86	1,23
21	AG-105	laguna Sur, Lagunas de Mejía	195285	8102044	8,83	5760	5,35	4,13	1,29
22	AG-106	laguna Sur, Lagunas de Mejía .	195647	8101542	7,60	6930	7,12	6,32	1,13
23	AG-107	Al sur de la laguna Sur.	195646	8101541	8,00	10630	11,48	8,54	1,34
24	AG-108	Laguna Boquerón, Lagunas de Mejía	196861	8100280	8,10	10990	11,78	7,14	1,65
25	AG-109	Filtraciones en la Q° Rosa María, Proyecto Tía María	202144	8117056	4,43	10	25,99	30,10	0,86
26	AM-02	Agua de Mar Mejía	196656	8099090	7,40	52100	83,85	16,62	5,05
27	AM-04	Agua de Mar Mejía	191855	8103102	7,21	55200	85,33	17,17	4,97
28	AM-05	Agua de Mar Mejía	189155	8107503	7,55	52400	101,46	18,64	5,44
29	AM-L	Agua de Mar Chorillos			7,62	51800	97,21	19,74	4,92
30	PZ-1	piezometro, Proyecto Tiamaría	208867	8115443	7,60	7760	11,03	25,50	0,43
31	PZ-2	piezometro, Proyecto Tiamaría	208669	8114537	8,00	7320	9,05	31,09	0,29
32	PZ-3	piezometro, Proyecto Tiamaría	207805	8115395	7,70	8270	12,01	28,84	0,42
33	PZ-4	piezometro, Proyecto Tiamaría	205229	8115967	7,80	8710	17,20	36,03	0,48
34	PZ-6	piezometro, Proyecto Tiamaría	205865	8117404	8,40	2667	1,97	5,54	0,36
35	PZ-7	piezometro, Proyecto Tiamaría	205427	8114070	8,00	4490	6,99	7,24	0,97
36	PZ-8	piezometro, Proyecto Tiamaría	202199	8115742	7,90	9980	36,04	33,03	1,09
37	SA-1	piezometro, Proyecto Tiamaría	196 254	8 122 182	7,40	38800	26,09	31,49	0,83
		0,2<rMg/rCa<1 Aguas continentales							1<rMg/rCa>5 Aguas mezcla agua dulce agua de mar
		rMg/rCa≥ 5 Agua de Mar							

Fuente: Elaboración propia

Relación rB/rCl

145. El boro constituye otro elemento característico del agua de mar, aunque en concentraciones menores a 1 meq/L. En la Figura 8- 11, se observa que los puntos PZ-1 al PZ-8 (piezómetros), AG-88 y AG-109 (manantiales y filtraciones) ubicados dentro del ámbito del proyecto Tía María, presentan concentraciones de boro menores a 1 meq/L al igual que el agua de mar. Por otro lado, los puntos ubicados en el río Tambo y las Lagunas de Mejía, presentan valores superiores a 1 meq/L, evidenciando por un lado que la procedencia de recarga del acuífero Mejía proviene principalmente del río Tambo y que la similitud de valores en las aguas subterráneas en el proyecto Tía María y el mar no se atribuyen al mismo origen.

146. Asimismo, se observó que las concentraciones de boro en el río Tambo hasta su desembocadura presentaron valores de 1,38 a 1,71 meq/L, muy similar al valor obtenido en el punto AG-108 (laguna Boquerón), no obstante las demás lagunas presentaron concentraciones que variaron de 1,72 a 3,11 meq/L, este incremento de boro en las lagunas de Mejía, visto que la única fuente de recarga sería el río Tambo, se presume que estaría atribuida a actividades antropogénicas relacionadas al uso de fertilizantes en la actividad agrícola y/o posibles vertimientos de aguas residuales de poblaciones adyacentes (ver Figura 8- 14). Además, se observó que el único punto que presentó concentraciones por encima de 3 meq/L fue el punto SA-01 (piezómetro), cuyo origen de la presencia de boro no guardaría relación con el aporte de agua de mar ni del río Tambo, más bien tendría procedencia de aguas profundas relacionada a flujos regionales de un sistema hidrotermal antiguo (*Cruz, et al., 2014*)



*[Handwritten signature]*

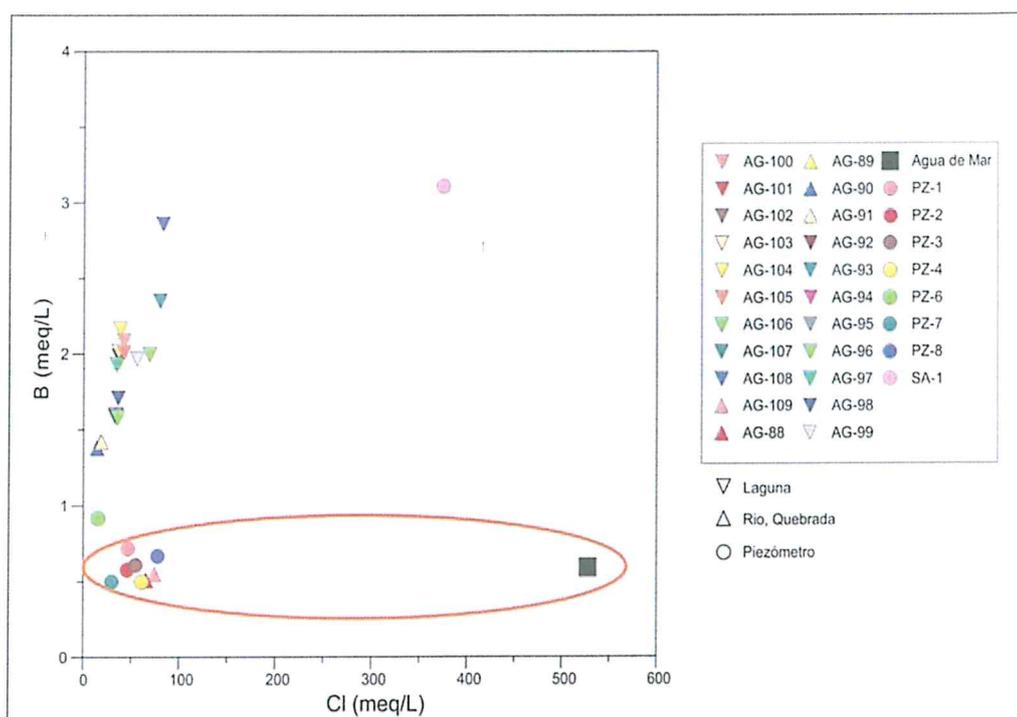


Figura 8- 13. Diagrama de rB/rCl en las aguas superficiales del SNLM y aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

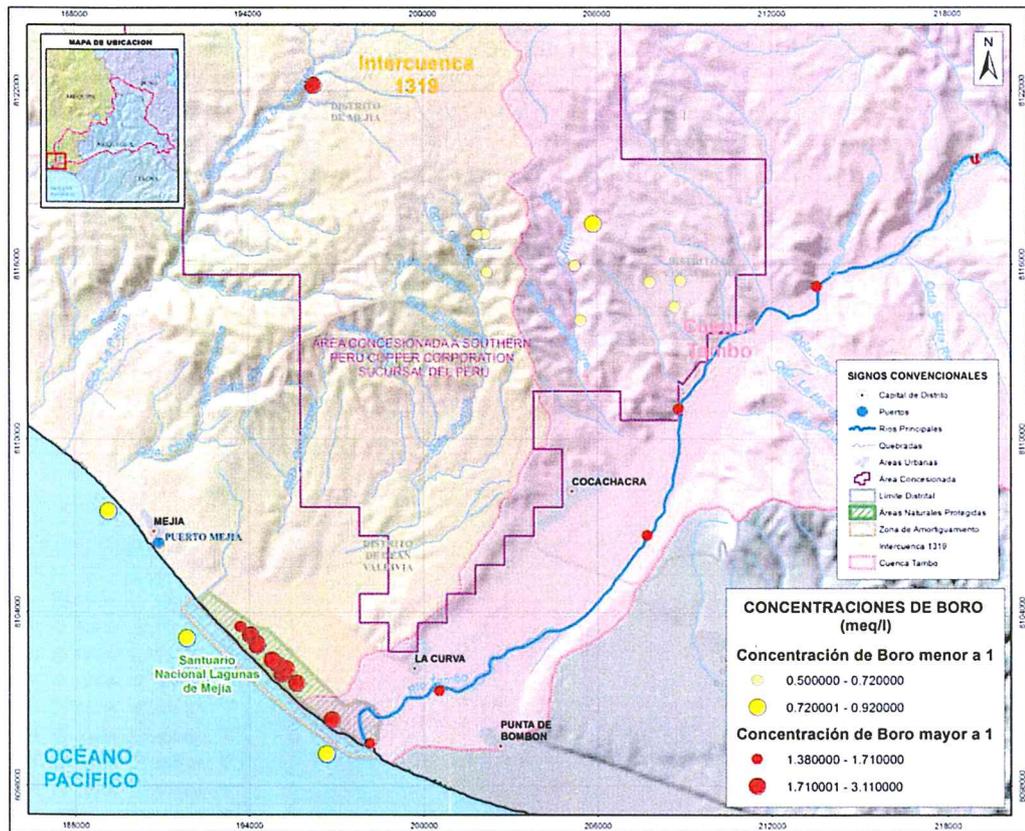


Figura 8- 14. Distribución de boro en las aguas superficiales del SNLM y aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María

Relación rSr/rCl

147. El estroncio conjuntamente con el boro son cationes característicos del agua de mar en concentraciones menores a 1 meq/L. De acuerdo con la Figura 8- 15, se observó que ninguna fuente presenta concentraciones de  $Sr^{2+}$  que sean similares al agua de mar, por tanto se ratifica que la recarga de las lagunas del SNLM estarían relacionada a aguas procedentes del río Tambo y; que el origen de las aguas subterráneas son propias de la mineralización existente en el ámbito del proyecto Tía María.

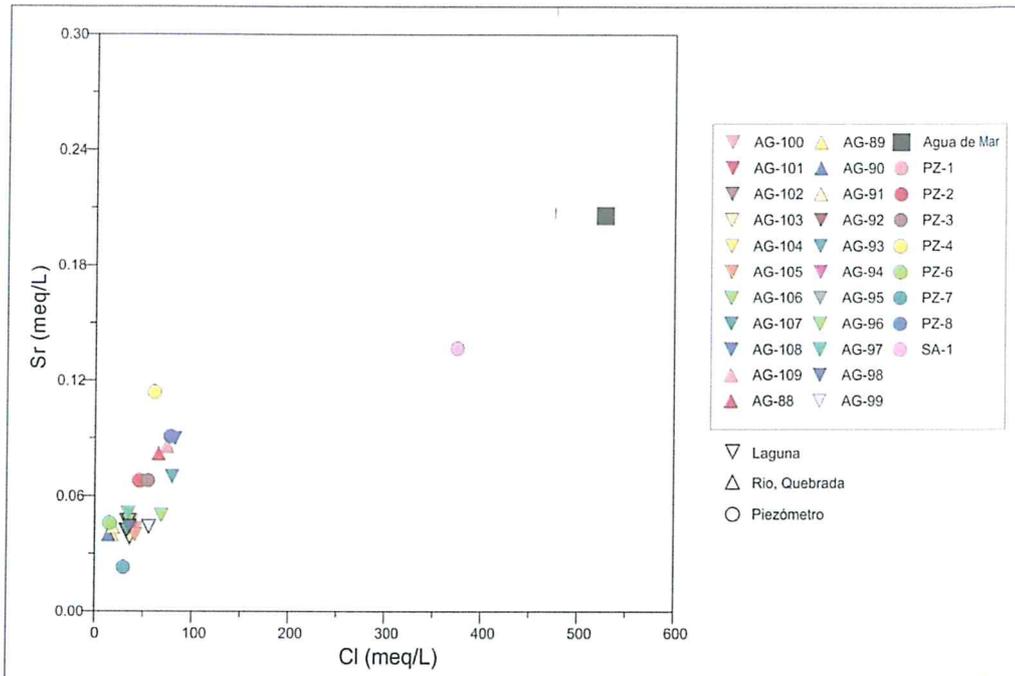
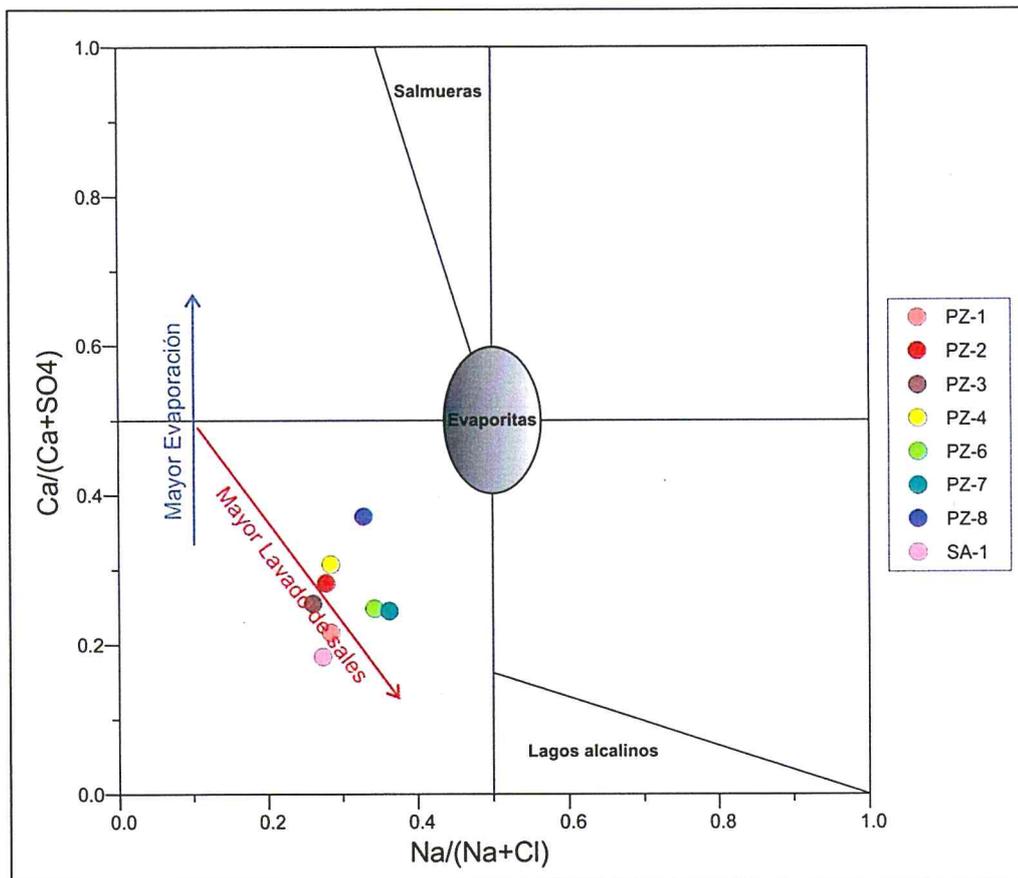


Figura 8- 15. Diagrama  $rSr/rCl$  en las aguas superficiales del SNLM y aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María

**Relación  $rCa/r(Ca+SO_4) / rNa/(Na+Cl)$**

148. Esta relación permite indicar las tendencias de evaporación de las lagunas tipo salmueras, tipo lagos alcalinos y la composición de agua del mar (Hounslow, 1995); así también permite comprobar que la composición del agua subterránea (piezómetros) forma un campo prolongado, definido por dos procesos principales: interacción prolongada entre agua-roca e influencia por el lavado de sales superficiales hacia las unidades hidrogeológicas (EAS, 2013), permitiendo explicar el origen de las aguas subterráneas ubicadas en el ámbito del proyecto Tía María (ver Figura 8- 16).
149. Los datos de perforación de los piezómetros indicaron que atraviesan principalmente roca intrusiva de tipo diorita y gneis alteradas con presencia de piritita (ver Tabla 8- 4), lo cual explica la alta mineralización de las aguas, por tanto, estas elevadas concentraciones indican también que estas aguas corresponden a flujos regionales o posiblemente aguas fósiles. Se precisa que, el punto PZ-8 (piezómetro), no correlaciona con la tendencia de la línea de lavado de sales presentada en los demás puntos de agua subterránea (piezómetros), indicando que el agua sufrió procesos de evaporación antes de infiltrarse.


**Figura 8- 16.** Relación de  $rCa/r(Ca+SO_4) / rNa/(Na+Cl)$  en las aguas superficiales del SNLM y aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María

**Tabla 8- 4.** Niveles piezométricos y descripción de la geología de los piezómetros

Punto de muestreo	WGS-84, Zona 19		Altitud msnm	Fecha	NP msnm	NP prof. (m)	Geología y profundidad	Filtración de agua (m de prof.)
	Este	Norte						
PZ-1	208867	8115443	439	set 2009	229	210	Suelo (0-80 m), diorita alterada (80-109 m), Gneis (110-129 m), Gneis con pirita diseminada (130-139 m), Gneis (140-336 m)	285-335
PZ-2	208669	8114537	320	set 2009	229	91	Suelo (0-102 m), diorita con pirita (103-147 m), Gneis (148-199 m)	122
PZ-3	207805	8115395	480	set 2009	229	251	Suelo (0-125 m), diorita con pirita diseminada (125-167 m), Gneis con pirita diseminada (167-375 m)	339 poca agua a los 356
PZ-4	205229	8115967	536	set 2009	495	41	Suelo (0-17 m), diorita alterada (17-57 m), Gneis (57-117 m), Gneis con pirita (118-190 m)	92
PZ-6	205865	8117404	800	set 2009	573	227	Suelo (0-51 m), diorita alterada (52-123 m), Diorita (124-171 m), Diorita alterada (172-231 m), Gneis (232-369 m)	-

Punto de muestreo	WGS-84, Zona 19		Altitud msnsm	Fecha	NP msnm	NP prof. (m)	Geología y profundidad	Filtración de agua (m de prof.)
	Este	Norte						
PZ-7	205427	8114070	362	set 2009	356	6	Suelo (0-11 m), diorita alterada (12-39 m), Diorita con piritita diseminada (40-69 m), Diorita alterada (70-80 m)	70
PZ-8	202199	8115742	528	set 2009	495	33	Suelo (0-7m), Gneis (8-126 m), Gneis con venillas de piritita (127-141 m).	97
SA-1	196 254	8122182	790	set 2009	782.6	7.4	Suelo residual (0-28 m), Gneis en tramos con piritita (29-200 m)	86

### 8.3.4 Isotopía de las aguas subterráneas

150. Se utilizaron los datos de deuterio ( $\delta_2H$ ) y oxígeno ( $\delta_{18}O$ ) para determinar la procedencia y zona de recarga de las aguas subterráneas ubicados en el ámbito del proyecto Tía María<sup>6</sup> (ver Tabla 8- 5).

**Tabla 8- 5. Resultados Isotópicos de Deuterio y Oxígeno 18.**

Código	Descripción	Fecha de Muestreo	$\delta_{18}O$	$\delta_2H$
PZ-1*	Piezómetro	21/03/2013	-0,50	-4,40
PZ-2*	Piezómetro	21/03/2013	0,90	11,50
PZ-3*	Piezómetro	21/03/2013	0,95	9,80
PZ-4*	Piezómetro	21/03/2013	-3,79	9,90
PZ-6*	Piezómetro	21/03/2013	-11,89	10,60
PZ-7*	Piezómetro	21/03/2013	0,78	10,60
PZ-8*	Piezómetro	19/03/2013	0,14	1,70
SA-1*	Piezómetro	19/03/2013	3,63	12,80
Alto Tambo*	Aguas cuenca alta***		-17,50	-128,00
Agua de Mar*	Agua de Mar		-0,17	-1,04

\* EAS, (2013)  
 \*\* Promedio de resultados de isotopos de océano Pacífico según Gonfiantini & Araguas, (1988).  
 \*\*\* Valores obtenidos de las gráficas de EAS, (2008).

### Relación Deuterio $\delta_2H$ y Oxígeno $\delta_{18}O$

151. La mayoría de los puntos de aguas subterráneas del proyecto Tía María se presentaron distantes de la línea meteorológica mundial (GMWL) y cercanas al valor isotópico del agua de mar, lo cual indica que sufrieron dos procesos principales: la evaporación y la interacción prolongada de agua-roca (ver Figura 8-17). El punto PZ-6 (piezómetro) presenta valores más bajos de  $\delta_2H$  y  $\delta_{18}O$ , alineándose con el punto (alto Tambo) en la línea de evaporación de aguas con origen a mayor altitud, por tanto se presume que estas agua provienen de precipitaciones pluviales por encima de 4 000 msnm., sin embargo por ser un punto atípico no se descarta que estas aguas hayan sufrido una dilución con aguas de perforación realizadas en el piezómetro. Los puntos PZ-1 al PZ-4, PZ-7 y PZ-8 se encontraron más enriquecidas en  $\delta_2H$  y  $\delta_{18}O$ , alineándose paralelamente a la GMWL, lo que indicaría mayor evaporación y mayor tiempo de contacto entre las aguas subterráneas con el basamento rocoso (interacción

agua-roca). Por otro lado, el punto SA-1 (piezómetro) es el más distante a la GMWL con un mayor enriquecimiento de  $\delta_2\text{H}$  y  $\delta_{18}\text{O}$  respecto al agua mar, evidenciando que sus aguas sufrieron mayor evaporación antes de su infiltración al subsuelo con largo tiempo de residencia en la unidad hidrogeológica.

152. En la Figura 8- 17, se observa que la mayoría de los puntos tienen una composición isotópica cercana a la del agua de mar, indicando que posiblemente provienen de precipitaciones como resultando de la evaporación del agua de mar, lo cual no ha sufrido mayor fragmentación isotópica.

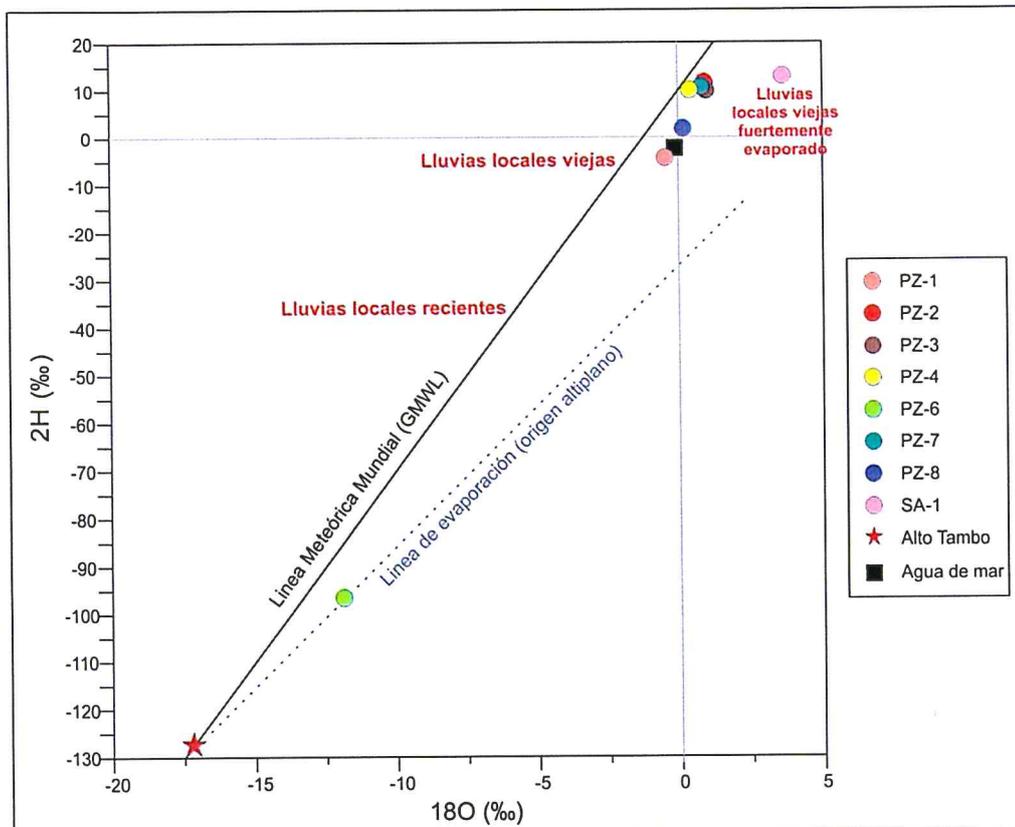


Figura 8- 17. Gráfico de  $\delta_2\text{H}$  y  $\delta_{18}\text{O}$  en las aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María

#### Altura de recarga o zona de recarga

153. El gradiente altimétrico para la región del altiplano es  $-0,33 \delta_{18}\text{O}$  por cada 100 m, obtenida a partir de la concentración del  $\delta_{18}\text{O}$  (ver Figura 8- 18).

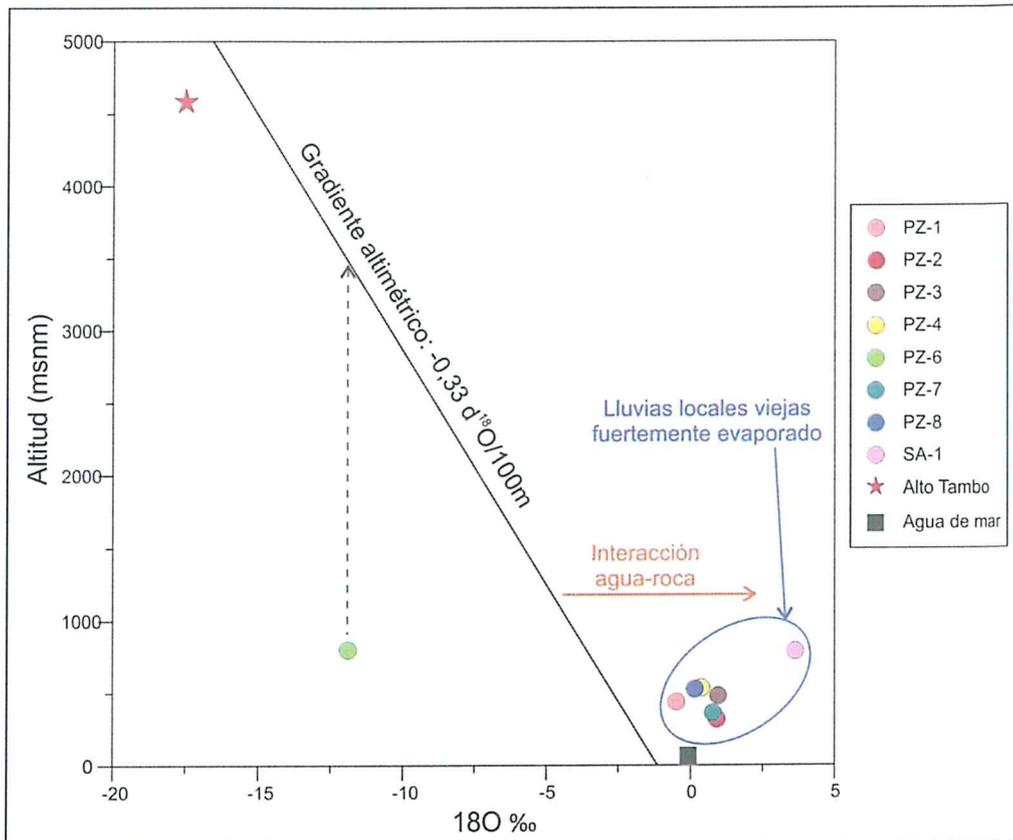


Figura 8- 18. Gráfico de  $\delta_{18}O$ /altitud de las aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María

154. El piezómetro PZ-6 tiene una firma isotópica que indicaría su origen de infiltración en zonas altiplánicas a una altura promedio de 3500 msnm, pero debido que representa un punto atípico es posible que estas aguas no sean propias de la unidad hidrogeológica identificada. Los puntos PZ-1 al PZ-4, PZ-7 y PZ-8 muestran mayor indicio de interacción agua-roca, probablemente por un tiempo prolongado en el subsuelo. Isotópicamente, sus valores son relativamente pesados, indicando su recarga a alturas bajas <1000 msnm (ver Figura 8- 18); a su vez se evidencia que estas aguas presentan mayor tiempo de residencia en los acuitardos, presentando su origen a partir de lluvias locales viejas, correspondientes a precipitaciones históricas asociadas a eventos del fenómeno del "El Niño".

## 8.4 Geofísica

### 8.4.1 Interpretación y análisis de los perfiles de tomografía geoelectrica

155. Los valores de resistividad obtenidos en el presente estudio, se pueden relacionar a dos conceptos principales; el primero correspondería al conocimiento de las características litológicas de los depósitos y su capacidad de retener agua en sus poros y la segunda a las características del agua, respecto a su concentración en sales (dulce, salobre o salada) contenida en ellos.

156. Como se mencionó anteriormente, la zona de estudio se encuentra enmarcada en un ambiente deltaico marino, caracterizado por la presencia de material sedimentario, compuesto principalmente por gravas y arenas<sup>9</sup> (Heubeck, 2010). Con respecto a las características del tipo de agua contenida en su estructura (poros), esta puede variar respecto a su origen marino o de acuífero continental (denominado acuífero Mejía<sup>10</sup>), lo cual definirían su composición salina final<sup>11</sup>. Estos dos conceptos o variables se pueden relacionar directamente a los valores obtenidos en cada una de las tomografías geoelectricas realizadas en este estudio.
157. Otro aspecto importante que permitiría analizar los resultados, sería conocer el comportamiento de un acuífero con las características antes descritas, para esto, Rangel et al., (2002) considera que, los materiales de relleno sedimentario en una planicie aluvial [zona de estudio], en el cual existen semiconfinamientos se comportan como un acuífero multicapa, pero en su conjunto trabaja como acuífero libre<sup>12</sup>.
158. Es necesario mencionar sobre la influencia de las aguas provenientes de la irrigación Ensenada (zona agrícola), lo que provocaría lo descrito por Cardona et al. (2000), el cual menciona que, el agua relacionada con retornos de riego es aquella que se ha utilizado para fines de irrigación, pero que no fue consumida por el proceso de evaporación o transpiración, y que encuentra su camino de retorno a la zona saturada. Por efecto de diversos procesos, los retornos de riego se concentran en constituyentes químicos, tales como solución de minerales, solución de residuos agrícolas, por lo que generalmente se caracterizan por el incremento en sodio, cloruro y potasio [disminuyendo de esta manera, la resistividad eléctrica del medio].
159. Algunos estudios han comprobado la efectividad de la técnica geofísica de tomografía geoelectrica en la identificación de zonas de intrusión marina sobre la litología o acuíferos costeros, por ejemplo, en un estudio realizado en las costas de la Región Basilicata al sur de Italia (Satriani et al, 2011), se encontraron resistividades menores a 1,0  $\Omega$ .m, llegando incluso a 0,1  $\Omega$ .m en zonas más próximas a la línea de costa, determinándose la presencia de estratos saturados con agua de mar producto de la intrusión marina.
160. Asimismo, Levent (2008), identificó dos zonas principales en función a los valores de resistividad presentados en el área de un delta costero, compuesto principalmente por arcillas limos, arenas y gravas; el rango de valores de resistividad correspondientes a la primera zona variaron de 15 a 35  $\Omega$ ., relacionados a cuerpos arcillosos o a arcillas saturadas de agua. Las

<sup>9</sup> Este tipo de material sedimentario posee un gran potencial de retención de agua en su estructura, debido a su alta porosidad.

<sup>10</sup> Se considera como acuífero Mejía como un acuífero poroso no consolidado saturado.

<sup>11</sup> La composición salina, está relacionada al contenido natural que puedan tener las aguas del acuífero Mejía y las aguas provenientes de la intrusión marina, existiendo una zona de mezcla entre ambas con características salubres. Adicional a lo anterior, podría existir aportes de aguas de riego con algún contenido de sales en su parte superficial del terreno.

<sup>12</sup> En un acuífero libre existe una zona impermeable que sirve de base a una zona permeable saturada de agua; más arriba, existe una franja permeable, sin saturar.

resistividades de la segunda zona variaron en el rango de 0,7 a 3,0  $\Omega$ .m, que corresponderían a estratos saturados con agua de mar.

161. Otras investigaciones realizadas en zonas con características similares, confirmarían los bajos valores de resistividad producto de intrusiones marinas, como la realizada por Adeoti et al. (2010), en la cual, las resistividades de los estratos (arena o arcilla) salinos variaron entre 2,06 a 39,88  $\Omega$ .m, o la realizada por Oyeyemimuy et al. (2015) con valores bajos de resistividad que variaron entre 0,0494 a 3,5  $\Omega$ .m.
162. Nowroozi et al., presenta una descripción detallada de los valores de resistividad respecto a una probable litología y calidad de agua contenida en ellos (ver Tabla 8- 6) esta interpretación utiliza el rango de resistividades conforme a la variación de la salinidad relacionada a la calidad del agua propuesto por Zohdy et al. (1993). Esta tabla es usada también por Sodde and Barrocu, (2006), como niveles de referencia para interpretar la litología influenciada por intrusiones marinas.

**Tabla 8- 6. Resistividades en sedimentos relacionados a la calidad de agua**

Resistividad ( $\Omega$ .m)	Sedimentos	Interpretación
0,5 – 2,0	Arena muy porosa, o arcilla saturada	Agua de mar; agua muy salina; TDS: Alrededor de 20 000 mg/l
2,0 – 4,5	Arena porosa o arcilla saturada	Agua de mar; TDS: Alrededor de 10 000 mg/l
4,5 – 10,0	Saturado de arena o arcilla arenosa	Agua salubre con elevadas sales; TDS: 10 000 1500 mg/l
10,0 – 15,0	Arcilla arenosa, grava arenosa	Agua salubre; STD: 5000 1500 mg/l
15,0 – 30,0	Arena, grava, alguna arcilla	Mala calidad de agua dulce; 1500 700 mg/l
30,0 – 70,0	Arena, grava, menor arcilla	Intermedia calidad de agua dulce; TDS: 100 mg/l
70,0 – 100,0	Arena, grava, no arcilla	Buena calidad de agua dulce; TDS: bajo
Más que 100,0	Arena gruesa, grava, no arcilla	Muy buena calidad del agua dulce; TDS: muy bajo

Fuente: (Nowroozi et al. 1999), modificada desde Zahdy et al. (1993)

163. Sin embargo, existen valores de resistividad obtenidos en este estudio (y otros), inferiores a 0,5  $\Omega$ .m, que escapan del rango de valores mínimos mostrados en la Tabla 8- 7, es por ello que se puede tomar como referencia la categorización de calidad del agua respecto a su salinidad establecida por la APHA (1995)<sup>13</sup>, presentada en la Tabla 8- 7, sobre todo los valores inferiores a 0,22  $\Omega$ .m que corresponderían a salmueras<sup>14</sup>, que se pueden presentar en medios sedimentarios por procesos de salinización, debido en parte a la intrusión de agua de mar y en parte a la disolución de evaporitas y salmueras hipersalinos que se producen en condiciones reductoras (Sodde & Barrocu, 2006).

<sup>13</sup> Los valores de la referencia, se presentan en forma de conductividad eléctrica (uS/cm), pero conociendo que la conductividad es inversa a la resistividad, se realizó la transformación.

<sup>14</sup> Agua que contiene más sal inorgánica disuelta que el agua de mar habitual.

Tabla 8- 7. Valores de resistividad de algunos tipos de agua

Tipo de agua	Resistividad ( $\Omega.m$ )
Agua dulce	5 - 100
Agua Salobre	2 - 5
Agua de mar	0,22 - 2
Salmuera	0,1 - 0,22

164. En los estudios realizados por Nowroozi et al. (1999) & Bauer et al. (2006), se presenta valores de resistividad de agua salada inferiores a  $1,0 \Omega.m$  y mencionan que el agua de mar en particular, presenta una media de  $0,2 \Omega.m$ ; mientras que las capas saturadas de agua salada y sólidos totales disueltos, presentan valores de resistividad en el rango de 8 a  $50 \Omega.m$ .

165. En resumen, estos estudios demostrarían la influencia marina sobre zonas costeras (deltas), identificada mediante el contraste de resistividades usada en la técnica de tomografía geoelectrica. Lo valores bajos de resistividad que llegan incluso hasta los  $0,05 \Omega.m$  (Oyeyemimuy et al. 2015), son relacionados directamente a perturbaciones del medio costero por intrusión marina. La discusión se centra en definir, el límite en los valores de resistividad que puedan establecerse como producto de una intrusión marina netamente; para lo cual, conforme la Tabla 8- 7, un nivel bastante aceptado, son los valores de resistividad hasta los  $4,5 \Omega.m$ , los mismos que son relacionados a la intrusión del agua de mar en diferentes medios.

166. Por encima de estos valores de resistividad, la influencia marina llegaría incluso a valores de resistividad hasta de  $50 \Omega.m$  (Nowroozi et al. 1999 & Bauer et al. 2006), pudiendo relacionarse estos, como zonas de mezcla de tipo salobre con más o menos influencia del agua de mar en el acuífero; todo ello tomando en consideración el medio que las contiene (estrato) y las características propias del acuífero. No obstante, considerando las particularidades de la zona de estudio, como la agricultura intensiva, así como las condiciones climatológicas secas (por lo cual no existiría una recarga activa o dinámica del acuífero Mejía), estos valores podrían variar relativamente.

167. Dicho lo anterior, se presenta el análisis de las nueve (9) tomografías geoelectricas diferenciadas en 3 zonas, estableciendo los límites de la instrucción marina y la correlación con los diferentes medios en función a las resistividades encontradas; asimismo, se brindará (en función a su calidad) el alcance en profundidad del nivel de agua dulce presentado en el acuífero Mejía.

## ANÁLISIS DE LA ZONA I

168. Para el caso de la Zona I, los perfiles de tomografía paralelos a la línea de costa (TG-1 y TG-3), pueden evidenciar la forma en la cual se van depositando los sedimentos conforme uno se va alejando de la fuente principal (río Tambo) y la manera que se ven estos influenciados por la presencia de la intrusión marina en su estructura. Mientras que el perfil TG-2 ubicado perpendicularmente a la línea de costa, puede brindar información adicional sobre el alcance o influencia que tendría la intrusión marina hacia la parte continental.

169. La TG-2 y la TG-3 alcanzaron profundidades alrededor de los 200 m, mientras que la TG-1 alcanzó una profundidad de 172 m, como se observa, estas tres tomografías, se pueden evaluar en su conjunto por tener profundidades similares.
170. La TG-1 (Figura 8- 19) se ubicó en la zona más próxima al cauce principal del río Tambo, en la cual se observa el rango más amplio de resistividades (0,46 – 400  $\Omega$ .m) de la Zona I, donde se pueden apreciar estructuras paralelas en capas con distintas características litológicas. Además, se evidencia, conforme a las resistividades observadas en el perfil que llegan hasta los 400  $\Omega$ .m, la influencia que ejerce el agua del río Tambo sobre la estructura de los sedimentos. Las bajas resistividades (0,46 – 7,15  $\Omega$ .m) pueden corresponder a cuerpos arcillosos o arenas porosas a muy porosas asociadas a aguas muy salinas o agua de mar, la cual empieza a los 40 m hasta los 100 m de profundidad y se va haciendo más angosta conforme se acerca al río Tambo.

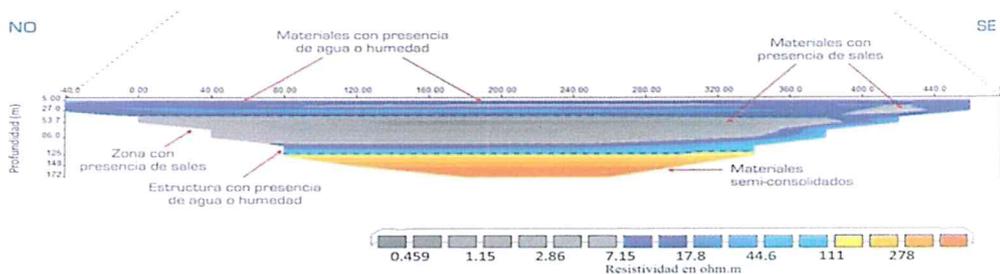


Figura 8- 19. Tomografía geoelectrica-1

171. Sin embargo debajo de esta estructura, se presenta estructuras con las resistividades más elevadas del perfil, las cuales pueden corresponder a un medio impermeable o consolidado. Finalmente, la zona del acuífero considerada como agua dulce (mala calidad), se encuentra hasta los 40 m de profundidad.
172. La TG-2 (Figura 8- 20) ejecutada aproximadamente a 0,4 Km de distancia de forma perpendicular a la línea de costa entre dos lagunas ubicadas en la zona sur del SNLM, es la más alejada al río Tambo. La TG-2 (a 0,3 km al norte de la TG-1), presenta características eléctricas muy diferentes a la anterior, su rango de resistividades es más pequeño (0,07 – 32,2  $\Omega$ .m). Debido a su orientación perpendicular a la línea de costa, en esta zona se puede presenciar una intrusión marina más activa. La zona del acuífero de agua dulce (de intermedia a mala calidad) en la primera parte del perfil presentan una profundidad de 30 m y mientras esta se va alejando de la línea de costa la zona, llega a un espesor hasta de 40 m.

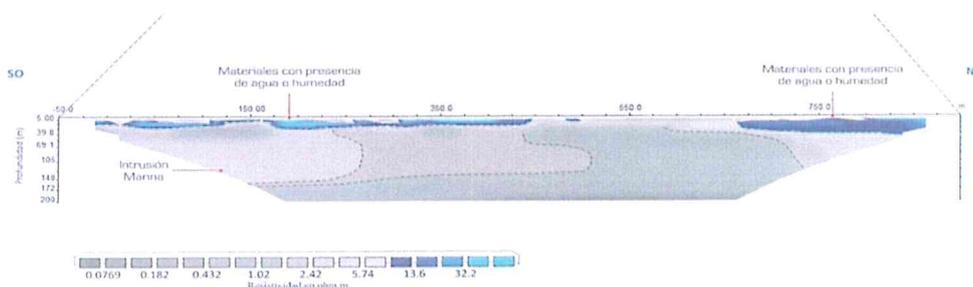


Figura 8- 20. Tomografía geoelectrica-2 (TG-2)

173. La TG-3 (Figura 8- 21) ejecutada aproximadamente a 1,2 Km en forma paralela a la línea de costa en la parte central de la zona del SNLM; se ubica a 1,3 km al norte de la TG-2. Esta tomografía presenta un rango de resistividades aún más reducido (0,15 - 4,28  $\Omega$ .m) que la TG-2, esto quiere decir que la presencia marina en este medio es aún más notoria, saturando el acuífero Mejía casi en su totalidad. Hasta los 120 m de profundidad, se puede apreciar estructuras como características litológicas muy similares respecto a su porosidad y permeabilidad (arenas muy porosas o arcilla saturada), por lo cual se pueden interpretar estas, como una sola estructura saturada con agua salina.

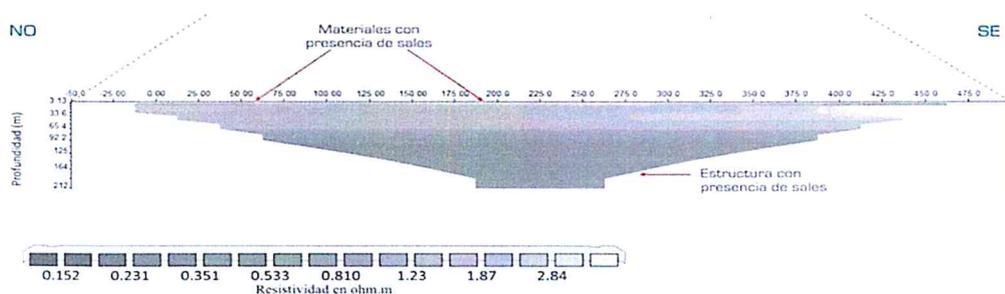


Figura 8- 21. Tomografía geoelectrica-3

174. Debajo de esta, se presenta una estructura uniforme, la cual presenta las resistividades más bajas encontradas en este perfil (0,15 – 0,2  $\Omega$ .m), estas resistividades podrían deberse a la presencia de aguas marinas con concentraciones extremas en sales (salmueras hipersalinas).
175. Los resultados de estas tres tomografías indican, que conforme se va alejando del cauce del río Tambo, la influencia del agua marina va ganando importancia, puesto que las resistividades del perfil presentan un rango más estrecho, tendiendo a resistividades cada vez más bajas, las que corresponderían a litologías influenciadas fuertemente por agua de mar muy salina.

## ANÁLISIS DE LA ZONA II

176. En el caso de la Zona II, la TG-4, TG-5 y la TG-6, evidencian la forma en la cual se van depositando los sedimentos conforme uno se va alejando de la fuente principal (río Tambo) y la manera que se ven estos influenciados por la presencia de la intrusión marina en su estructura. No obstante, la diferencia en esta Zona, es que se desarrolla actividad agrícola intensiva, la cual estaría influenciando en la parte superior del acuífero Mejía, aportando agua con contenido en sales.
177. La TG-4 y TG-6 alcanzaron profundidades similares (197 y 215 m respectivamente), de esta manera estas dos tomografías se pueden evaluar en su conjunto por tener profundidades similares. Mientras que la TG-5 alcanzó la profundidad de 345 m, la mayor de todas las tomografías realizadas en este estudio, permitiendo conocer las estructuras más profundas que puedan ubicarse en esta zona de estudio.
178. La TG-4 (Figura 8- 22) ejecutada aproximadamente a 2,2 Km de distancia en forma perpendicular a la desembocadura del río Tambo y a un 700 m de su cauce principal; se ubica cercana al cauce principal del río Tambo (al igual que la TG-1 de la Zona I), con la diferencia que esta se ubica a una distancia más

próxima al río Tambo (700 m), además de estar a más distancia de la línea de costa (2,2 Km), a pesar de ello, las características litológicas se podrían considerar similares. El rango de resistividades, aunque menor, se mantiene en un rango amplio (0,31 – 200  $\Omega.m$ ), observándose la influencia que ejerce las aguas del río Tambo y una disminución de la intrusión marina; esto puede evidenciarse con la disminución de la potencia (40 m) de la estructura salina presente de la TG-1, volviéndose esta, más somera y menos profunda, desapareciendo al acercarse al río Tambo.

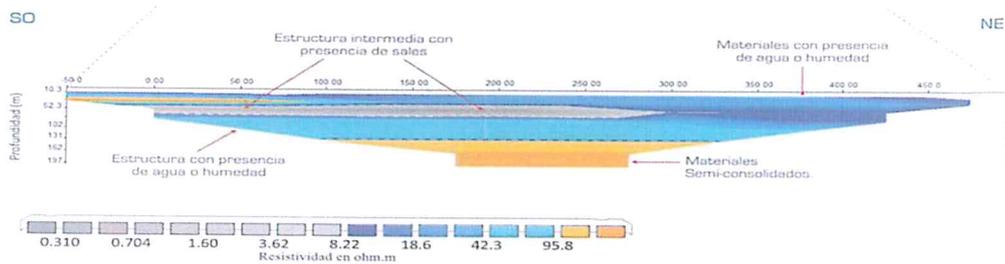


Figura 8- 22. Tomografía geoelectrica-4

179. Una diferencia de esta tomografía con la TG-1, sería la existencia de un acuífero con aguas de buena calidad, con una potencia importante (60 m), la cual aparece justo debajo de la estructura salina; mientras que la estructura con las resistividades más elevadas presentes en el perfil aparece recién debajo de esta. Finalmente, la zona del acuífero (superficial) considerada como agua dulce (mala calidad), se encuentra hasta los 40 m de profundidad.

180. La TG-5 (Figura 8- 23) ejecutada a continuación de la TG-2 conservando la misma dirección (perpendicular a la línea de costa); se encuentra ubicada en área netamente de cultivo; con la distinción que esta alcanzó una profundidad mayor (345 m). Esta tomografía presenta características eléctricas similares que la TG-2, puesto que su rango de resistividades se mantiene (0,12 - 83,5  $\Omega.m$ ), pero con un incremento en las mayores resistividades; esto debido a la disminución de influencia marina al alejarse de la línea de costa; no obstante la influencia de la zona agrícola se hace cada vez más presente.

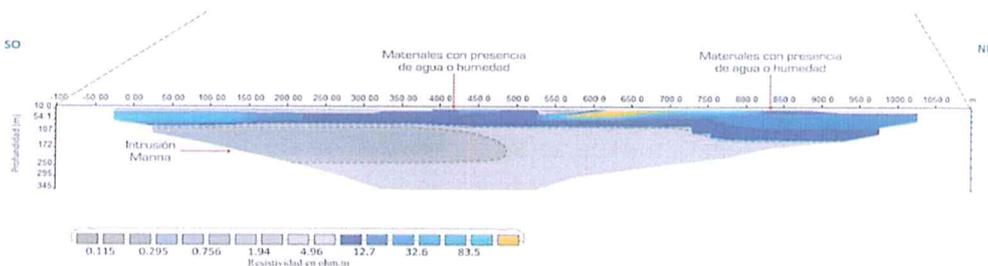


Figura 8- 23. Tomografía geoelectrica-5

181. Lo más resaltante de la TG-5, es su profundidad, en ella se puede observar una estructura uniforme bastante potente (265 m en su parte más amplia), conformada posiblemente de arenas o arenas arcillosas saturadas con agua salina; esta estructura se ve interrumpida por la presencia de una intrusión marina que desaparece conforme se aleja de la línea de costa. Finalmente, el acuífero con agua dulce de mala calidad se encuentra a una profundidad de 75 m al inicio del perfil y se expande hasta los 100 m al final de este.

182. La TG-6 (Figura 8- 24) ejecutada aproximadamente a 1,7 Km de distancia a la línea de costa en la zona central de las áreas de cultivo; se ubica a 0,75 km al noreste de la TG-3. Esta tomografía presenta un rango de resistividades reducido (0,06 - 18,5  $\Omega$ .m), con la diferencia del incremento en profundidad (100 m) de las resistividades en la parte media del perfil (mientras más se aleja de la línea de costa), así como, en su parte superficial; Además, se puede apreciar cambios en la litología más pronunciados, una menor influencia marina y mayor de actividad agrícola.

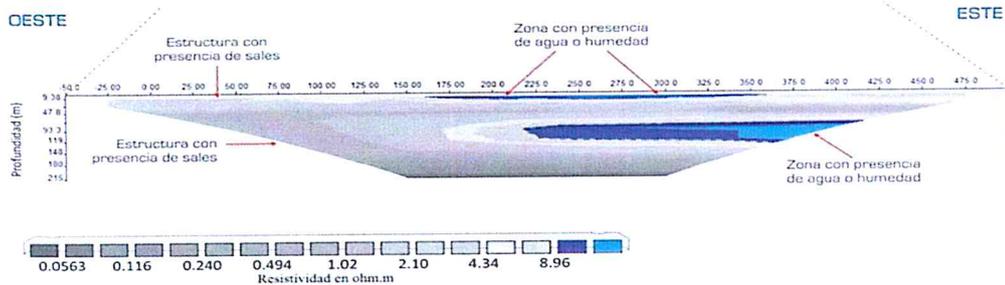


Figura 8- 24. Tomografía geoelectrica-6

183. En esta tomografía, se puede observar la presencia de capa intermedia con agua salobre o agua dulce de mala calidad en la parte final del perfil, lo que demuestra que la intrusión marina va perdiendo influencia sobre el acuífero Mejía. Un aspecto importante es que la estructura uniforme y paralela identificada en la TG-3 (a los 120 metros de profundidad), definida como una zona con concentraciones muy elevadas en sales, se presenta aquí, a unos 150 m, pero con resistividades con un rango más amplio (0,06 – 0,5  $\Omega$ .m), esto también demostraría una menor influencia marina y un descenso de esta estructura en profundidad.
184. Los resultados de estas tres tomografías indican, que la influencia de la intrusión marina disminuye y en la zona con agua salobre del acuífero Mejía se hace más potente. Además en esta Zona se ubica la tomografía que alcanzó mayor profundidad (TG-5), no lográndose visualizar el basamento o roca madre.

### ANÁLISIS DE LA ZONA III

185. Finalmente, en la Zona 3, la TG-7, TG-8 y TG-9, que se ubican en el límite de la ladera del cerro, esta zona también estaría influenciada por la actividad agrícola, pero de una manera menos activa, estos perfiles son los que se encuentran más alejados del río Tambo y de la línea de costa, por esta razón, son las que nos muestran señales del alcance de la influencia marina.
186. La TG-7 y TG-9 alcanzaron profundidades similares (250 y 200 m) y de esta manera podrían ser comparadas. Mientras que la TG-6 (La más pequeña del estudio) alcanzó una profundidad de 85 m, la cual permitiría conocer las estructuras más superficiales que puedan ubicarse en esta zona de estudio y con un nivel de detalle más preciso.
187. Siguiendo una línea perpendicular a la línea de costa, la TG-7 (Figura 8- 25) ejecutada aproximadamente a 2,8 Km en forma perpendicular a la línea de costa, ubicada en la parte norte de las áreas de cultivo; se ubica después de la

TG-3 y TG-6. Esta tomografía fue la más alejada de las tres de la línea de costa (2.88 Km), el rango de resistividad se presenta de 0,12 a 30,0  $\Omega$ .m, esto nos indica que las resistividades más bajas se mantienen en los tres perfiles señalados; lo particular en esta tomografía, es que la mayor resistividad alcanzada en la parte superior del perfil es mayor a las otras dos, lo que nos indica que si bien la influencia marina se hace menor en profundidad, el acuífero con agua de mala calidad se hace presente y alcanza una profundidad de 60 m.

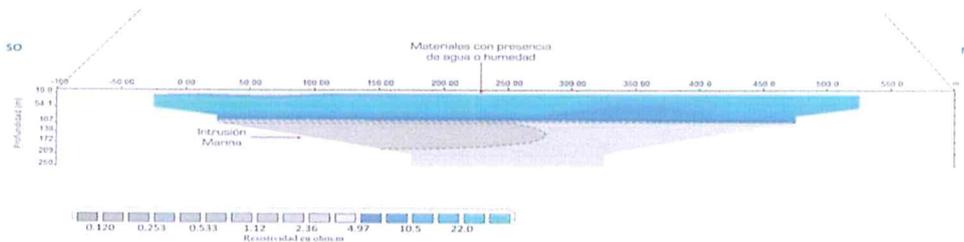


Figura 8- 25. Tomografía geoelectrica-7

188. Esta tomografía presenta similar configuración a la TG-5 (Zona II), la diferencia, es que la intrusión marina observada en la TG-5, se vuelve menos potente, se elevan sus resistividades, lo que demuestra que el contenido en sales es menor, desapareciendo conforme se aleja de la línea de costa. Finalmente, el agua dulce de mala calidad se encuentra hasta una profundidad de 60 m. y el acuífero con agua salobre (zona de mezcla) se extiende debajo de esta, hasta los 85 metros de profundidad.

189. La TG-8 (Figura 8- 26) ejecutada aproximadamente a 3,1 Km en forma perpendicular a la línea de costa, ubicada en la zona norte de las áreas de cultivo y a 0,5 km al noreste de la TG-7; es por ello que el rango de las resistividades se vuelve más amplio (0,31 - 110,0  $\Omega$ .m). En esta tomografía se presenta también la influencia marina, esto por las resistividades bajas encontradas menores a 2.0  $\Omega$ .m; el acuífero por encima de este se encuentra hasta los 50 m de profundidad, la particularidad es que en esta parte del acuífero la calidad del agua es de intermedia a buena. Otra aspecto que llama la atención, debido al nivel de detalle que alcanza esta tomografía, es que dentro de este acuífero se encuentran cuerpos de arcilla o zonas con alto contenido de sales de 10 m de espesor y sobre los mismos, un nivel de también de agua de calidad intermedia a buena, hasta los 10 m de profundidad.

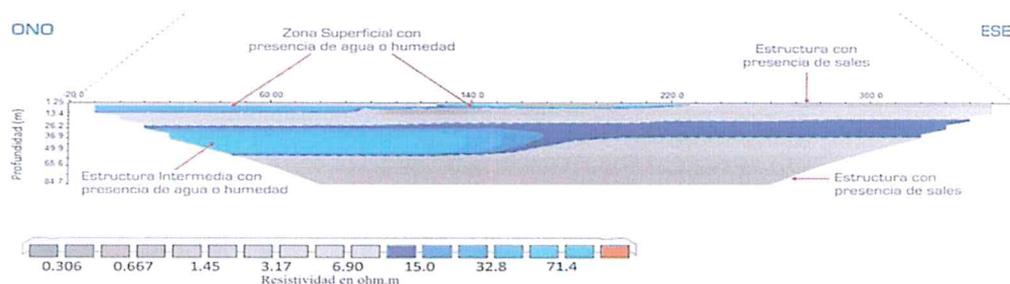


Figura 8- 26. Tomografía geoelectrica-8

190. La TG-9 (Figura 8- 27) ejecutada aproximadamente a 5,3 Km en forma paralela a la línea de costa; ubicada a 2 Km de las TG-7 y TG-8 en la zona agrícola (al pie de la ladera del cerro); presenta el rango de resistividades más amplio registrado

en todas la tomografías realizadas (1,93 – 604,0  $\Omega$ .m), la zona con calidad de agua salobre (10,0 – 15,0  $\Omega$ .m), que se podría caracterizar como una zona de mezcla con mayor espesor (desde los 40 m de hasta los 160 m profundidad en el inicio del perfil) y al final del perfil, aparece una zona limo arcillosa, así como material consolidado cercano a la ladera del cerro. Debido a su ubicación (5,3 Km de la zona de la línea de costa), esta tomografía muestra el alcance de la intrusión marina.

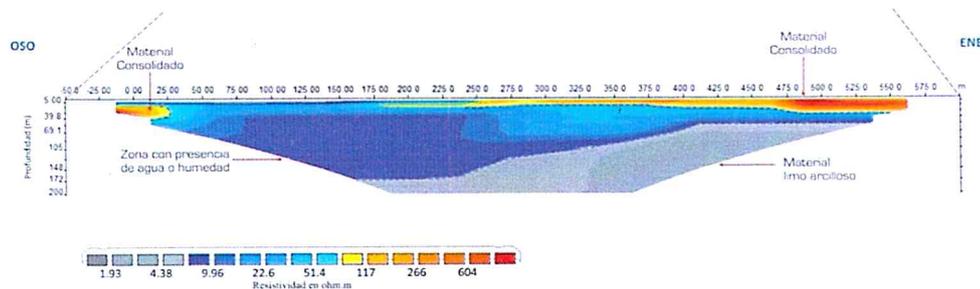


Figura 8- 27.Tomografía geoelectrica-9

191. Los resultados de estas tres tomografías, indican que la influencia del agua marina mantiene en la zona de la TG-7 y TG-8, debido a las bajas resistividades registradas (0,12 -0,31  $\Omega$ .m). Además, en esta zona se puede observar que la influencia de la intrusión marina disminuye y en la zona con agua salobre del acuífero Mejía presenta mayor espesor. Esta información se confirma en la tomografía TG-9, puesto a que las resistividades menores a los 2,0  $\Omega$ .m, que caracterizaban a zonas con una importante influencia de la intrusión marina, no aparecen en este perfil.

## 8.5 Modelo conceptual hidrogeológico

192. Sobre la base de información geológica, hidrogeológica, hidroquímica y geofísica, se propone un modelo conceptual hidrogeológico del área de estudio. Los principales componentes del modelo se enfocan en la ocurrencia del agua subterránea, la interacción agua-roca, intrusión marina, la recarga y la descarga del sistema (ver Figura 8- 28, Figura 8- 29, Figura 8- 30 y Figura 8- 31). El modelo pretende mostrar el comportamiento del agua subterránea en dos escenarios distintos; en el Proyecto Tía María y en el acuífero Mejía, para lo cual se han elaborado secciones hidrogeológicas cuyo sustento es presentado a continuación.

### Unidades hidrogeológicas

#### a. Acuitardo Basamento

193. Esta unidad hidrogeológica integra rocas metamórficas (gneis), sedimentarias (areniscas, conglomerados y lutitas), intrusivas (granodiorita, monzonitas y dioritas) y volcánicas (lavas andesíticas y dacíticas). Estas litologías se caracterizan en la zona de estudio como materiales poco permeables, el cual se sustenta con los valores obtenidos de la permeabilidad entre  $2,53 \times 10^{-04}$  a  $1,02 \times 10^{-01}$  m/día. El basamento acuitardo infrayase al acuífero Mejía, posiblemente se localiza a partir de profundidades variadas entre los 150 a 250 metros en áreas cercanos a las lagunas de Mejía y conforme se aleja de la línea de costa

el basamento acuitardo aflora hacia la superficie, esto conforme a la interpretación geológica e hidrogeológica (ver Figura 8- 28 y Figura 8- 29). Por otro lado, el basamento acuitardo en la superficie se pone en contacto con el acuífero Mejía a una distancia de 4 km aproximadamente de la línea de costa.

### b. Acuífero Mejía

194. Por sus condiciones favorables para almacenar y transmitir agua subterránea se ha caracterizado hidrogeológicamente a los depósitos aluviales, fluviales y marinos, como acuífero poroso no consolidado y según su presión hidrostática con acuífero tipo libre. Litológicamente está compuesto por materiales permeables como gravas en matriz arenosa – limosa, arenas limosas, y limos arcillosas, cuyos valores de conductividad hidráulica varían entre los 0,9945 a 6,987 m/día. El acuífero alcanza espesores superiores a los 150 metros en zonas próximas a la línea de costa y se adelgaza hasta los 50 metros a una distancia de 3 km aproximadamente hacia la parte continental. Estos resultados se sustentan con los valores obtenidos de la tomografía eléctrica que indican que a una profundidad de 150 metros los valores de resistividad varían de 15 a 30  $\Omega$ .m.
195. El acuífero Mejía presenta una zona no saturada y una zona saturada en relación a su espesor y/o profundidad; la zona no saturada está comprendida entre la superficie del terreno y la superficie del nivel freático o napa freática, con espesores que varían de 5 hasta 25 metros de profundidad (ver Figura 8- 28 y Figura 8- 29). La zona saturada comienza a partir del nivel piezométrico hasta el límite con el basamento acuitardo; de acuerdo a la interpretación geológica se estimó el espesor saturado mayor a 150 metros en la línea de costa (Lagunas de Mejía), sin embargo esta no pudo ser confirmada con la prospección geofísica. Por otro lado, la zona saturada comprende 3 dominios en relación a las bajas resistividades observados en la geofísica: dominio de agua dulce o continental (A), dominio de zona de mezcla o interfaz (B) y dominio de agua salada o intrusión marina (C).

### Lagunas Mejía

196. Las lagunas de Mejía desde el punto de vista hidrogeológico se caracterizan por presentar niveles piezométricos o freáticos superficiales y subsuperficiales evidenciando así que corresponden a un acuífero tipo libre. Las aguas que las contienen proceden de la mezcla de aguas continentales y aguas de mar, según el análisis hidroquímico realizado, un sector de las lagunas presentan mayor aporte de agua de mar, mientras que las demás lagunas presentan mayor aporte de aguas continentales.

### Nivel del agua

197. El nivel del agua o nivel freático en el acuífero Mejía se sitúan a distintas profundidades en relación a la topografía del terreno y la proximidad al mar. En el mismo SNLM el nivel se encuentra hacia la superficie, provenientes de flujos sub-superficiales provenientes del río Tambo que interceptan la cota topográfica. Con la tomografía eléctrica (método indirecto) se estimó en diferentes perfiles geoeléctricos que el nivel freático (nivel piezométrico) se sitúa en promedio a unos 5 metros de profundidad.

198. En el área del proyecto Tía María "las profundidades de agua medidas varían de 6 a 300 m, (ver Figura 8- 30 y Figura 8- 31). En general la presencia de agua subterránea fue observada a mayores profundidades que los niveles estáticos de agua subterránea, indicando la presencia de zonas discretas permeables. Por otro lado, se encontró agua subterránea a menor profundidad que corresponde a un manantial y filtraciones en la quebrada Rosa María" (*Ausenco Perú SAC, 2013*).

#### Recarga y descarga del sistema

199. De acuerdo con los resultados del análisis hidroquímico y de la observación en campo la recarga del acuífero Mejía proviene principalmente del río Tambo, por dos tipos de mecanismo hidrodinámico: la primera referido a la recarga artificial proveniente del riego de la actividad agrícola con el agua captada del río Tambo en el sector de Cocachacra y la segunda por aporte directo del río Tambo por medio de la filtración lateral. La descarga del acuífero Mejía se da a través de dos mecanismos: (1) por sistema de canales y/o drenajes perpendiculares a las lagunas de Mejía que derivan las aguas hacia el mar; (2) por la elevada evaporación y evapotranspiración característico de los humedales costeros.
200. La recarga de las aguas subterráneas ubicadas en el proyecto Tía María se estimó de acuerdo con el estudio hidroquímico e isotópico realizados. Indicando que posiblemente provienen de precipitaciones pluviales históricas, esta interpretación se sustenta con el estudio realizado por *EAS, (2013)* que indica que "la fuente del agua subterránea en el acuífero roca madre es atribuida a los mega eventos de El Niño ocurridos durante el periodo Holoceno temprano (aproximadamente hace 10 000 años)

#### Aporte de agua de mar (intrusión marina natural)

201. La Figura 8- 28 y Figura 8- 29 muestran la zona de mezcla entre agua dulce y agua salada y/o zona interfaz (B), presenta una disposición inclinada hacia el este y luego una disposición horizontal el cual se encuentra a una profundidad de 50 m aproximadamente de la superficie. Esta estimación se basa en la interpretación de los bajos resistivos observados en la tomografía (4 a 9  $\Omega.m$ ). También se aprecia el dominio extenso del agua salada (C) por debajo de la línea de mezcla y con dirección al este, abarca un espesor aproximadamente mayor a los 150 m, en esta área los valores de resistividad son bajas (0,3 a 4  $\Omega.m$ ). y que posiblemente satura parte del basamento, aunque no se descarta que estos valores pueden estar relacionados a arcillas saturadas. Además, la disposición horizontal del agua salada y la línea de mezcla podría estar relacionado al poco y lento aporte de flujos subterráneos profundos en el acuífero Mejía, que pueden atenuar los flujos de agua salada.

#### Escenario ante un eventual desarrollo del proyecto Tía María

202. En la Figura 8- 31 se muestra el modelo conceptual 2D que corta a los dos tajos proyectados (tajo Tía María y La Tapada) y el río Tambo. El basamento acuitado donde se emplazan los componentes mineros, se caracterizan por ser materiales de baja permeabilidad lo cual indicaría que el tránsito de las aguas subterráneas por medio de estos materiales serían muy lentos.



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Organismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

203. Ante una posible presencia de un agente contaminante en el Pozo PZ-2, este no tendría una afectación directa por un flujo subterráneo al río Tambo. Sin embargo, si el agente contaminante se vierte en las aguas superficiales las consecuencias podrían ser diferentes, ya que la pendiente favorece el rápido tránsito de las aguas superficiales a través de la quebrada y la afectación sería de forma directa al río Tambo.



204. Por otro lado, simulando un agente contaminante en las aguas subterráneas ubicados en el tajo proyectado Tía María en dirección a las Lagunas de Mejía, es poco probable una afectación debido a dos factores: primero, a los materiales poco permeables del basamento acuitardo que determinan un flujo muy lento y segundo, a la distancia de 16,5 km que existe desde las Lagunas de Mejía al Proyecto Tía María, donde el agente contaminante sería diluido en las aguas subterráneas o de lo contrario sería adsorbido en los materiales poco permeables ( ver Figura 8- 32)





PERÚ

Ministerio del Ambiente

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

### MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL 2D A-A' - LAGUNA DE MEJÍA

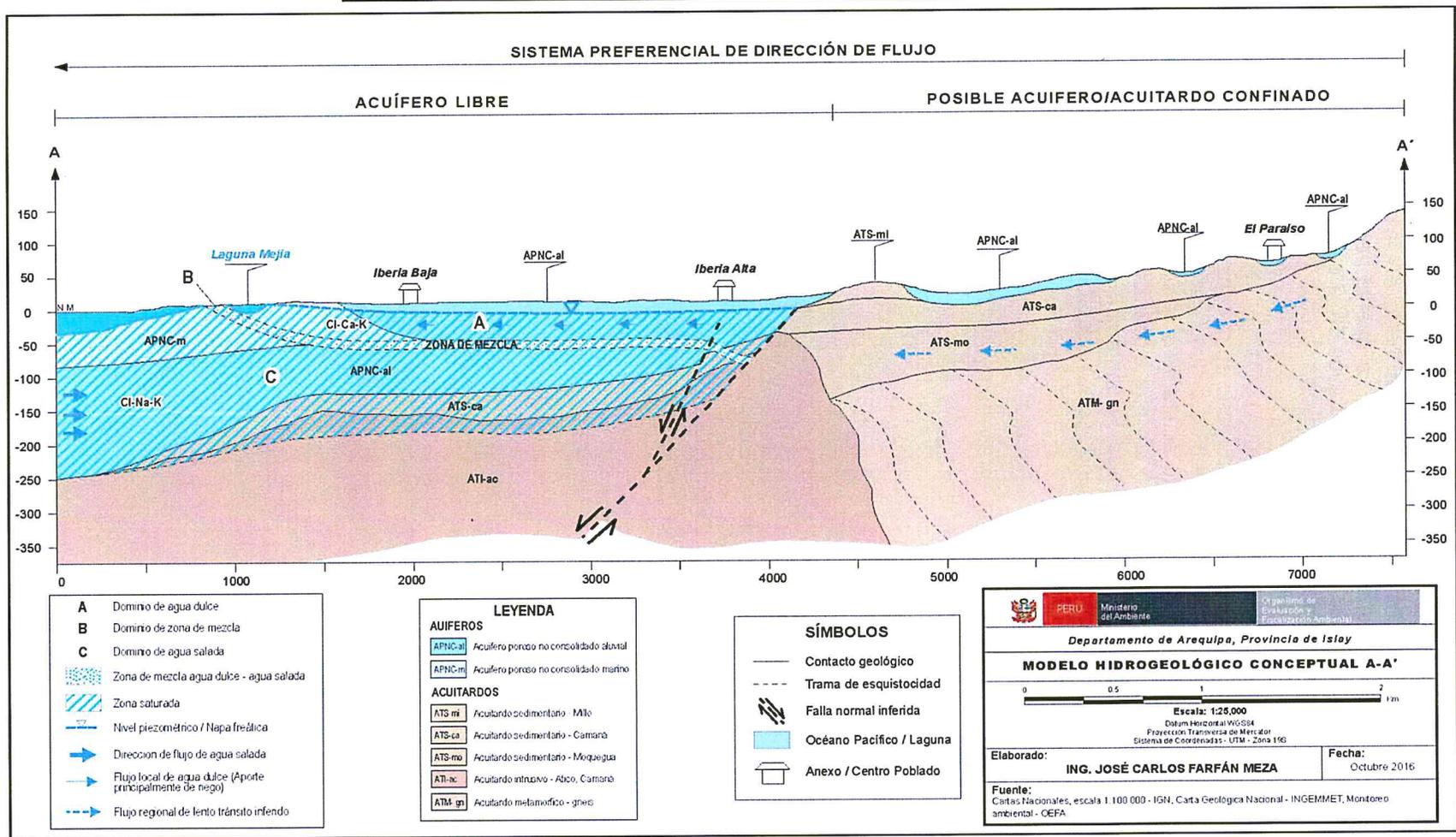


Figura 8- 28. Modelo Hidrogeológico 2D A-A'



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

### MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL 2D B-B' - LAGUNA DE MEJÍA

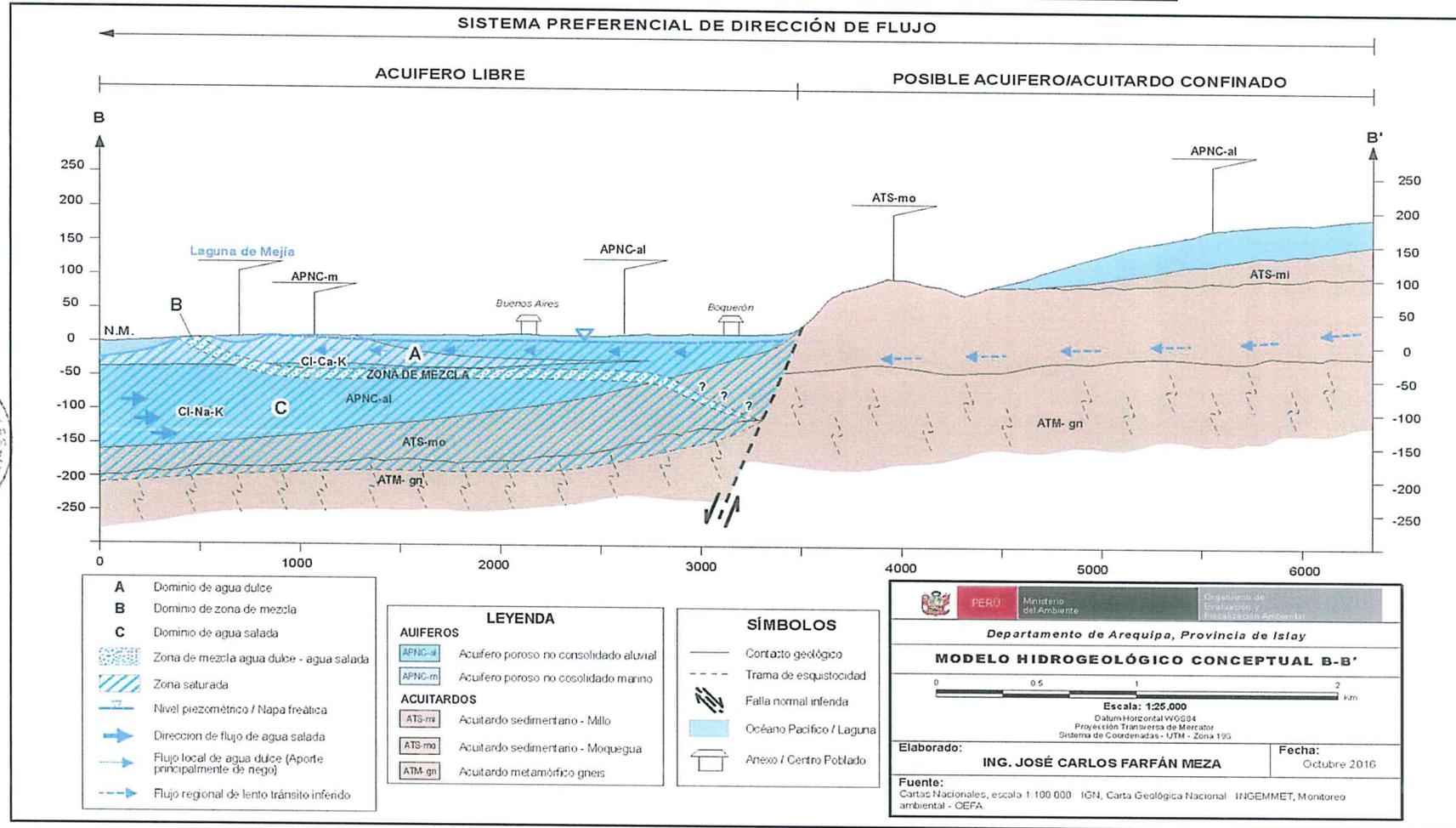


Figura 8- 29. Modelo Hidrogeológico 2D B-B'

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL 2D C-C' - PROYECTO TÍA MARÍA-RÍO TAMBO

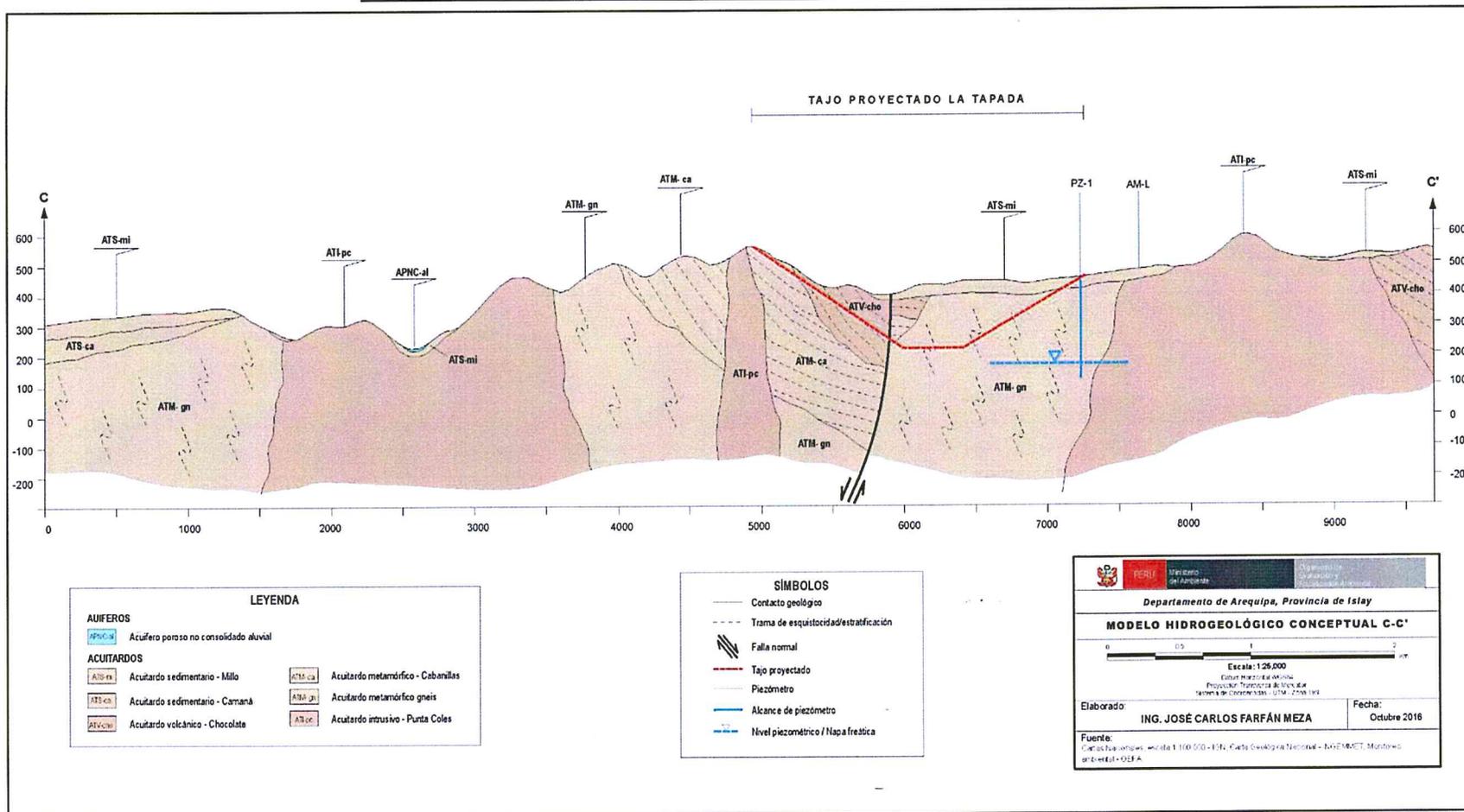


Figura 8- 30. Modelo Hidrogeológico 2D C-C'



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL 2D D-D' - PROYECTO TÍA MARÍA - RÍO TAMBO

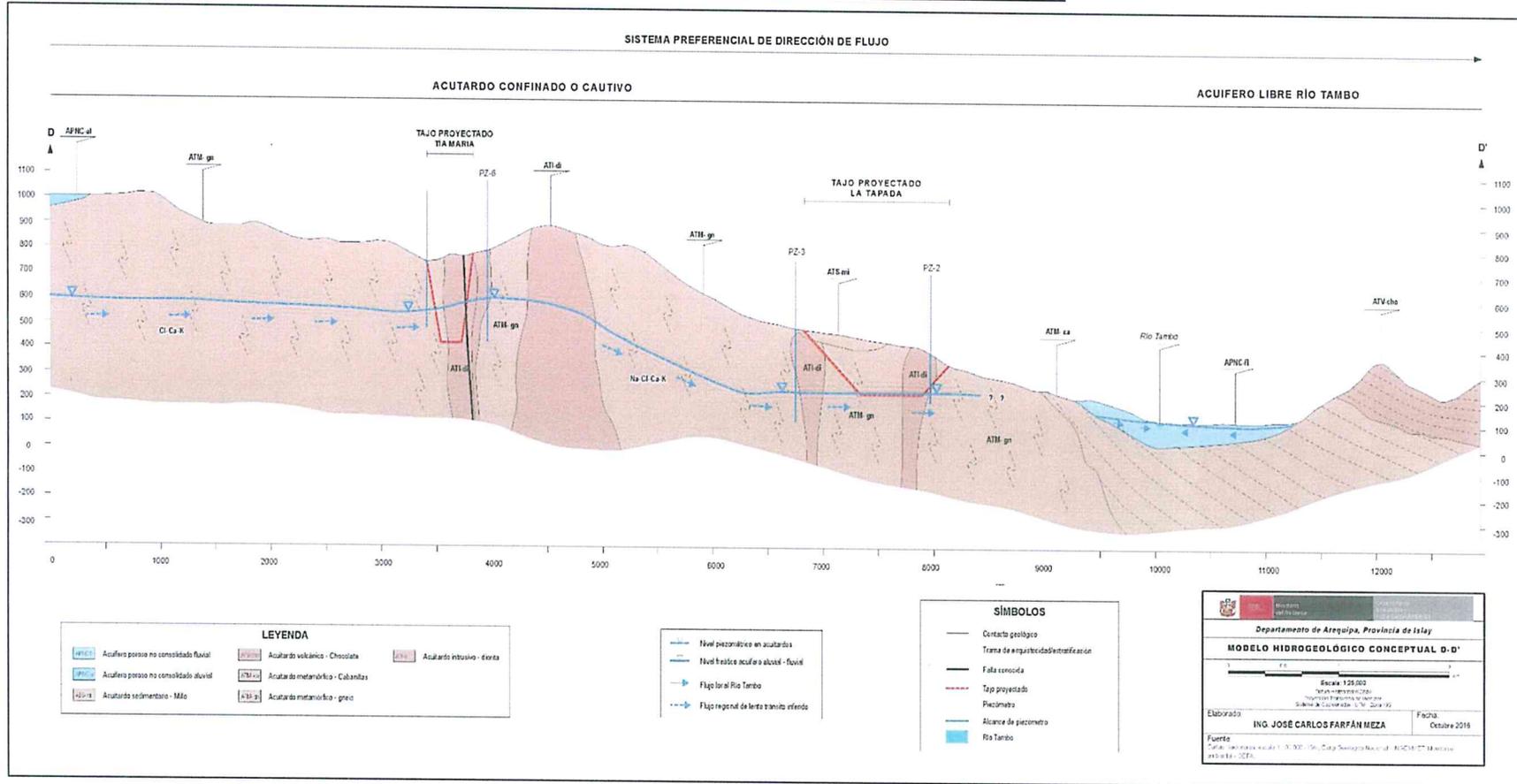


Figura 8-31. Modelo Hidrogeológico 2D



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

### MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL 2D LAGUNA DE MEJÍA - PROYECTO TÍA MARÍA SECCIÓN B-B' y C-C'

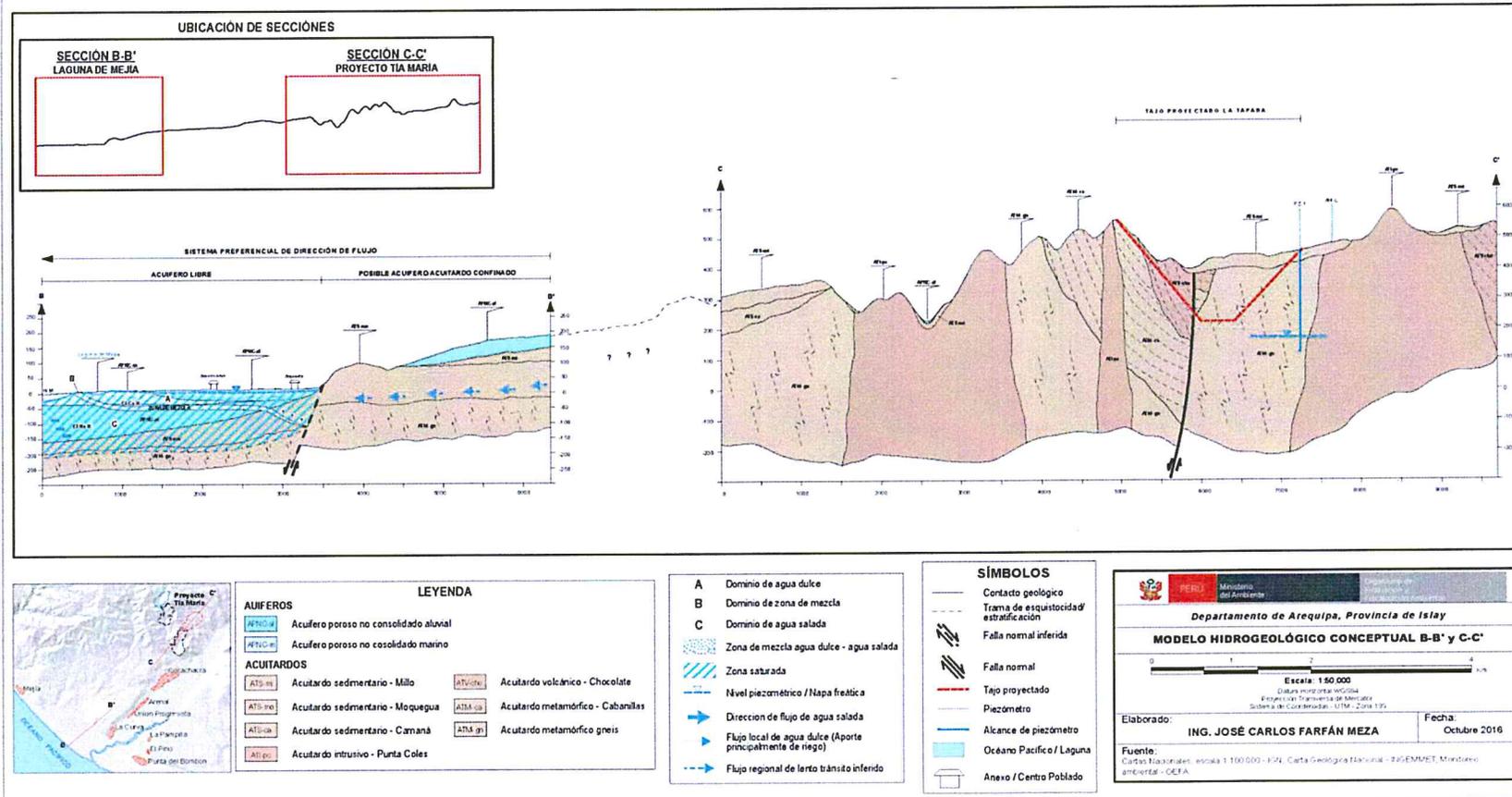


Figura 8- 32. Modelo Hidrogeológico Conceptual 2D Laguna de Mejía

## 9. CONCLUSIONES

205. En la zona de estudio se reconocieron rocas metamórficas, volcánicas, intrusivas, sedimentarias y materiales no consolidados. En el proyecto Tía María predominaron las rocas de tipo gneis de edad precámbrico, caracterizado como roca hospedante de la mineralización provenientes de rocas intrusivas de tipo dioritas y granodioritas y; en el área del Santuario Nacional Lagunas de Mejía presentaron depósitos sedimentarios cuaternarios de origen deltaico, provenientes de la actividad del río Tambo.
206. Se identificaron dos unidades hidrogeológicas principales: el acuífero poroso no consolidado de Mejía con valores de permeabilidad que varían de 0,9945 a 6,987 m/día y los acuitardos correspondientes a rocas metamórficas, volcánicas intrusivas y sedimentarias con valores que varían de  $2,53 \times 10^{-04}$  a  $1,02 \times 10^{-01}$  m/día.
207. Las aguas del proyecto Tía María, río Tambo y Lagunas de Mejía se clasificaron en dos tipos de facies, la facie clorurada cálcica y sódico-potásica agrupó a los puntos PZ-1 al PZ-4 y PZ-8 (piezómetros) y a los puntos AG-88 y AG-109 (manantial y filtraciones) y la facie clorurada sódico-potásica agrupó a las lagunas de Mejía, Sur, Iberia y Boquerón, así como a los puntos PZ-6, PZ-7 y SA-01(piezómetros).
208. Los puntos PZ-1 al PZ-8, SA-1 (piezómetros), AG-88 y el AG-89 (manantial y filtraciones) del ámbito del proyecto de Tía María presentaron un sistema de flujo regional, lo que obedecería al mayor tiempo de residencia y circulación en la unidad hidrogeológica.
209. Las relaciones iónicas  $rNa/rCl$  y  $rMg-Ca/rCl$  determinaron que los puntos AG-97, AG-99 y AG-106 (lagunas de Mejía) corresponden a agua de mezcla (agua continental y agua marina) con mayor presencia de agua de mar y; los puntos AG-88, AG-109, PZ-1 al PZ-8 y SA-1 (agua subterránea) corresponden a aguas continentales, cuyo origen estaría asociada a la alteración de rocas intrusivas. Por otro lado, los puntos AG-89 al AG-91 (río Tambo); AG-92 al AG-94, AG-100 al AG-105, AG-107 y AG-108 (lagunas de Mejía), presentarían características hidroquímicas relacionadas al lavado de materiales aluviales y marinos; sin embargo, se precisa que los últimos puntos ubicados en la laguna de Mejía, corresponden a agua de mezcla (agua continental y agua marina) pero con mayor influencia de aguas continentales.
210. Las relación iónica  $rB/rCl$  definieron que las aguas subterráneas (PZ-1 al PZ-8, AG-88 y AG-109) presentaron concentraciones menores a 1 meq/L, mientras que los puntos ubicados en el río Tambo presentaron valores superiores a 1 meq/L, evidenciando que la procedencia de la recarga del acuífero Mejía proviene principalmente del río Tambo; por otro lado, los valores mayores a 1 meq/L obtenidos en las lagunas de mejía (1,72 a 3,11 meq/L) estaría atribuida a las actividades antrópicas relacionadas al uso de fertilizantes en la actividad agrícola y/o al vertimiento de aguas residuales de poblaciones adyacentes.
211. Las aguas subterráneas del ámbito del proyecto Tía María se presentaron distantes a la línea GMWL, lo que evidenciaría que sufrieron evaporación antes

de su infiltración en el subsuelo; así como la interacción prolongada de agua-roca.

212. La recarga de las lagunas de Mejía (acuífero libre) proviene principalmente por el aporte del río Tambo a través de sistemas de riego por inundación aplicados en la actividad agrícola, ratificándose con el análisis hidroquímico realizado y; su descarga se realiza por medio de drenajes que evacúan al mar y por procesos de evaporación y evapotranspiración y; la recarga de las aguas subterráneas ubicadas en el proyecto Tía María se asocian a precipitaciones pluviales históricas que podrían estar asociadas a eventos del fenómeno El Niño.
213. Debido a las condiciones hidrogeológicas superficiales observadas en el SNLM (nivel de agua poco profunda o rápida escorrentía superficial), evidenciaría la saturación del acuífero, sobre todo en el sector donde se ubican las lagunas; sin embargo, conforme al análisis geológico, la zona del acuífero poroso no consolidado (zona no saturada) presentaría hasta una profundidad de 25 metros. A partir de esta profundidad ( 25 m ), y conforme a los valores de resistividad eléctrica de 15 - 30  $\Omega$ .m, se presenta la zona correspondiente al acuífero poroso no consolidado (zona saturada), conformado por estructuras de distintas características litologías deltaicas (gravas, arenas, limos y arcillas) con buen potencial de retención de agua en sus poros; esta zona se ubicaría en promedio, hasta una profundidad de 50 metros; seguido, se ubicaría la parte del acuífero considerada como zona de mezcla (aguas marinas y continentales); la cual, presentaría resistividades en el rango de 10 - 25  $\Omega$ .m y tendría un espesor de unos 10 metros en promedio. Finalmente, debajo de esta zona, se presentaría el acuífero poroso no consolidado (saturado – ambiente marino) con valores de resistividad menores a los 10 - 25  $\Omega$ .m.
214. La mayor profundidad alcanzada en este estudio se observó a través de la tomografía TG-5 (300 m), la cual sugiere que los depósitos cuaternarios en el delta del Tambo (acuífero Mejía) presentarían un espesor importante, puesto que no se logró identificar ningún medio consolidado que pueda corresponder al basamento o roca madre.
215. Los valores de resistividad observados en casi todos los perfiles de tomografía, muestran que la intrusión marina está presente de manera importante en la zona del SNLM; no obstante, en las zonas cercanas al río Tambo, esta intrusión es menos evidente; esta condición se debería a que el aporte de las aguas del río Tambo serían la principal fuente de recarga activa del acuífero Mejía y en menor medida, un aporte del agua provenientes de las irrigaciones la Ensenada.
216. En la zona media del SNLM se observa una mayor influencia de la intrusión marina por debajo del acuífero; donde se ubican las tomografías TG-3 (Zona I), TG-6 (Zona II) y TG-7 (Zona III) emplazadas de forma perpendicular a la línea de costa; esto debido a los bajos valores de resistividad relacionados principalmente a las aguas con un alto contenido de sales disueltas (agua de mar); esta condición se evidencia mejor en la zona más próxima a la línea de costa (TG-3), donde casi no hay presencia de agua dulce; no obstante, conforme se observa en la TG-7, el alcance de la intrusión marina disminuye, presentándose recién a una profundidad de 60 metros en la zona más continental (2,88 km de la línea de costa).



217. No se evidenció un flujo subterráneo profundo de aguas continentales en el acuífero Mejía que pueda atenuar la intrusión marina existente; por tanto, se presume que sería poco probable la existencia de un flujo subterráneo proveniente del proyecto Tía María hacia las lagunas de Mejía.

## 10. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

**Appelo, C., & Postma, D. (2005).** Geochemistry, groundwater and pollution 2nd edition. Amsterdam, the Netherlands: A.A. Balkema Publishers.

**Ángeles, S., Rosales, L. & Ramos J. (2004).** Características de flujos regionales, y su manifestación, tres casos en México, Instituto de Geografía de México.

**Arche, A. (2010).** Sedimentología: del proceso físico a la cuenca sedimentaria – Catalogo general de publicaciones oficiales; Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España 1289 p.

**Arias, M. (2002).** La prospección geoelectrica y electromagnética en dos dimensiones y su aplicación en la hidrogeología. *Revista Geológica de América Central*, 27, 21-26.

**Ausenco Perú SAC, (2013).** Estudio Hidrogeológico del Proyecto Tía María, para Southern Perú Copper Corporation, 304p

**Adeoti, L., Alile, O. M. and Uchegbulam, O. (2010).** Geophysical investigation of saline water intrusion into freshwater aquifers: A case study of Oniru, Lagos State. *Scientific Research and Essays Vol. 5 (3)*, pp. 248-259, 4 February, 2010. Pg. 248.

**APHA (American Public Health Association), (1995).** Standard Methods for the examination of water and wastewater, 19th ed., New York, 769 pp.

**Bauer, P., Supper, R., Zimmermann, S. and Kinzelbach, W. (2006).** Geoelectrical Imaging of groundwater salinization in the Okavango Delta, Botswana, *Journal of Applied Geophysics*, Vol.60, pp. 126–141.

**Bellido E. Guevara C. (1963).** Geología de los cuadrángulos de Punta de Bombón y Cledesí. *Boletín N° 5 Comisión Carta Geológica Nacional*. 92 p.

**Bellido, E y Narváez. S. (1960).** Geología del Cuadrángulo de Atíco, *Carta Geológica Nacional*, Vol.1 N° 2, Lima.

**Busque, A., Casas, A., Pinto, V., Rivero, I., Sdabadía, J.B. (1996).** Geofísica ambiental: técnicas no destructivas para el reconocimiento de zonas contaminadas por vertidos. *Acta Geológica hispánica*, v.30 (1995), nº 1-3, p. 73-82 (Pub.1996).

**Cardona A., Del Conde J.P., Joel Carrillo-Rivera J. (2000).** Salinización del agua subterránea en un acuífero costero de la zona árida del noroeste de México: fuentes, mecanismos y reacciones químicas. 1st Joint World Congress on Groundwater.





PERÚ

Ministerio  
del AmbienteOrganismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

**Castany, G. (1975).** Prospección y explotación de las aguas subterráneas. Barcelona: Omega, 738 p.

**Castany, G. (1971).** Tratado práctico de las aguas subterráneas. Barcelona: Omega, 672 p.

**Custodio, E. & Llamas, M. (1996).** Hidrología subterránea. 2a. ed. Barcelona: Omega, 2

**Custodio, E. / Llamas M. R. (2001).** Hidrología Subterránea. Segunda Edición. Capítulo 14.1, 1393-1407.

**Delleur J.W. (1999).** The Handbook of groundwater engineering. CRC Press. 945 p.

**Ego-Aguirre & Smuda, (2013).** Estudio Hidroquímico e Isotópico de La Zona del Proyecto Tía María, Southern Perú Copper Corporation.

**Fetter, C. (1980).** Applied Hydrogeology (Fourth Edition ed.). Estados Unidos de América: Prentice Hall.

**Geuna S.E. (2013).** "Prospección-Exploración" Módulo 2: Carrera de Especialización en Geología Minera – Materia "Prospección geofísica terrestre" – UBA

**GEF-ONUDI-IMARPE-IFOP (2002).** Proyecto manejo integrado gran ecosistema marino de la corriente de Humboldt. Modulo I – Productividad.

**Geotomo Software Malaysia (2011).** Geoelectrical Imaging 2d & 3d. Malaysia: Autor.

**Gómez, J., Caldache, M. & Duque, C. (2010).** Origen de la salinidad de las aguas subterráneas del sistema acuífero costero de Torre Vieja: Aspectos

**Heubeck C., Raitzsch M., Völker D., Wiedicke-Hombach M., (2010).** Geología Marina de Chile Capítulo 6, Sedimentación, p52.

**Hidroquímicos.** Departamento de Geodinámica. Universidad de Granada, España- Geogaceta, 48-2010, 4p.

**Levent, Y., Demirci, A., & Ertekin, C. (2008).** Delineation of the seawater-freshwater interface from the coastal alluvium of Kalekoy-Gokceada, NW Turkey. Journal of Applied Sciences 8 (10): 1997-1981, 32018. ISSN 1812-5654. Pg. 1979.

**López, J., Rey, J., Sandoval, S. & Rodríguez, M. (2007).** La tomografía eléctrica: una herramienta para la detección de huecos mineros (concesión de Arrayanes, Linares-Jaén). *Geogaceta*, 42, 43-46.

**López, A.A., Loke, M.H., Fanon, G.O., Rubí, E.C. (1999).** Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (tomografía eléctrica 2D y 3D). Instituto Geofísico Sismológico Ing. F. S. Volponi, Facultad de Cs.





PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Organismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan and School of Physics. University of Science of Malaysia. Penang, Malaysia.

**Loke, M.H. (2004).** Bidimensional and Tridimensional Electrical Imaging Surveys. Editado por el propio autor.

**Mordojovich, C. (1981).** Sedimentary basins of Chilean Pacific offshore. En: Halbouty, M., ed. Energy Resources of the Pacific Region. Circum-Pacific Energy and Mineral Resources Conference, Honolulu, July 30-Aug. 4, 1978. Proceedings. Tulsa, Okla., American Association of Petroleum Geologists. AAPG Studies in Geology, 12: 63-82.

**Mook, W. & Vries, J. (2002).** Isotopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico: Principios y Aplicaciones.- Guías y manuales Instituto geológico de España Madrid: IGME 596 p.

**Mazor, E. (2004).** Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology (Third Edition ed.). United States of America: Marcel Dekker, Inc.

**Ministerio de Educación y Ciencia, España (2006).** Informe final del proyecto Tomografía Geoeléctrica: Desarrollo para la Caracterización de Acuíferos.

**Narváez S. (1964).** Geología de los cuadrángulos de Ilo y Locumba. Boletín N° 7 Comisión Carta Geológica Nacional. 75 p.

**Nowroozi, A.A., Horrocks, S.B. and Henderson, P. (1999).** Saltwater intrusion into the freshwater aquifer in the eastern shore of Virginia: a reconnaissance electrical resistivity survey, J. of Applied Geophysics, Vol. 42, pp. 1-22.

**Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura –UNESCO & organización Meteorológica Mundial-WMO, (2012).** "Glosario Hidrológico Internacional"; N°385: Ginebra 2, Suiza, 471p.

Ruegg, W. (1952). The Camaná formation and its bearing on the Andean post-orogénia uplift. Bull Assoc. Suisse des Geol. Et Ing. Du Petrole, V.19, N°.57.

**ONERN (1974).** Inventario, evaluación y uso racional de los recursos de la costa. Cuenca de los ríos Quilca y Tambo. Lima 3 vol.

**Oyeyemi, K. D., Aizebeokhai, A. P. and Oladunjoye, M. A. (2015).** Integrated geophysical and geochemical investigations of saline water intrusion in a coastal alluvial terrain, Southwestern Nigeria. International Journal of Applied Environmental Sciences ISSN 0973-6077 Volume 10, Number 4 (2015), pp. 1275-1288. Pg. 1279.

**Peña D., Apolín J., Rodríguez B., & Sempere T. (2004).** Estudio preliminar de los depósitos deltaicos miocenos del río Tambo (Punta de Bombón, Arequipa). Publicación Especial SGP W5 (2004) p. 195.

**Plan Maestro Santuario Nacional Lagunas de Mejía (2000).** Instituto Nacional de Recursos Naturales, p.18.

**Rangel, M., Monreal, R., Morales, M., Castillo, J. (2012).** Vulnerabilidad a la intrusión marina de acuíferos costeros en el Pacífico Norte mexicano; un caso, el acuífero costa de Hermosillo, Sonora, México. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, n.2, p. 31-51, 2002. 31. Pg.37.

**Sánchez, A.; Rosell, W. & Raymundo, T. (2000).** Memoria Explicativa de la Revisión Geológica en los Cuadrángulo de Punta de Bombon (35-S), Clemesi (35-T), Ilo (36-T), Locumba (36-U), La Yarada (37-U), Tacna (37-V), Huaylillas (37-X), Juli (33-Y), Pizacoma(34-Y) E Isla Anápia (33-Z).40p

Struckmeier, W.F. & Margat, J. (1995) - Hydrogeological maps: a guide and a standard legend. Hannover: International Association of Hydrogeologists, International Contributions to Hydrogeology, 17, 193 p.

**Satriani A., Loperte A., and Proto M. (2011).** Electrical resistivity tomography for coastal salt water intrusion characterization along the ionian coast of Basilicata Region (southern Italy). *International Water Technology Journal, IWTJ*. Vol. I - Issue 1, Pg. 83.

**Southern Perú Copper Corporation, (2013).** Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Tía María, Capítulo IV Línea Base, 743p.

**Sodde M. and Barrocu G. (2006).** Seawater intrusion and heavy metal contamination in the alluvial plain of Quirra and Flumini Pisale rivers, South-Eastern Sardinia, p. 167, 168. *Proceedings 1st SWIM-SWICA Joint Saltwater Intrusion Conference, Cagliari-Chia Laguna, Italy*. pp. 167, 168, 172.

**Toth, J. (2009).** Gravitational Systems of Groundwater Flow, 297 p.

**Toth, J. (2000).** "Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones", *Boletín Geológico y Minero*, vol. 111, núm. 4, pp. 9-26.

**Toth, J. (1992).** A Theory of Groundwater Motion in Small Drainage Basins in Central Alberta, Canada, Volume 67, N 11 *Journal of Geophysical Research*. 13p.

**Veruz, Vargas, V & Cacya L, 2014.** Caracterización y Evaluación del Potencial Geotérmico de la región Moquegua, INGEMMET.

**Weight, W. D. (2004).** Manual of Applied Fiel Hydrogeology. McGraw-Hill Co.

**Zohdy, A.A.R., Martin, P., Bisdorf, R.J. (1993).** A study of seawater intrusion using direct-current soundings in the southeastern part of the Oxnard Plain, California. Open-File Report, 93-524. U.S. Geological Survey, 139 pp. In: Nowroozi, A.A., Horrocks, S.B, Henderson, P., 1999. Saltwater intrusion into the freshwater aquifer in the eastern shore of Virginia: a reconnaissance electrical resistivity survey. *Journal of Applied Geophysics*, 42, 1-22.





PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Organismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

Año de la Consolidación del Mar de Grau  
Decenio de las Personas con Discapacidad en el Perú

## 11. ANEXOS

### ANEXO 1

- Mapa 1.1 Mapa geológico
- Mapa 1.2 Mapa Hidrogeológico
- Mapa 1.3 Mapa de Conductividad Eléctrica
- Mapa 1.4 Mapa pH

### ANEXO 2

- Ensayos de permeabilidad

### ANEXO 3

- Base de datos mejía





PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Organismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA



"Decenio de las Personas con discapacidad en el Perú"  
"Año de la Consolidación del Mar de Grau"

# ANEXOS



*[Handwritten signature]*

*[Handwritten signature]*



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Organismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección

"Decenio de las Personas con discapacidad en el Perú"  
"Año de la Consolidación del Mar de Grau"

# ANEXO 1 MAPAS



*J.*  
*A.*



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Organismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

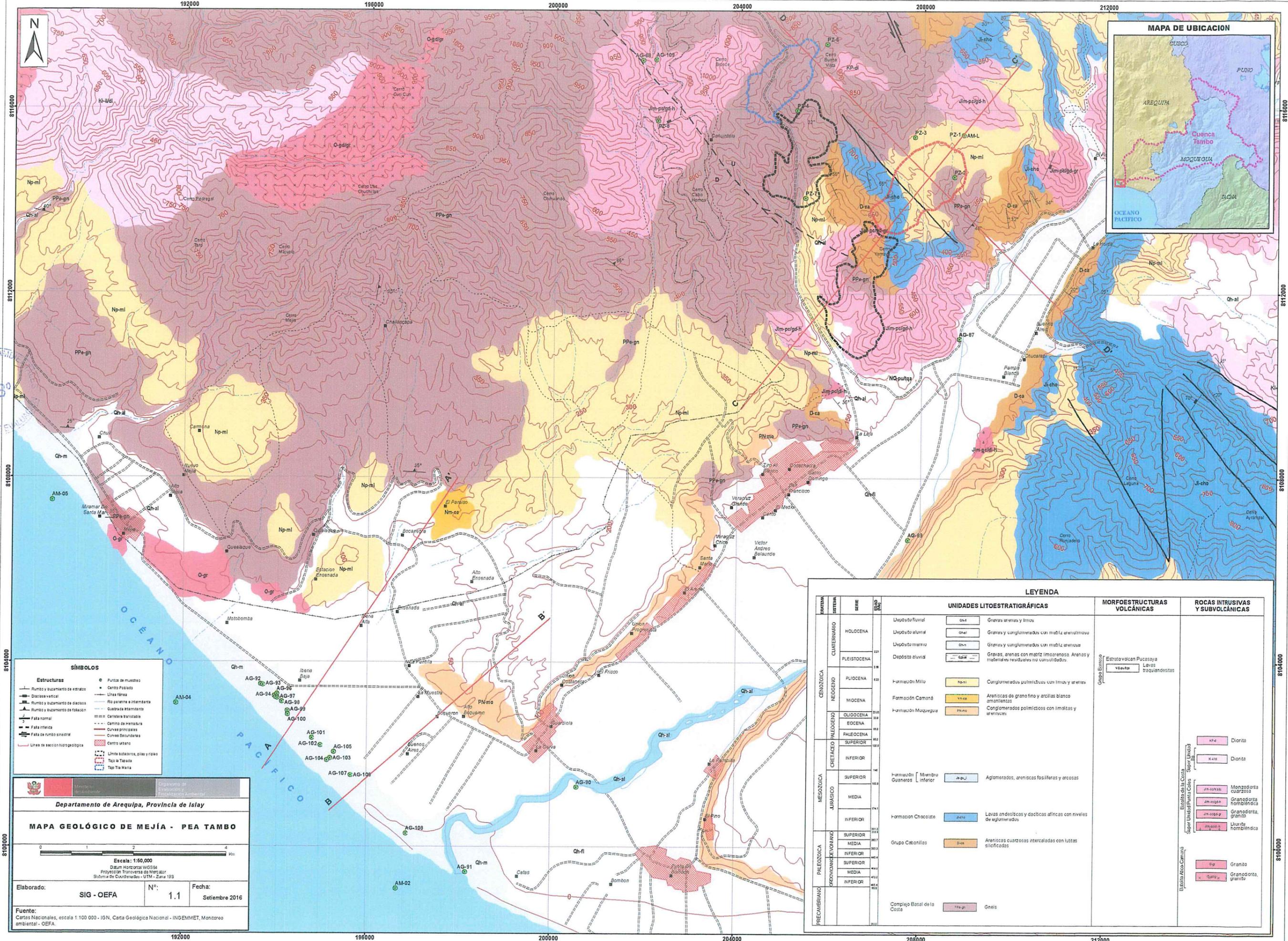
Dirección

"Decenio de las Personas con discapacidad en el Perú"  
"Año de la Consolidación del Mar de Grau"



# ANEXO 1.1 MAPA GEOLÓGICO





EVALUACIONES AMBIENTALES  
 DIRECCION DE EVALUACIONES AMBIENTALES  
 V.350  
 [Signature]

**SÍMBOLOS**

	Rumbo y buzamiento de estrados		Puntos de muestreo
	Falla normal		Centro Poblado
	Falla de rumbo sinistral		Líneas férreas
	Rumbo y buzamiento de estrados		Río perenne e intermitente
	Falla normal		Cuabaca entrambado
	Falla de rumbo sinistral		Carretera transitaria
	Rumbo y buzamiento de estrados		Canal de riego
	Falla normal		Carretera principal
	Falla de rumbo sinistral		Carretera secundaria
	Rumbo y buzamiento de estrados		Centro urbano
	Falla normal		Límite de zonas, pías y ríos
	Falla de rumbo sinistral		Tajo la Tapada
	Rumbo y buzamiento de estrados		Nivel del mar

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental  
**Departamento de Arequipa, Provincia de Islay**  
**MAPA GEOLÓGICO DE MEJÍA - PEA TAMBO**  
 Escala: 1:50,000  
 Datum Horizontal WGS84  
 Proyección Transversal de Mercator  
 Sistema de Coordenadas UTM - Zona 19S  
 Elaborado: SIG - OEFA N°: 1.1 Fecha: Setiembre 2016  
 Fuente: Cartas Nacionales, escala 1:100 000 - IGN, Carta Geológica Nacional - INGEMMET, Monitoreo ambiental - OEFA

**LEYENDA**

PERIODO	SERIE	UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS	MORFOESTRUCTURAS VOLCÁNICAS	ROCAS INTRUSIVAS Y SUBVOLCÁNICAS
CUATERNARIO	Holoceno	Depósito fluvial (Qm)	Estrato volcán Pucallpa Levas traquanditas (Vc)	Diorita (D)
	Pleistoceno	Depósito aluvial (Qal)		
NEOGENO	Plioceno	Depósito marino (Qm)	Estrato volcán Pucallpa Levas traquanditas (Vc)	Diorita (D)
	Mioceno	Depósito aluvial (Qal)		
CRETACEO PALEOGENO	Superior	Formación Milú (Np-mi)	Estrato volcán Pucallpa Levas traquanditas (Vc)	Diorita (D)
	Inferior	Formación Camaná (Np-ca)		
MESOZOICA	Superior	Formación Moquegua (Np-mo)	Estrato volcán Pucallpa Levas traquanditas (Vc)	Diorita (D)
	Medio	Formación Moquegua (Np-mo)		
PALEOZOICA	Superior	Formación Moquegua (Np-mo)	Estrato volcán Pucallpa Levas traquanditas (Vc)	Diorita (D)
	Medio	Formación Moquegua (Np-mo)		
PRECAMBRIANO	Superior	Formación Moquegua (Np-mo)	Estrato volcán Pucallpa Levas traquanditas (Vc)	Diorita (D)
	Inferior	Formación Moquegua (Np-mo)		



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

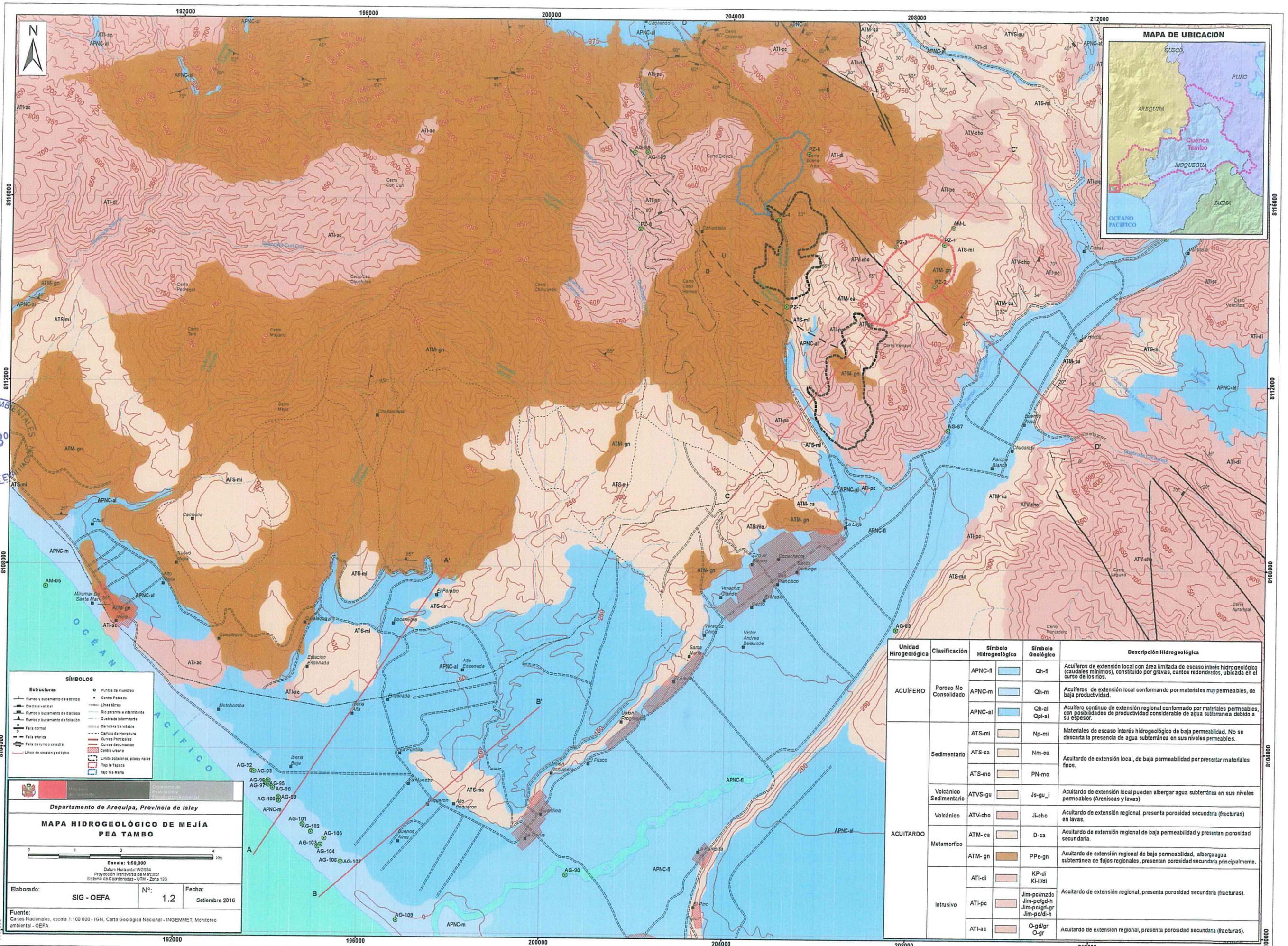


"Decenio de las Personas con discapacidad en el Perú"  
"Año de la Consolidación del Mar de Grau"



*[Handwritten signature]*

# ANEXO 1.2 MAPA HIDROGEOLÓGICO



Handwritten signature or initials in the left margin.

- SÍMBOLOS**
- Estructuras**
    - Rumbo y buzamiento de estratos
    - Diastro vertical
    - Rumbo y buzamiento de diaclasas
    - Rumbo y buzamiento de foliaciones
    - Falla normal
    - Falla inversa
    - Falla de rumbo sinistral
    - Línea de sección geológica
  - Características**
    - Puntos de muestreo
    - Cerro Pastos
    - Línea férrea
    - Río perenne e intermitente
    - Quebrada intermitente
    - Carretera transitable
    - Camino de herradura
    - Curvas Principales
    - Curvas Secundarias
    - Centro urbano
    - Límite estacional, playas y rias
    - Tajo "Tasajo"
    - Tajo Tia María

Departamento de Arequipa, Provincia de Islay

**MAPA HIDROGEOLÓGICO DE MEJÍA PEA TAMBO**

Escala: 1:50,000  
Datum Horizontal WGS84  
Proyección Transversa de Mercator  
Sistema de Coordenadas - UTM - Zona 19S

Elaborado: SIG - OEFA    N°: 1.2    Fecha: Setiembre 2016

Fuente: Cartas Nacionales, escala 1:100,000 - IGN, Carta Geológica Nacional - INGEMMET, Monitoreo ambiental - OEFA

Unidad Hidrogeológica	Clasificación	Símbolo Hidrogeológico	Símbolo Geológico	Descripción Hidrogeológica
ACUÍFERO	Poroso No Consolidado	APNC-fl	Qh-fl	Acuífero de extensión local con área limitada de escaso interés hidrogeológico (caudales mínimos), constituido por gravas, cantos redondeados, ubicada en el curso de los ríos.
		APNC-m	Qh-m	Acuífero de extensión local conformado por materiales muy permeables, de baja productividad.
		APNC-al	Qh-al	Acuífero continuo de extensión regional conformado por materiales permeables, con posibilidades de productividad considerable de agua subterránea debido a su espesor.
ACUITARDO	Sedimentario	ATS-mi	Np-mi	Materiales de escaso interés hidrogeológico de baja permeabilidad. No se descarta la presencia de agua subterránea en sus niveles permeables.
		ATS-ca	Nm-ca	Acuífero de extensión local, de baja permeabilidad por presentar materiales finos.
	ATS-mo	PN-mo		
	Volcánico Sedimentario	ATVS-gu	Js-gu_l	Acuífero de extensión local pueden albergar agua subterránea en sus niveles permeables (Areniscas y lavas)
Metamórfico	Volcánico	ATV-cho	Ji-cho	Acuífero de extensión regional, presenta porosidad secundaria (fracturas) en lavas.
	Metamórfico	ATM-ca	D-ca	Acuífero de extensión regional de baja permeabilidad y presentan porosidad secundaria.
	Metamórfico	ATM-gn	PPe-gn	Acuífero de extensión regional de baja permeabilidad, alberga agua subterránea de fujos regionales, presentan porosidad secundaria principalmente.
Intrusivo	Intrusivo	ATI-di	KP-di	Acuífero de extensión regional, presenta porosidad secundaria (fracturas).
	Intrusivo	ATI-pc	Jim-pc/mzdc Jim-pc/gd-h Jim-pc/pd-gr Jim-pc/di-h	
	Intrusivo	ATI-ac	O-gd/gr O-gr	Acuífero de extensión regional, presenta porosidad secundaria (fracturas).



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Organismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

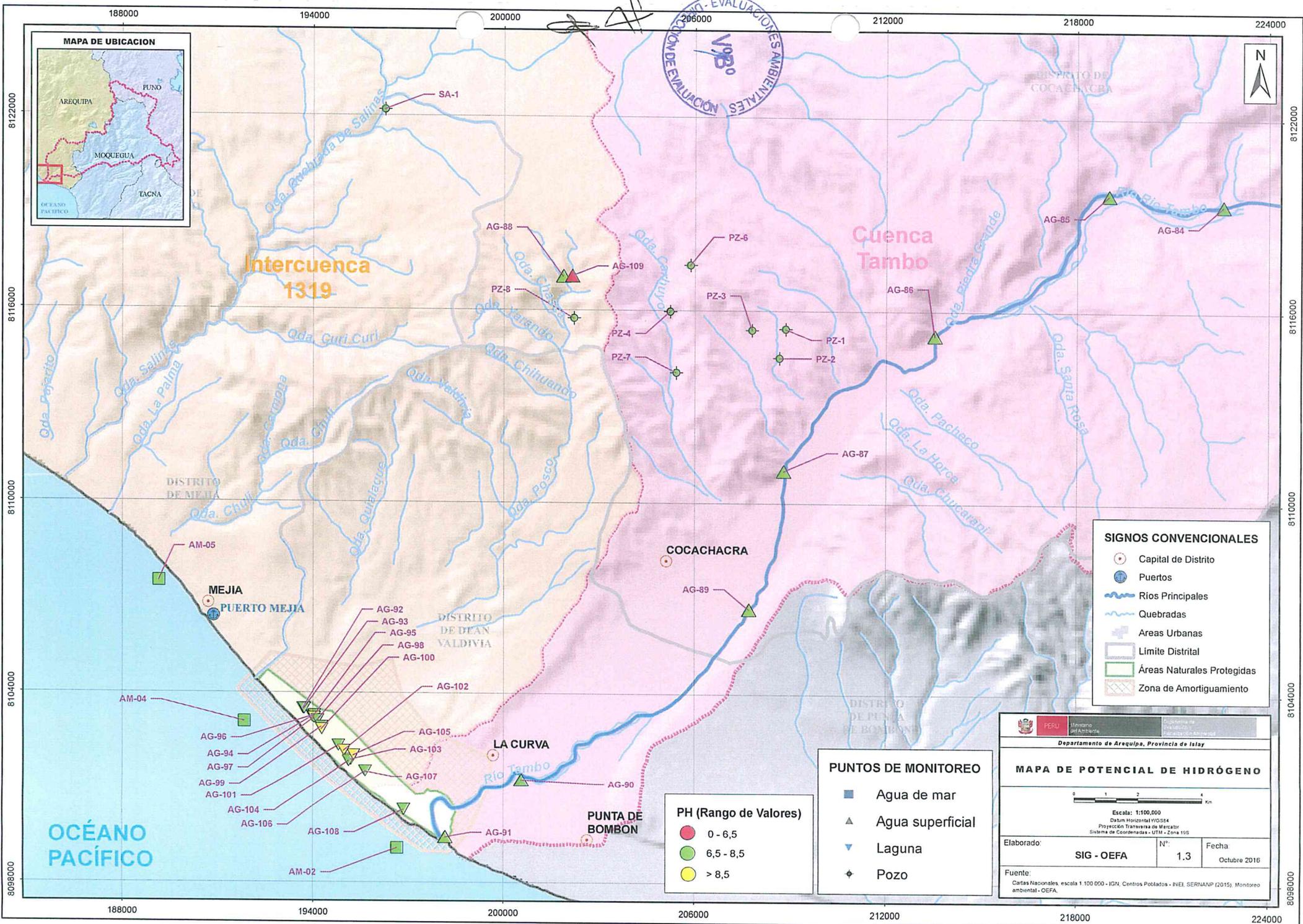
CIÓN

"Decenio de las Personas con discapacidad en el Perú"  
"Año de la Consolidación del Mar de Grau"

# ANEXO 1.3

## MAPA DE POTENCIAL DE HIDRÓGENO







PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Organismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

ión de

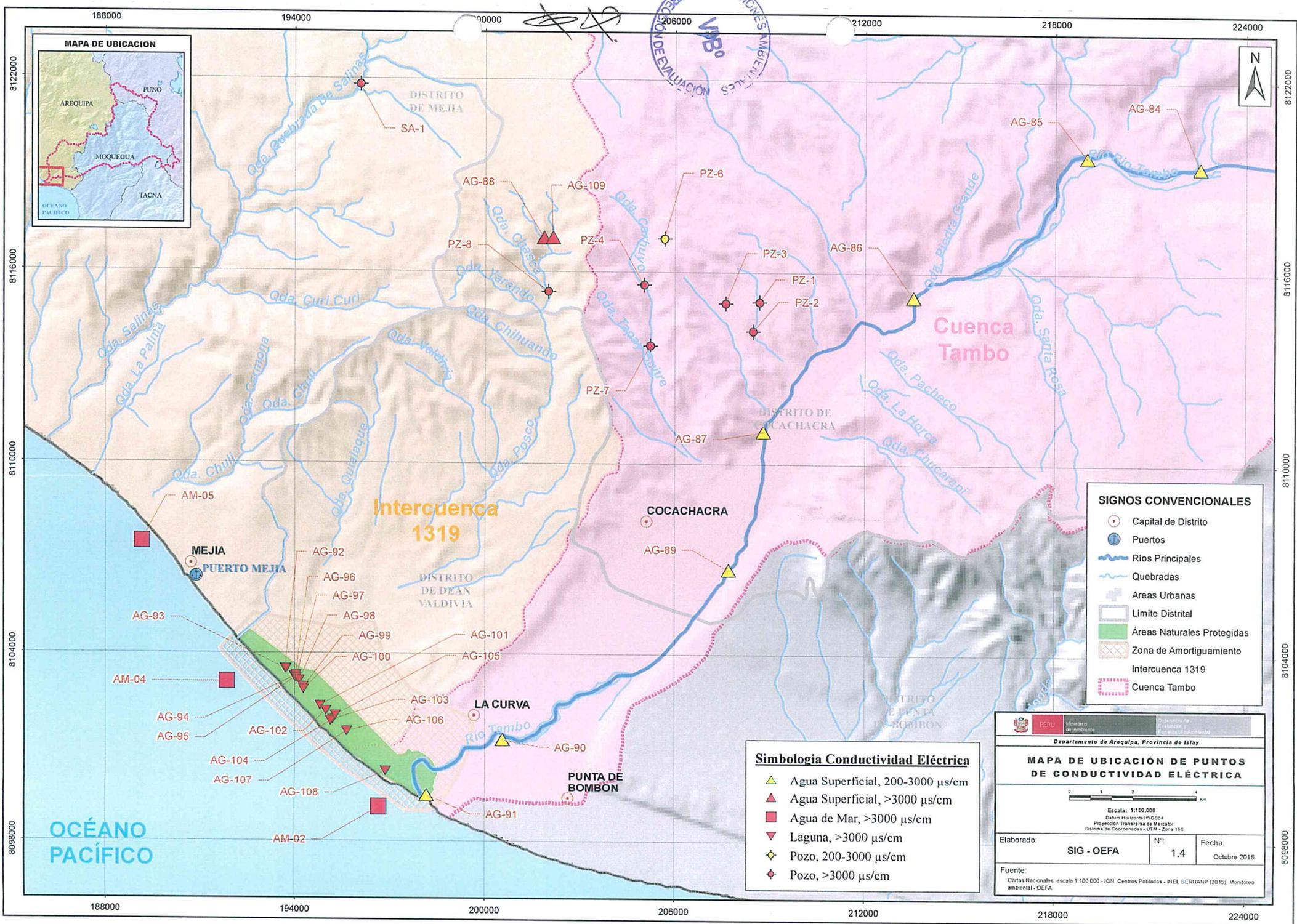
"Decenio de las Personas con discapacidad en el Perú"  
"Año de la Consolidación del Mar de Grau"

# ANEXO 1.4

## MAPA DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA



*[Handwritten signature]*



- SIGNOS CONVENCIONALES**
- Capital de Distrito
  - ⊕ Puertos
  - ▬ Ríos Principales
  - ▬ Quebradas
  - ▭ Áreas Urbanas
  - ▭ Limite Distrital
  - ▭ Áreas Naturales Protegidas
  - ▭ Zona de Amortiguamiento
  - ▭ Intercuenca 1319
  - ▭ Cuenca Tambo

- Simbología Conductividad Eléctrica**
- ▲ Agua Superficial, 200-3000  $\mu\text{s}/\text{cm}$
  - ▲ Agua Superficial, >3000  $\mu\text{s}/\text{cm}$
  - Agua de Mar, >3000  $\mu\text{s}/\text{cm}$
  - ▼ Laguna, >3000  $\mu\text{s}/\text{cm}$
  - ◆ Pozo, 200-3000  $\mu\text{s}/\text{cm}$
  - ◆ Pozo, >3000  $\mu\text{s}/\text{cm}$

Departamento de Arequipa, Provincia de Islay

**MAPA DE UBICACIÓN DE PUNTOS DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA**

Escala: 1:100,000  
 Datum Horizontal: PICHUSA  
 Proyección Transversal de Mercator  
 Sistema de Coordenadas: UTM - Zona 18S

Elaborado:	SIG - OEFA	Nº:	1.4	Fecha:	Octubre 2016
------------	------------	-----	-----	--------	--------------

Fuente:  
 Cartas Nacionales, escala 1:100 000 - IGN, Centros Poblados - INEI, SERNANP (2015), Monitoreo ambiental - OEFA.

188000 194000 200000 206000 212000 218000 224000  
 8122000 8116000 8110000 8104000 8098000  
 OCEANO PACÍFICO  
 DISTRITO DE MEJIA  
 DISTRITO DE CACHACRA  
 DISTRITO DE DEAN VALDIVIA  
 DISTRITO DE PUNTA DE BOMBÓN  
 Cuenca Tambo  
 Intercuenca 1319  
 MEJIA  
 PUERTO MEJIA  
 LA CURVA  
 PUNTA DE BOMBÓN  
 COCACHACRA  
 SA-1  
 AG-88  
 AG-109  
 PZ-6  
 PZ-8  
 PZ-4  
 PZ-3  
 PZ-1  
 PZ-2  
 AG-86  
 AG-87  
 AG-89  
 AM-05  
 AM-04  
 AG-92  
 AG-96  
 AG-97  
 AG-98  
 AG-99  
 AG-100  
 AG-101  
 AG-105  
 AG-103  
 AG-106  
 AG-107  
 AG-108  
 AM-02  
 AG-93  
 AG-94  
 AG-95  
 AG-102  
 AG-104  
 AG-108  
 AG-90  
 AG-91  
 Qda. Realzanda De Salinas  
 Qda. Salinas  
 Qda. La Palma  
 Qda. Chullu  
 Qda. Campona  
 Qda. Chullu  
 Qda. Quilaque  
 Qda. Verónica  
 Qda. Chihuando  
 Qda. Posco  
 Qda. Tapatayre  
 Qda. Pacheco  
 Qda. La Horca  
 Qda. Chusarapi  
 Qda. Santa Rosa  
 Río Tambo



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Organismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

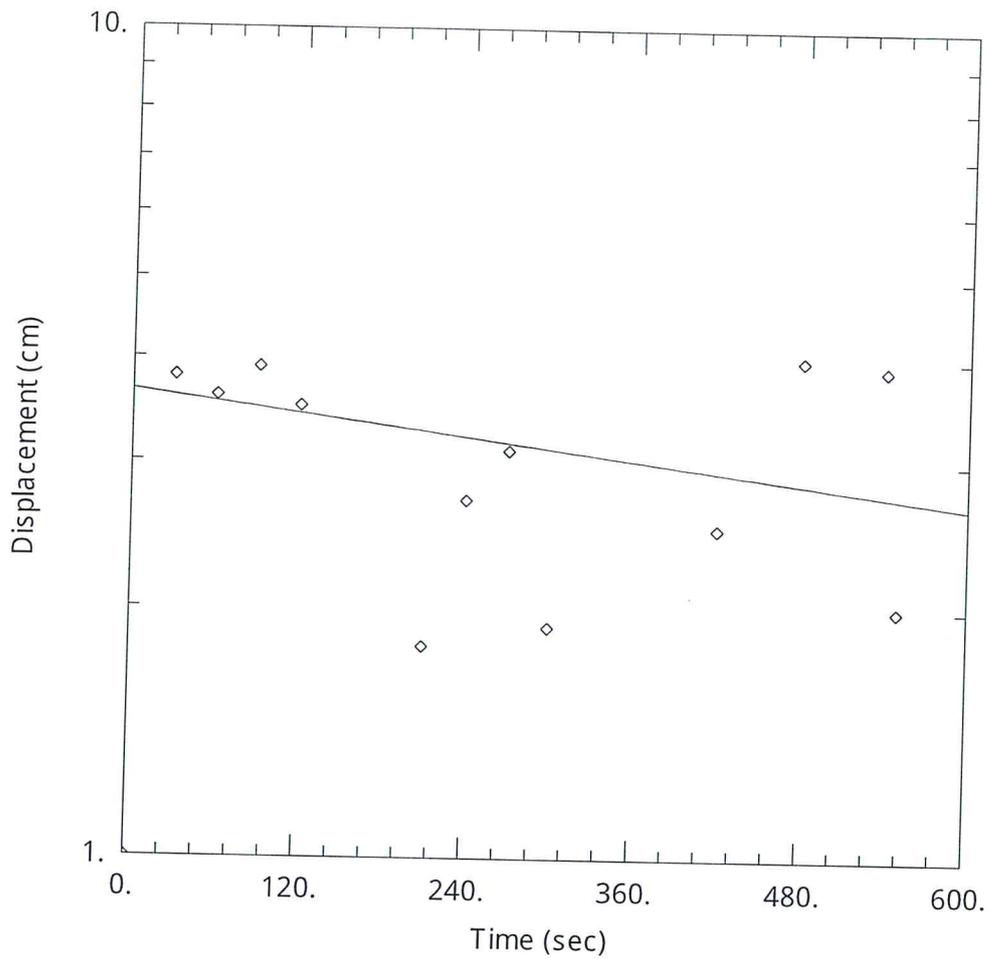
de Eva

"Decenio de las Personas con discapacidad en el Perú"  
"Año de la Consolidación del Mar de Grau"



# ANEXO 2

## FICHAS DE PERMEABILIDAD



HIDROGEOLOGIA SANTUARIO NACIONAL DE LAS LAGUNAS DE MEJIA

Data Set: F:\Permeabilidad Lagunas\PDF\_MEJIA\PI-01.aqt

Date: 10/24/16

Time: 11:42:48

PROJECT INFORMATION

Company: OEFA  
 Project: PEA TAMBO  
 Location: MEJIA  
 Test Well: PI-01

AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 60 cm

Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1

WELL DATA (PI-01)

Initial Displacement: 1 cm  
 Total Well Penetration Depth: 1 cm  
 Casing Radius: 2.54 cm

Static Water Column Height: 60 cm  
 Screen Length: 1 cm  
 Wellbore Radius: 2.54 cm  
 Gravel Pack Porosity: 0.27

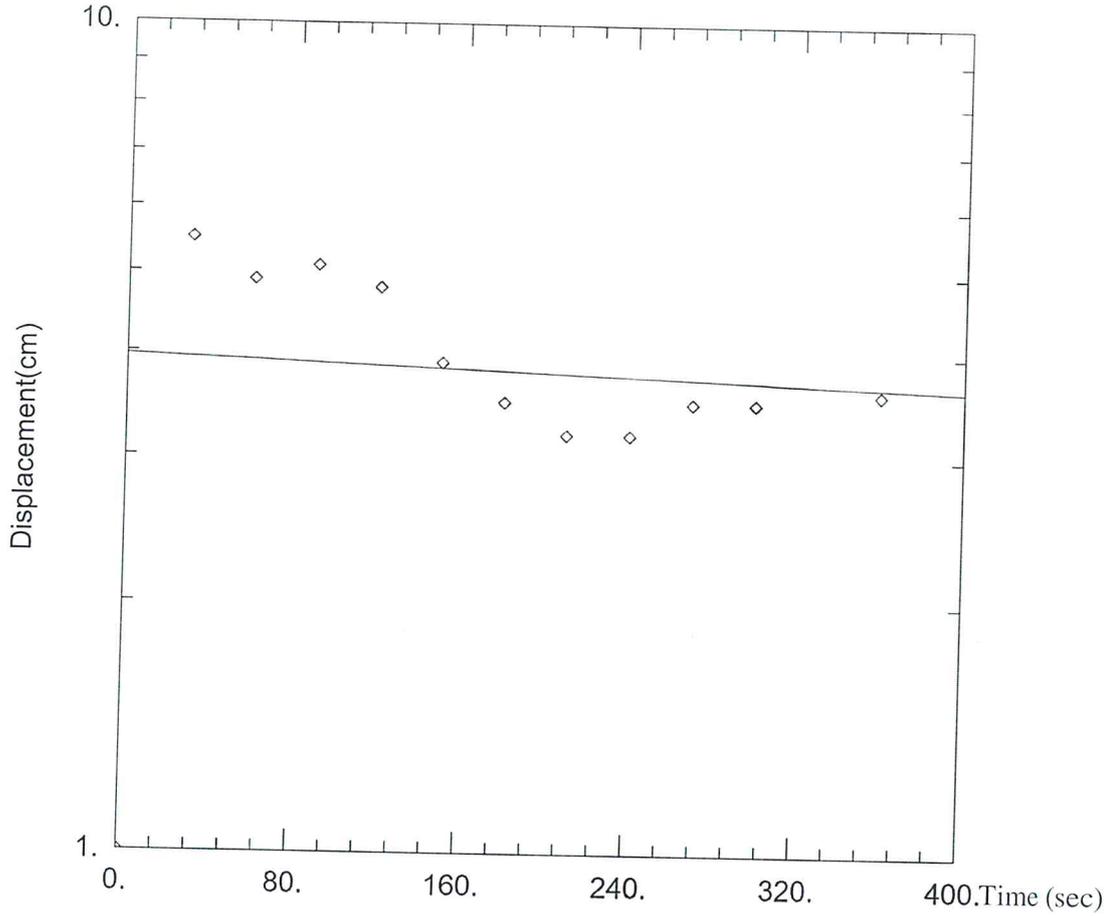
SOLUTION

Aquifer Model: Unconfined

Solution Method: Bower-Rice

K = 2.263 m/day

y0 = 3.651 cm



HIDROGEOLOGIA SANTUARIO NACIONAL DE LAS LAGUNAS DE MEJÍA

Data Set: F:\Permeabilidad Lagunas\PI-02.aqt

Date: 10/24/16 Time: 11:43:50

PROJECT INFORMATION

Company: OEFA  
 Project: PEA TAMBO  
 Location: MEJIA  
 Test Well: PI-02

AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 60. cm Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.

WELL DATA (PI-02)

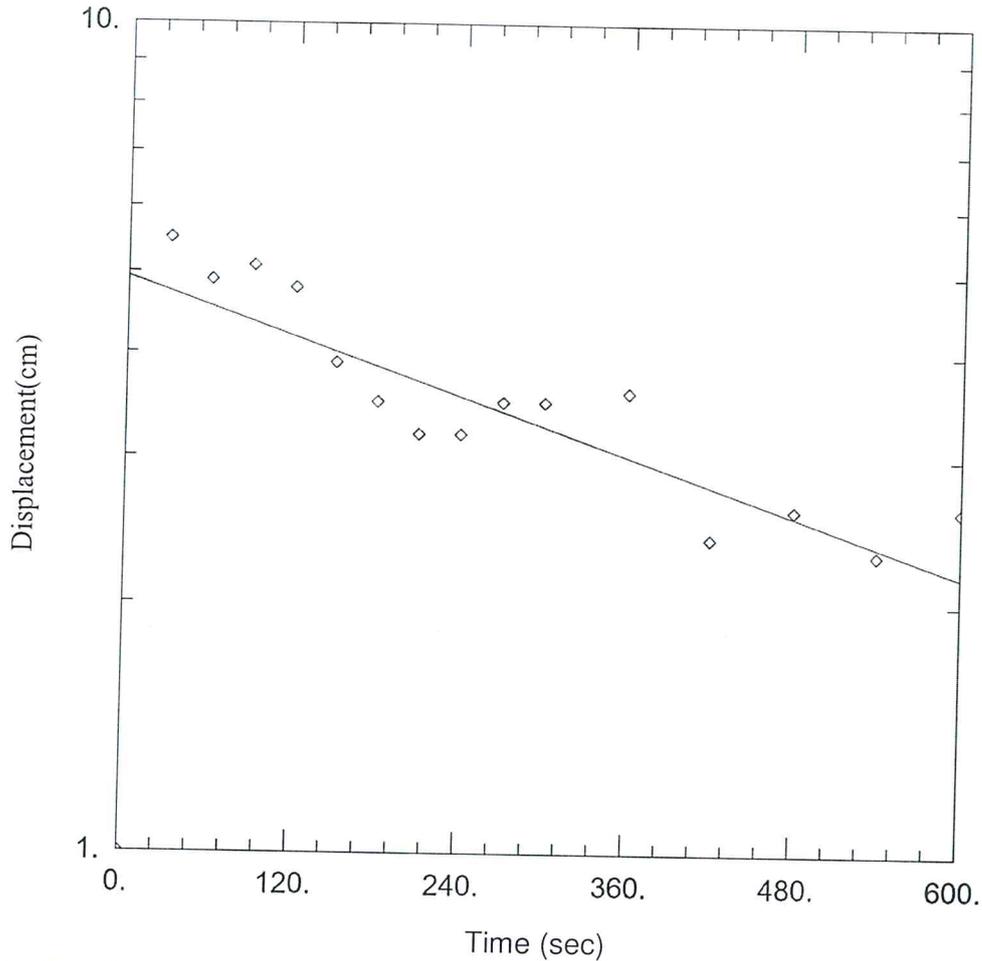
Initial Displacement: <u>1. cm</u>	Static Water Column Height: <u>60. cm</u>
Total Well Penetration Depth: <u>1. cm</u>	Screen Length: <u>1. cm</u>
Casing Radius: <u>2.54 cm</u>	Wellbore Radius: <u>2.54 cm</u>
	Gravel Pack Porosity: <u>0.27</u>

SOLUTION

Aquifer Model: Unconfined Solution Method: Bouwer-Rice  
 K = 0.9234 m/day y0 = 3.968 cm



*[Handwritten signature]*



HIDROGEOLOGIA SANTUARIO NACIONAL DE LAS LAGUNAS DE MEJÍA

Data Set: F:\Permeabilidad Lagunas\PI-03.aqt

Date: 10/24/16

Time: 12:02:33

PROJECT INFORMATION

Company: OEFA

Project: PEA TAMBO

Location: MEJIA

Test Well: PI-03

AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 60. cm

Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.

WELL DATA (PI-03)

Initial Displacement: 1. cm

Static Water Column Height: 60. cm

Total Well Penetration Depth: 1. cm

Screen Length: 1. cm

Casing Radius: 2.54 cm

Wellbore Radius: 2.54 cm

Gravel Pack Porosity: 0.27

SOLUTION

Aquifer Model: Unconfined

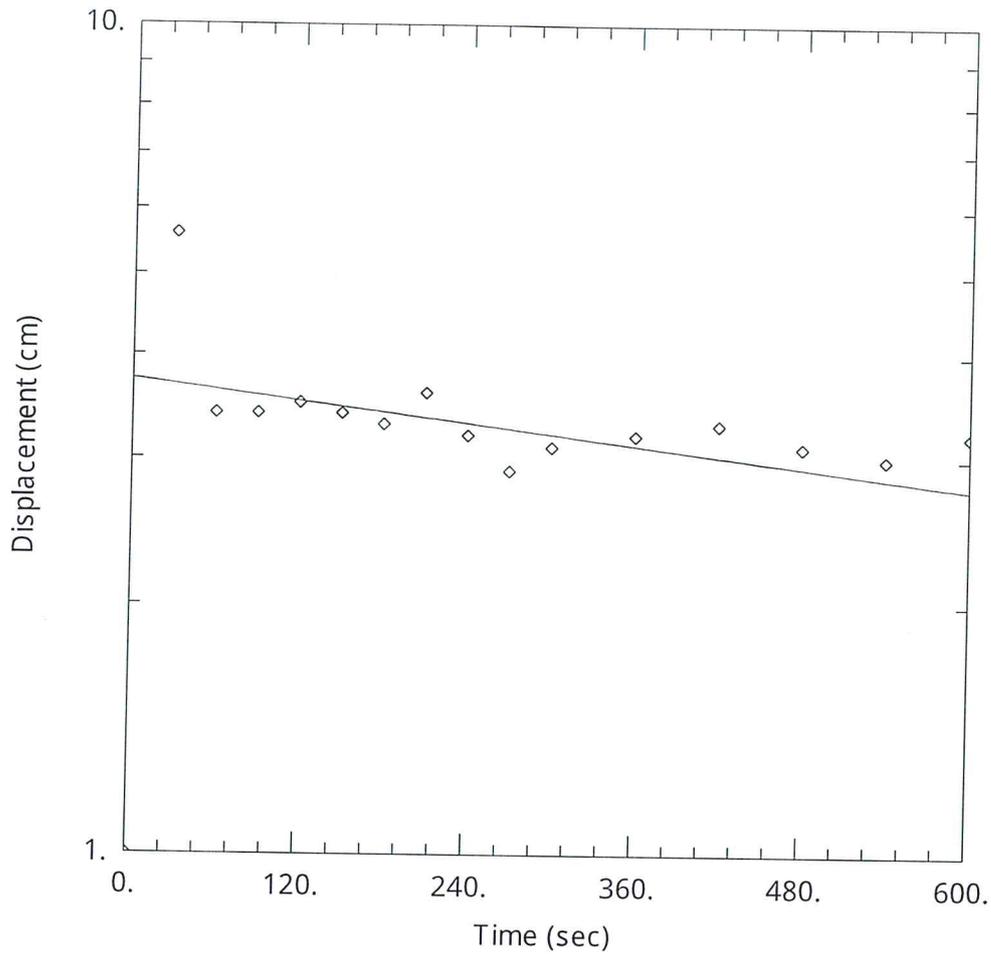
Solution Method: Bouwer-Rice

K = 5.896 m/day

y0 = 4.937 cm



*[Handwritten signature]*



HIDROGEOLOGIA SANTUARIO NACIONAL DE LAS LAGUNAS DE MEJIA

Data Set: F:\Permeabilidad Lagunas\PI-04.aqt

Date: 10/24/16

Time: 11:58:15

PROJECT INFORMATION

Company: OEFA  
 Project: PEA TAMBO  
 Location: MEJIA  
 Test Well: PI-04

AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 60. cm

Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.

WELL DATA (PI-04)

Initial Displacement: 1. cm  
 Total Well Penetration Depth: 1. cm  
 Casing Radius: 2.54 cm

Static Water Column Height: 60. cm  
 Screen Length: 1. cm  
 Wellbore Radius: 2.54 cm  
 Gravel Pack Porosity: 0.27

SOLUTION

Aquifer Model: Unconfined

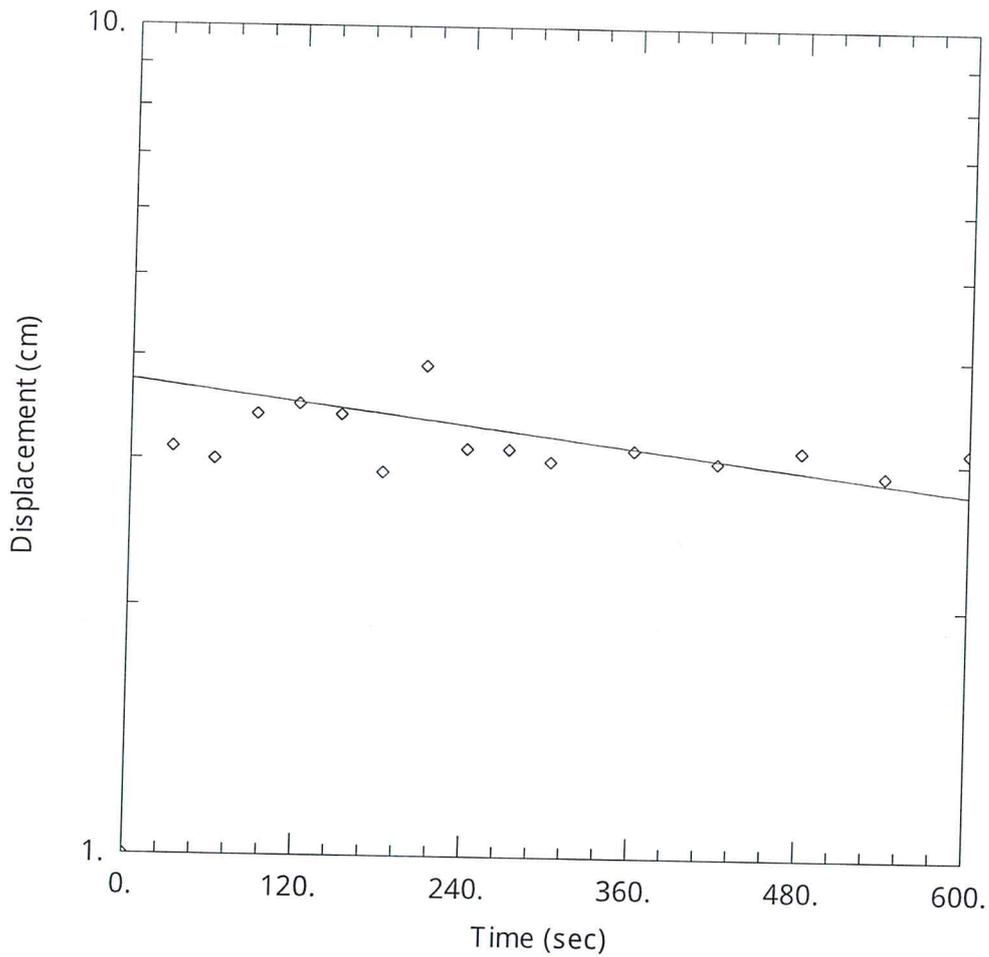
Solution Method: Bouwer-Rice

K = 2.168 m/day

y0 = 3.736 cm



*[Handwritten signature]*



HIDROGEOLOGIA SANTUARIO NACIONAL DE LAS LAGUNAS DE MEJIA

Data Set: F:\Permeabilidad Lagunas\PI-05.aqt

Date: 10/24/16

Time: 12:05:49

PROJECT INFORMATION

Company: OEFA  
 Project: PEA TAMBO  
 Location: MEJIA  
 Test Well: PI-05

AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 60. cm

Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.

WELL DATA (PI-05)

Initial Displacement: 1. cm  
 Total Well Penetration Depth: 1. cm  
 Casing Radius: 2.54 cm

Static Water Column Height: 60. cm  
 Screen Length: 1. cm  
 Wellbore Radius: 2.54 cm  
 Gravel Pack Porosity: 0.27

SOLUTION

Aquifer Model: Unconfined

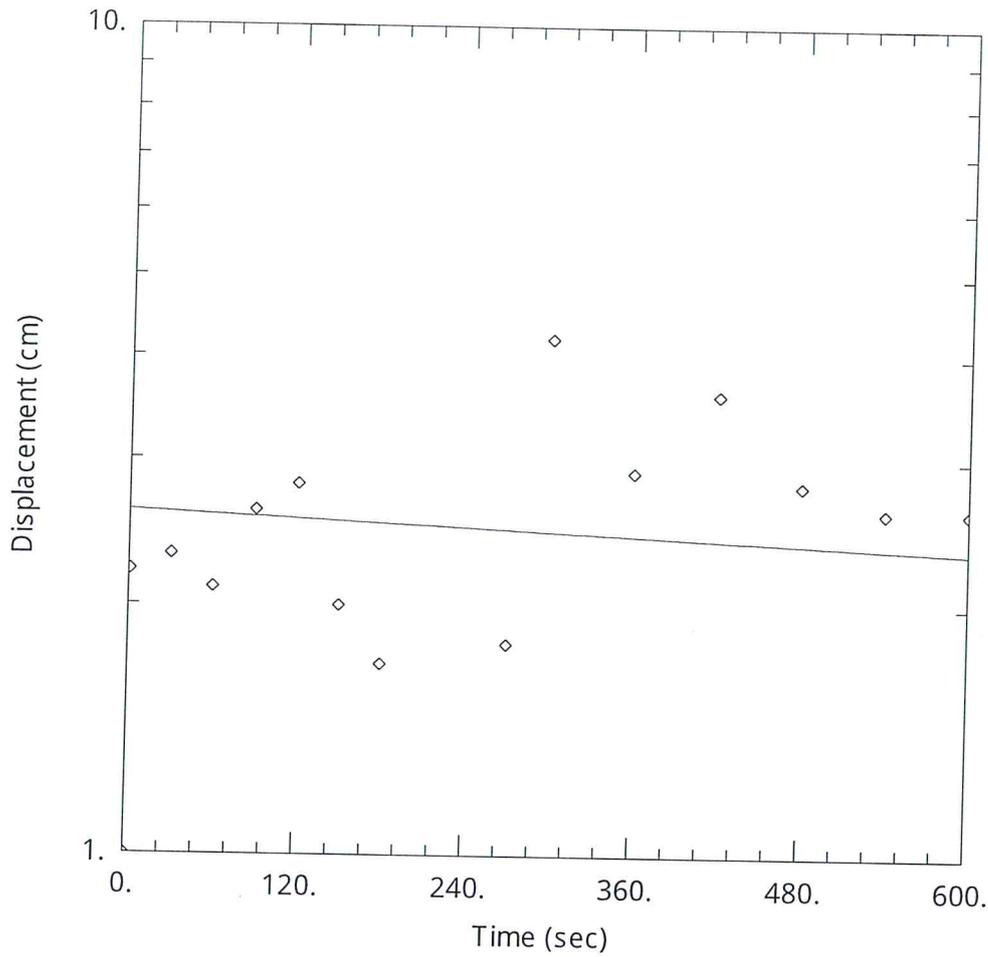
Solution Method: Bower-Rice

K = 2.168 m/day

y0 = 3.736 cm



*[Handwritten signature]*



HIDROGEOLOGIA SANTUARIO NACIONAL DE LAS LAGUNAS DE MEJIA

Data Set: F:\Permeabilidad Lagunas\PI-06.aqt

Date: 10/24/16

Time: 12:08:34

PROJECT INFORMATION

Company: OEFA  
 Project: PEA TAMBO  
 Location: MEJIA  
 Test Well: PI-06

AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 60. cm

Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.

WELL DATA (PI-06)

Initial Displacement: 1. cm  
 Total Well Penetration Depth: 1. cm  
 Casing Radius: 2.54 cm

Static Water Column Height: 60. cm  
 Screen Length: 1. cm  
 Wellbore Radius: 2.54 cm  
 Gravel Pack Porosity: 0.27

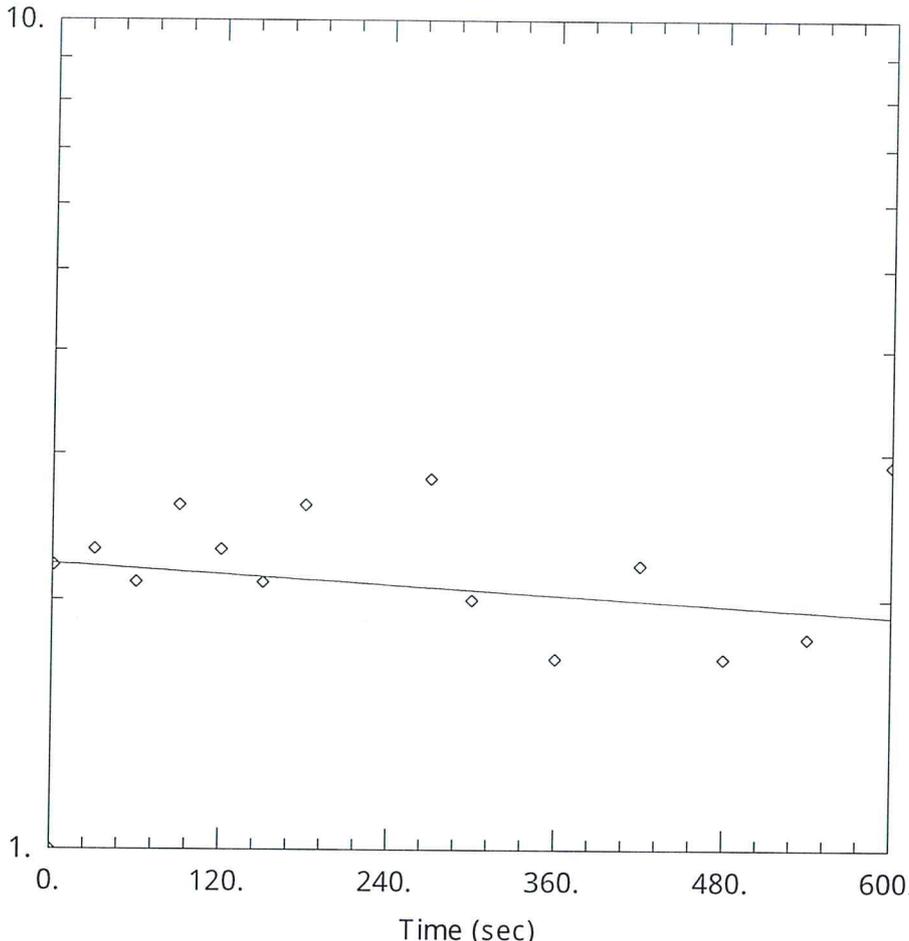
SOLUTION

Aquifer Model: Unconfined

Solution Method: Bouwer-Rice

K = 0.7796 m/day

y0 = 2.596 cm

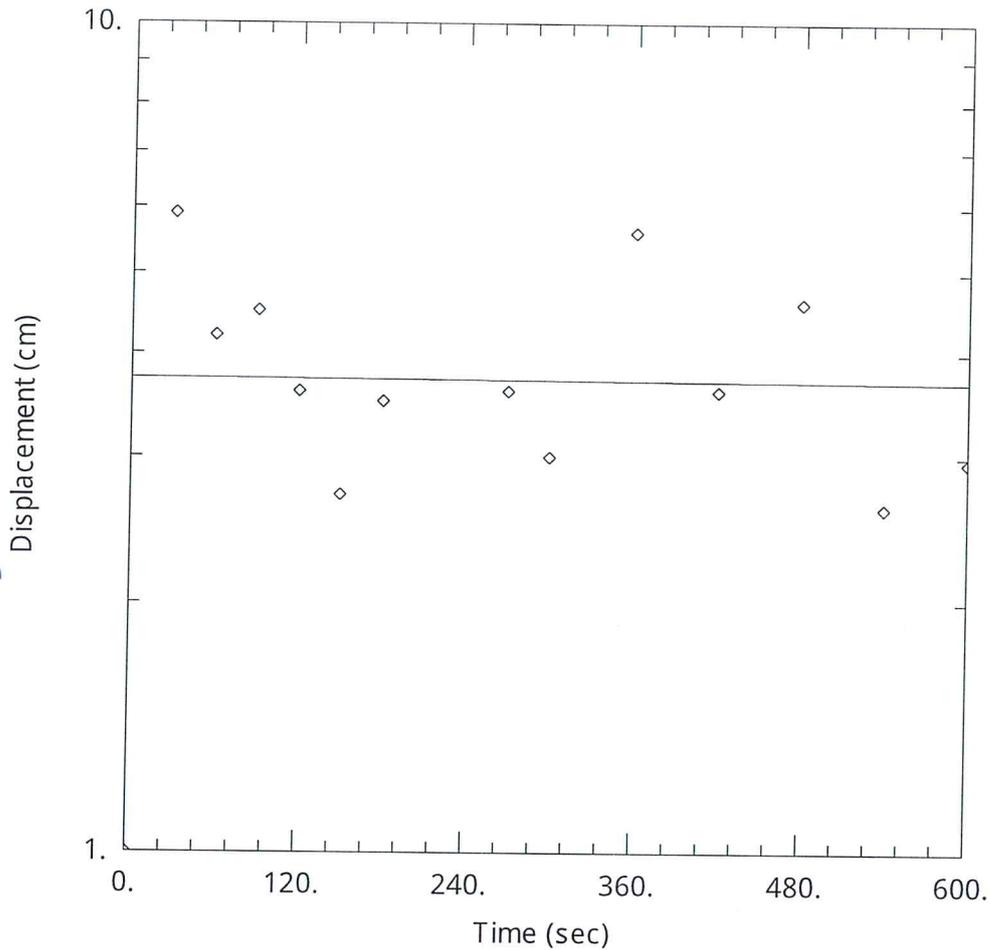


*[Handwritten signature]*

<u>HIDROGEOLOGIA SANTUARIO NACIONAL DE LAS LAGUNAS DE MEJIA</u>	
Data Set: <u>F:\Permeabilidad Lagunas\PI-07.aqt</u>	Time: <u>12:09:07</u>
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company: <u>OEFA</u>	
Project: <u>PEA TAMBO</u>	
Location: <u>MEJIA</u>	
Test Well: <u>PI-07</u>	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: <u>60. cm</u>	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): <u>1.</u>
<u>WELL DATA (PI-07)</u>	
Initial Displacement: <u>1. cm</u>	Static Water Column Height: <u>60. cm</u>
Total Well Penetration Depth: <u>1. cm</u>	Screen Length: <u>1. cm</u>
Casing Radius: <u>2.54 cm</u>	Wellbore Radius: <u>2.54 cm</u>
	Gravel Pack Porosity: <u>0.27</u>
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: <u>Unconfined</u>	Solution Method: <u>Bouwer-Rice</u>
K = <u>1.05 m/day</u>	y0 = <u>2.212 cm</u>



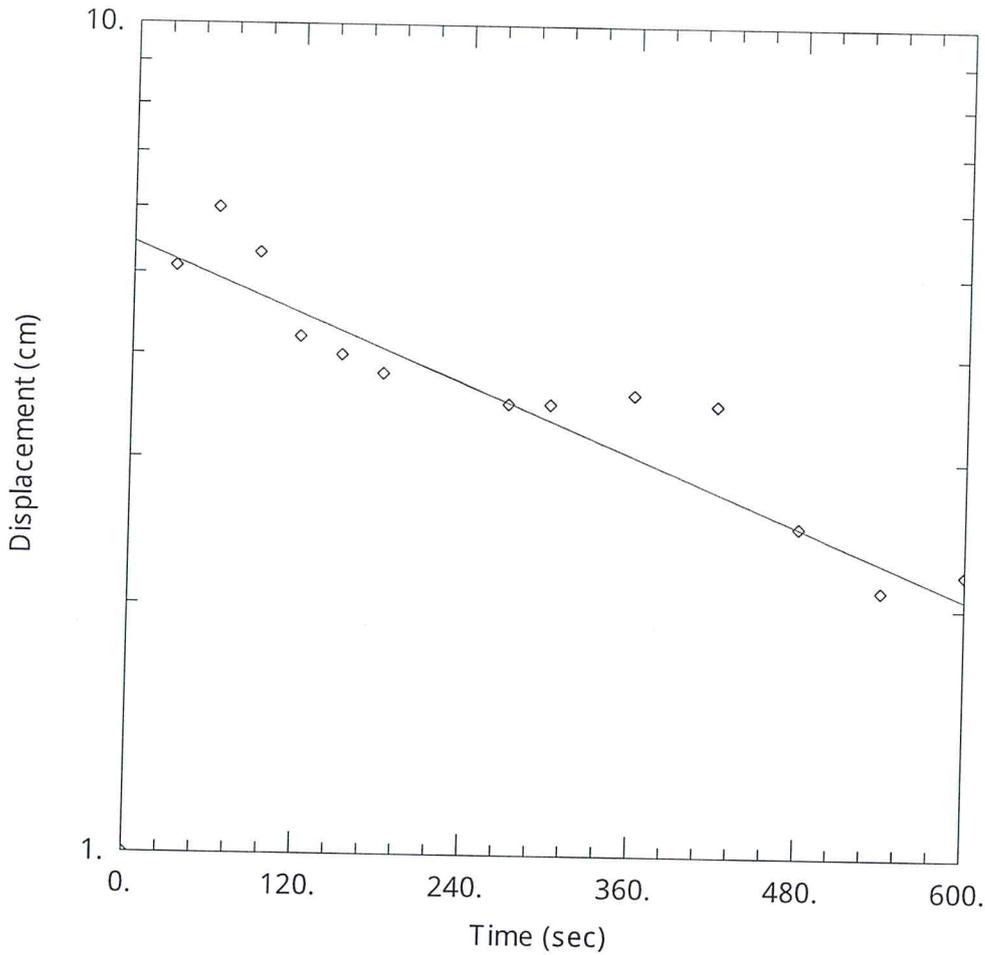
*[Handwritten signature]*



<u>HIDROGEOLOGIA SANTUARIO NACIONAL DE LAS LAGUNAS DE MEJIA</u>	
Data Set: <u>F:\Permeabilidad Lagunas\PI-08.aqt</u>	Time: <u>12:16:46</u>
Date: <u>10/24/16</u>	
<u>PROJECT INFORMATION</u>	
Company: <u>OEFA</u>	
Project: <u>PEA TAMBO</u>	
Location: <u>MEJIA</u>	
Test Well: <u>PI-08</u>	
<u>AQUIFER DATA</u>	
Saturated Thickness: <u>60. cm</u>	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): <u>1.</u>
<u>WELL DATA (PI-08)</u>	
Initial Displacement: <u>1. cm</u>	Static Water Column Height: <u>60. cm</u>
Total Well Penetration Depth: <u>1. cm</u>	Screen Length: <u>1. cm</u>
Casing Radius: <u>2.54 cm</u>	Wellbore Radius: <u>2.54 cm</u>
	Gravel Pack Porosity: <u>0.27</u>
<u>SOLUTION</u>	
Aquifer Model: <u>Unconfined</u>	Solution Method: <u>Bouwer-Rice</u>
K = <u>0.08189 m/day</u>	y0 = <u>3.732 cm</u>



*[Handwritten signature]*



HIDROGEOLOGIA SANTUARIO NACIONAL DE LAS LAGUNAS DE MEJIA

Data Set: F:\Permeabilidad Lagunas\PI-10.aqt

Date: 10/24/16

Time: 12:18:21

PROJECT INFORMATION

Company: OEFA  
 Project: PEA TAMBO  
 Location: MEJIA  
 Test Well: PI-09

AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 60 cm

Anisotropy Ratio ( $K_z/K_r$ ): 1

WELL DATA (PI-09)

Initial Displacement: 1 cm  
 Total Well Penetration Depth: 1 cm  
 Casing Radius: 2.54 cm

Static Water Column Height: 60 cm  
 Screen Length: 1 cm  
 Wellbore Radius: 2.54 cm  
 Gravel Pack Porosity: 0.27

SOLUTION

Aquifer Model: Unconfined

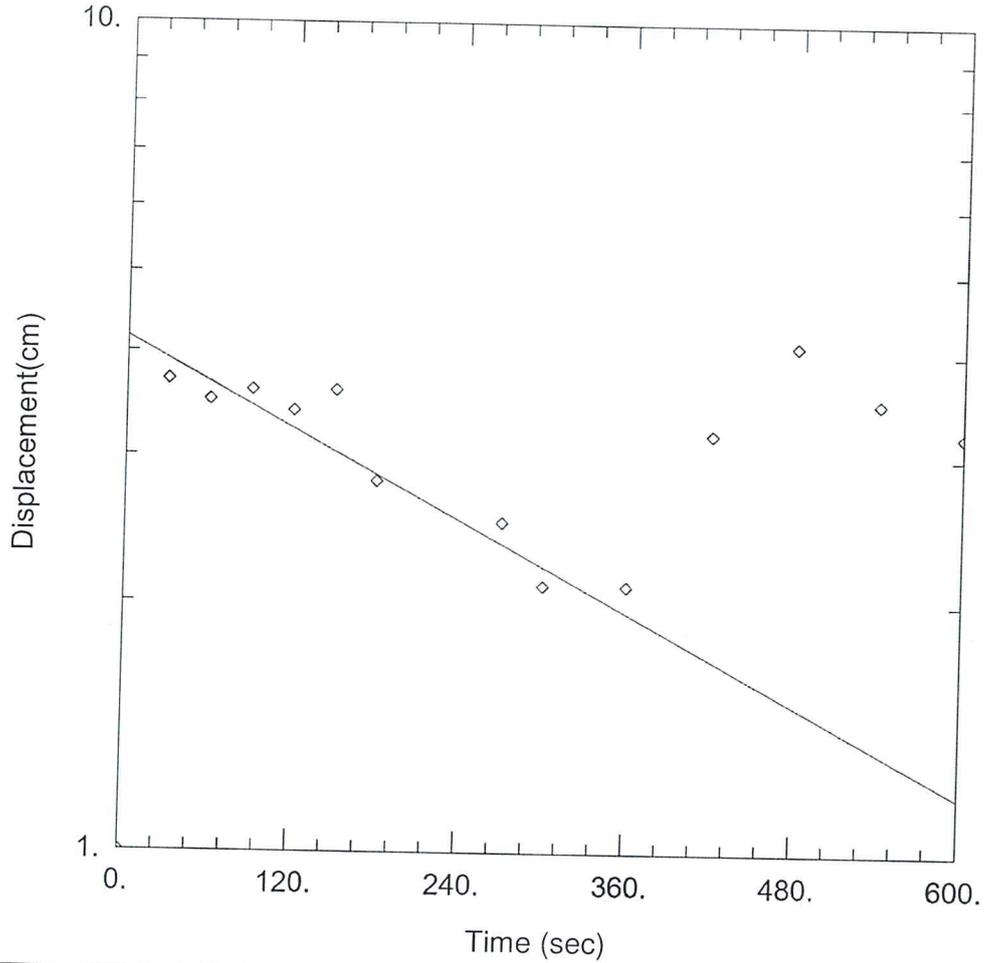
Solution Method: Bower-Rice

$K = 6.987$  m/day

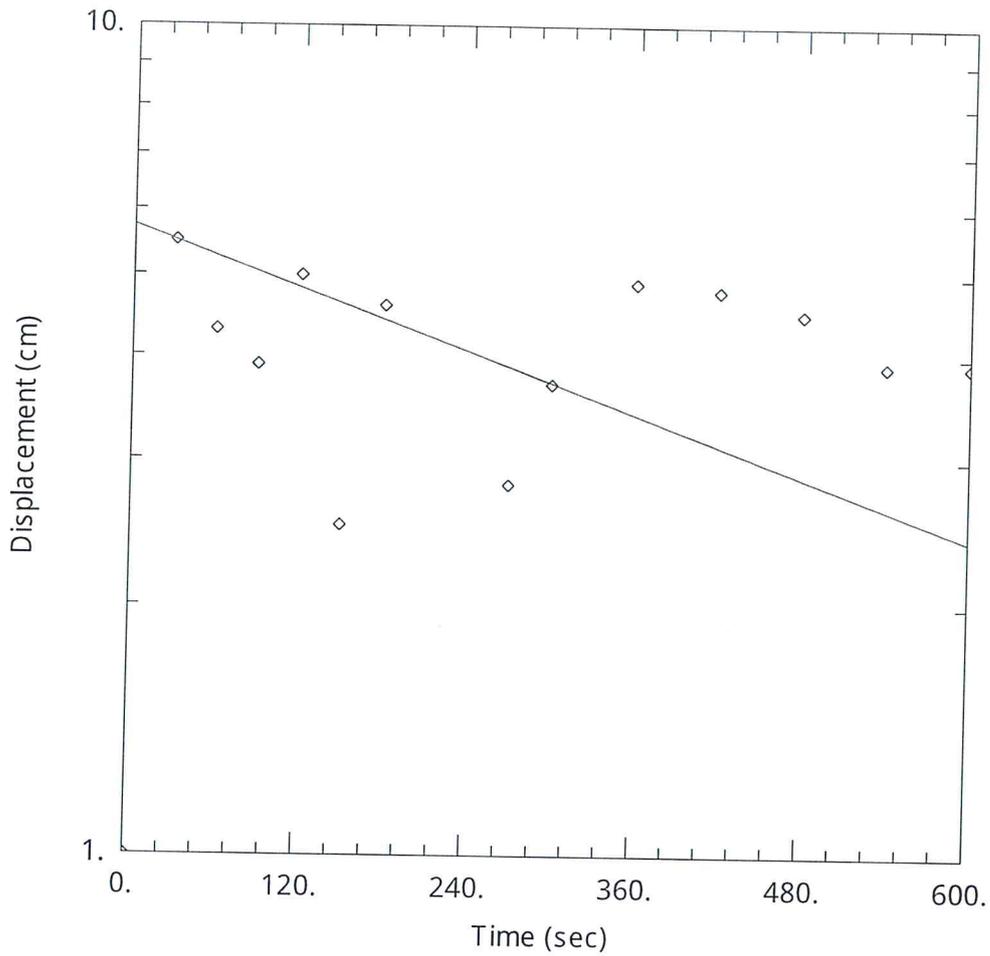
$y_0 = 5.448$  cm



*[Handwritten signature]*



<b>HIDROGEOLOGIA SANTUARIO NACIONAL DE LAS LAGUNAS DE MEJÍA</b>	
Data Set: <u>F:\Permeabilidad Lagunas\PI-11.aqt</u>	
Date: <u>10/24/16</u>	Time: <u>12:19:47</u>
<b>PROJECT INFORMATION</b>	
Company: <u>OEFA</u>	
Project: <u>PEA TAMBO</u>	
Location: <u>MEJIA</u>	
Test Well: <u>PI-10</u>	
<b>AQUIFER DATA</b>	
Saturated Thickness: <u>60. cm</u>	Anisotropy Ratio (Kz/Kr): <u>1.</u>
<b>WELL DATA (PI-11)</b>	
Initial Displacement: <u>1. cm</u>	Static Water Column Height: <u>60. cm</u>
Total Well Penetration Depth: <u>1. cm</u>	Screen Length: <u>1. cm</u>
Casing Radius: <u>2.54 cm</u>	Wellbore Radius: <u>2.54 cm</u>
	Gravel Pack Porosity: <u>0.27</u>
<b>SOLUTION</b>	
Aquifer Model: <u>Unconfined</u>	Solution Method: <u>Bouwer-Rice</u>
K = <u>9.07 m/day</u>	$\gamma_0 = 4.167$ cm



HIDROGEOLOGIA SANTUARIO NACIONAL DE LAS LAGUNAS DE MEJIA

Data Set: F:\Permeabilidad Lagunas\PI-12.aqt

Date: 10/24/16

Time: 12:23:37

PROJECT INFORMATION

Company: OEFA  
 Project: PEA TAMBO  
 Location: MEJIA  
 Test Well: PI-12

AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 60. cm

Anisotropy Ratio ( $K_z/K_r$ ): 1.

WELL DATA (PI-12)

Initial Displacement: 1. cm  
 Total Well Penetration Depth: 1. cm  
 Casing Radius: 2.54 cm

Static Water Column Height: 60. cm  
 Screen Length: 1. cm  
 Wellbore Radius: 2.54 cm  
 Gravel Pack Porosity: 0.27

SOLUTION

Aquifer Model: Unconfined

Solution Method: Bouwer-Rice

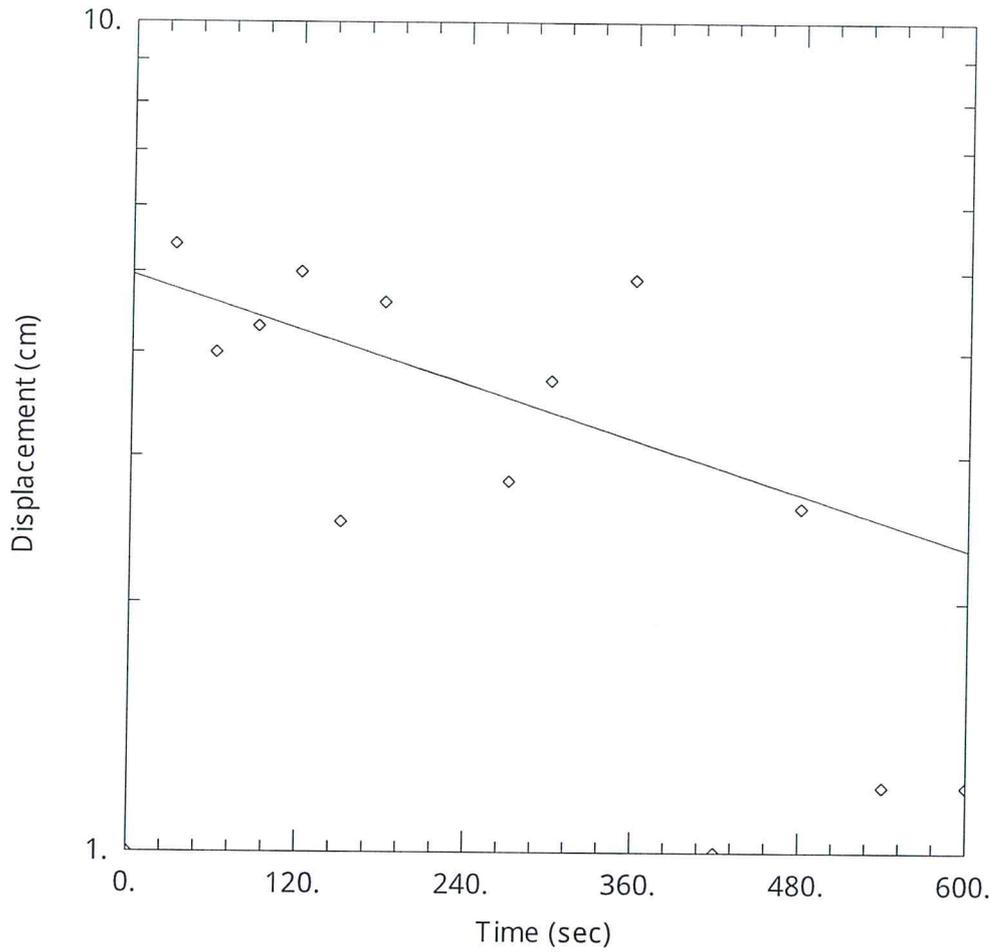
$K = 6.226$  m/day

$y_0 = 5.738$  cm





*[Handwritten signature]*



HIDROGEOLOGIA SANTUARIO NACIONAL DE LAS LAGUNAS DE MEJIA

Data Set: F:\Permeabilidad Lagunas\PI-14.aqt

Date: 10/24/16

Time: 12:26:28

PROJECT INFORMATION

Company: OEFA  
 Project: PEA TAMBO  
 Location: MEJIA  
 Test Well: PI-14

AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 60 cm

Anisotropy Ratio ( $K_z/K_r$ ): 1

WELL DATA (PI-14)

Initial Displacement: 1 cm  
 Total Well Penetration Depth: 1 cm  
 Casing Radius: 2.54 cm

Static Water Column Height: 60 cm  
 Screen Length: 1 cm  
 Wellbore Radius: 2.54 cm  
 Gravel Pack Porosity: 0.27

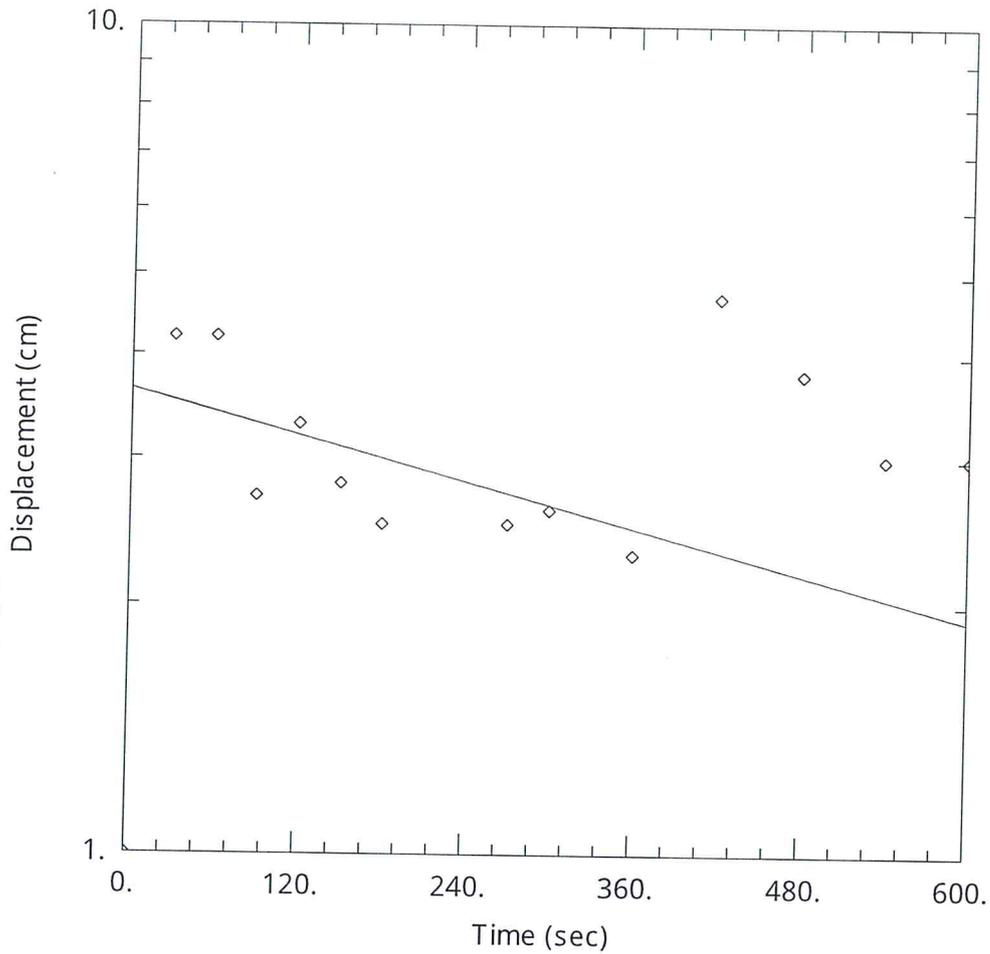
SOLUTION

Aquifer Model: Unconfined

Solution Method: Bower-Rice

$K = 5.458$  m/day

$y_0 = 4.961$  cm



HIDROGEOLOGIA SANTUARIO NACIONAL DE LAS LAGUNAS DE MEJIA

Data Set: F:\Permeabilidad Lagunas\PI-15.aqt

Date: 10/24/16

Time: 12:27:43

PROJECT INFORMATION

Company: OEFA  
 Project: PEA TAMBO  
 Location: MEJIA  
 Test Well: PI-15

AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 60. cm

Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.

WELL DATA (PI-15)

Initial Displacement: 1. cm  
 Total Well Penetration Depth: 1. cm  
 Casing Radius: 2.54 cm

Static Water Column Height: 60. cm  
 Screen Length: 1. cm  
 Wellbore Radius: 2.54 cm  
 Gravel Pack Porosity: 0.27

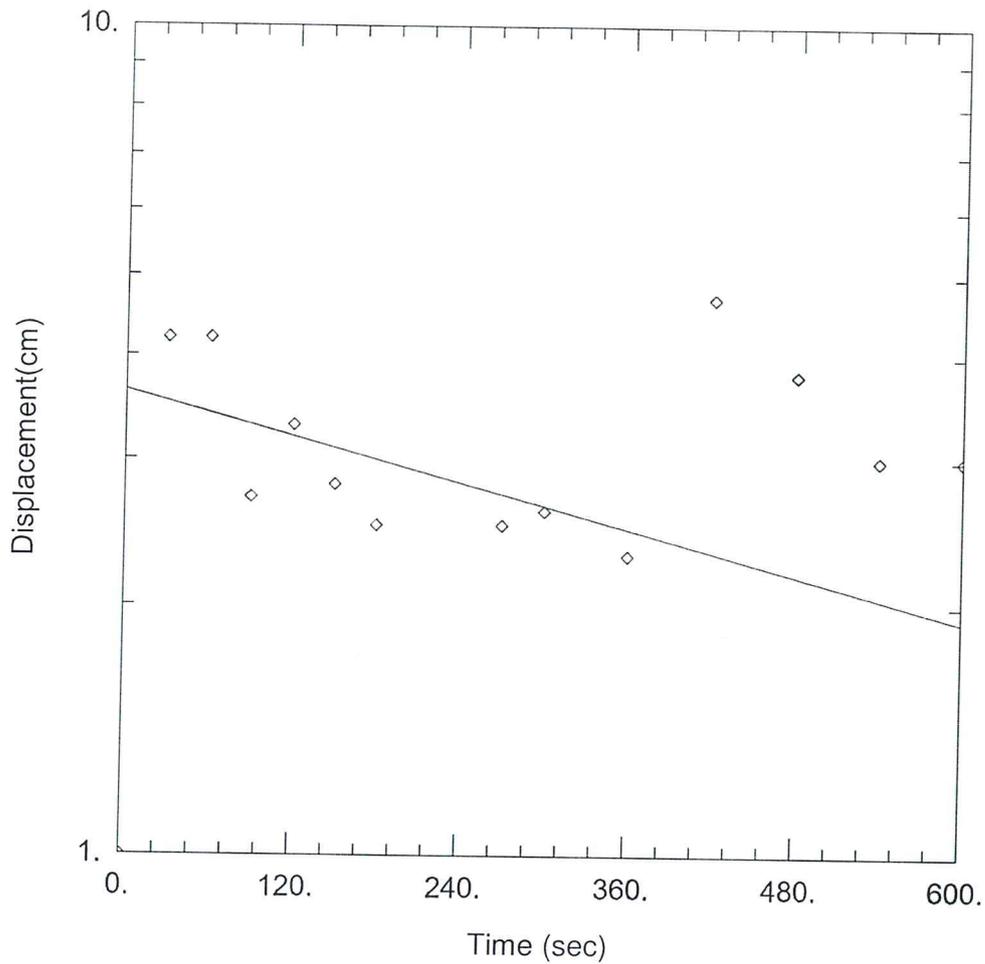
SOLUTION

Aquifer Model: Unconfined

Solution Method: Bouwer-Rice

K = 4.569 m/day

y0 = 3.631 cm



HIDROGEOLOGIA SANTUARIO NACIONAL DE LAS LAGUNAS DE MEJÍA

Data Set: F:\Permeabilidad Lagunas\PI-16.aqt

Date: 10/24/16

Time: 12:29:25

PROJECT INFORMATION

Company: OEFA  
 Project: PEA TAMBO  
 Location: MEJIA  
 Test Well: PI-15

AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 60. cm

Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.

WELL DATA (PI-16)

Initial Displacement: 1. cm

Static Water Column Height: 60. cm

Total Well Penetration Depth: 1. cm

Screen Length: 1. cm

Casing Radius: 2.54. cm

Wellbore Radius: 2.54 cm

Gravel Pack Porosity: 0.27

SOLUTION

Aquifer Model: Unconfined

Solution Method: Bouwer-Rice

K = 4.569 m/day

$\gamma_0 =$ 3.631 cm





PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Organismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

dirección

"Decenio de las Personas con discapacidad en el Perú"  
"Año de la Consolidación del Mar de Grau"



## ANEXO 3

# TABLA DE RESULTADOS DE CALIDAD DE AGUA



PERÚ

Ministerio  
del AmbienteOrganismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

"Decenio de las Personas con discapacidad en el Perú"  
"Año de la Consolidación del Mar de Grau"

Tabla N°1: Base de datos de calidad de agua de las lagunas del Santuario Nacional Lagunas de Mejía

N°	Punto de muestreo	Institución	Descripción	ALTITUD	WGS-84 Zona 19		FECHA	HORA	pH	C.E. (µs/cm)	O.D (mg/L)	T (°C)	As Total mg/L	Ba Total mg/L	Be Total mg/L	Bi Total mg/L	B Total mg/L	Cd Total mg/L	Ca Total mg/L	Co Total mg/L	Cu Total mg/L	Cr Total mg/L	Sn Total mg/L	Sr Total mg/L	P Total mg/L	Fe Total mg/L	Li Total mg/L
					Este	Norte																					
1	AG-84	OEFA	Río Tambo a 200 metros aguas abajo de la confluencia con la quebrada Huayrondo.	263	222563	811331	11/05/2016	11:51	8,27	2410	8,22	25,4	0,302	0,069	<0,0005	<0,01	5,634	<0,001	107,1	<0,001	0,018	<0,001	<0,003	1,441,8	0,13	0,616	0,9874
2	AG-85	OEFA	Río Tambo, 15 metros aguas abajo del medio de traslado "Huro" en el anexo Pascana.	224	218996	8119634	11/05/2016	14:46	8,23	2400	-	21,2	0,281	0,071	<0,0005	<0,01	5,453	<0,001	105,9	<0,001	0,018	<0,001	<0,003	1,3653	0,14	0,704	0,942
3	AG-86	OEFA	En el río Tambo, a la altura del puente Santa Rosa.	144	213529	8115240	11/05/2016	17:20	8,29	2360	8,04	23,7	0,271	0,069	<0,0005	<0,01	5,502	<0,001	109,7	<0,001	0,017	<0,001	<0,003	1,4701	0,07	0,613	0,95
4	AG-87	OEFA	En el río Tambo, a la altura del puente Chucarapi.	84	208803	8111024	11/05/2016	18:00	8,23	2410	8,17	23,1	0,281	0,071	<0,0005	<0,01	5,418	<0,001	113,7	<0,001	0,015	<0,001	<0,003	1,5243	0,07	0,62	0,942
5	AG-88	OEFA	Quebrada Rosa María	768	201861	8117044	09/05/2016	10:29	6,72	8210	1,34	23,5	0,0097	0,038	<0,0005	<0,01	1,833	<0,001	627	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	3,5879	0,02	0,004	0,026
6	AG-89	OEFA	En el río Tambo, antes del puente Freyre.	26	207719	8106667	12/05/2016	10:08	8,11	2460	8,73	24,2	0,181	0,065	<0,0005	<0,01	5,114	<0,001	119,4	<0,001	0,011	<0,001	<0,003	1,7358	0,04	0,58	0,829
7	AG-90	OEFA	En el río Tambo, después del puente Freyre.	5	200562	8101286	12/05/2016	12:00	8,29	2460	8,74	20,5	0,165	0,086	<0,0005	<0,01	4,966	<0,001	116,4	<0,001	0,014	<0,001	<0,003	1,7562	0,15	1,572	0,828
8	AG-91	OEFA	En el río Tambo, desembocadura al mar.	0	198164	8099448	12/05/2016	14:46	8,01	2680	7,66	26	0,144	0,078	<0,0005	<0,01	5,115	<0,001	130,9	<0,001	0,015	<0,001	<0,003	1,9112	0,09	1,614	0,541
9	AG-92	OEFA	Al Sur de la laguna Mejía.	13	193696	8103510	17/05/2016	18:10	8,15	5580	9,18	22,2	0,064	0,051	<0,0005	<0,01	5,714	<0,001	130,2	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	1,8508	0,13	0,129	0,706
10	AG-93	OEFA	Parte media de la Laguna Mejía.	14	193732	8103500	16/05/2016	18:17	8,12	5570	8,68	22,3	0,063	0,051	<0,0005	<0,01	5,718	<0,001	131,1	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	1,8352	0,13	0,11	0,706
11	AG-94	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Norte	20	193989	8103258	16/05/2016	17:38	7,59	5700	8,70	22,3	0,135	0,058	<0,0005	<0,01	5,747	<0,001	140,2	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	1,9998	0,15	0,066	0,741
12	AG-95	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Norte	20	194014	8103227	16/05/2016	17:35	7,49	5690	3,81	21,9	0,136	0,057	<0,0005	<0,01	5,775	<0,001	148,3	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	2,0523	0,15	0,058	0,742
13	AG-96	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Norte	20	194048	8103300	17/05/2016	17:21	7,58	5700	4,65	25,3	0,136	0,056	<0,0005	<0,01	5,693	<0,001	142,1	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	2,0385	0,15	0,064	0,74
14	AG-97	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Norte		193998	8103202	16/05/2016	17:15	8,79	5700	8,21	22	0,08	0,053	<0,0005	<0,01	6,95	<0,001	169,6	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	2,2444	0,06	0,142	0,888
15	AG-98	OEFA	Parte media de la Laguna Iberia Norte	21	194146	8103138	16/05/2016	17:06	8,02	5690	8,12	22,1	0,074	0,049	<0,0005	<0,01	6,171	<0,001	123,5	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	1,9218	0,06	0,144	0,789
16	AG-99	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Centro	23	194273	8102932	16/05/2016	16:30	8,10	6280	12,51	21,9	0,011	0,058	<0,0005	<0,01	7,093	<0,001	107,2	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	1,9124	0,05	0,062	0,9
17	AG-100	OEFA	Parte media de la Laguna Iberia Centro	22	194282	8102857	16/05/2016	16:19	9,07	5700	13,90	22,3	0,061	0,038	<0,0005	<0,01	7,535	<0,001	106,7	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	1,8852	0,05	0,016	0,9642
18	AG-101	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Sur	21	194806	8102348	16/05/2016	15:29	8,25	6290	10,65	22	0,06	0,043	<0,0005	<0,01	7,074	<0,001	106,2	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	1,8815	0,05	0,042	0,9
19	AG-102	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Sur	23	194990	8102189	16/05/2016	15:20	8,95	5730	9,52	21,9	0,0098	0,039	<0,0005	<0,01	7,151	<0,001	79,25	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	1,6666	0,04	0,021	0,927
20	AG-103	OEFA	Parte media de la Laguna Iberia Sur	21	195202	8101909	16/05/2016	14:57	8,82	5850	13,09	28,5	0,029	0,041	<0,0005	<0,01	7,282	<0,001	86,57	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	1,7204	0,06	0,057	0,933
21	AG-104	OEFA	Parte media de la Laguna Iberia Sur	21	195133	8101866	16/05/2016	14:45	8,03	5190	8,45	24,1	0,077	0,049	<0,0005	<0,01	7,82	<0,001	77,32	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	2,042	0,06	0,07	0,885
22	AG-105	OEFA	Parte media de la Laguna Iberia Sur	21	195285	8102044	16/05/2016	14:25	8,83	5760	10,66	22,6	0,06	0,038	<0,0005	<0,01	7,232	<0,001	82,77	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	1,7365	0,03	0,028	0,944
23	AG-106	OEFA	Al sur de la laguna Iberia Sur.	23	195627	8101482	16/05/2016	14:13	7,60	6930	4,30	22,9	0,03	0,058	<0,0005	<0,01	7,182	<0,001	126,6	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	2,1714	0,65	0,9747	0,925
24	AG-107	OEFA	Al sur de la laguna Iberia Sur.	23	195646	8101541	16/05/2016	14:03	8,00	10630	7,03	22,6	0,115	0,062	<0,0005	<0,01	8,442	<0,001	171,1	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	3,0533	0,68	0,728	1,049
25	AG-108	OEFA	Parte media de la Laguna Boquerón.	19	196861	8100280	16/05/2016	13:08	8,10	10990	6,89	24,6	0,134	0,075	<0,0005	<0,01	10,31	<0,001	143,1	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	3,928	0,79	0,784	1,055
26	AG-109	OEFA	Quebrada Rosa María	805	202144	8117056	09/05/2016	12:08	4,43	9500	7,07	20,3	<0,007	0,016	<0,0005	<0,01	1,965	<0,001	603,3	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	3,7813	0,05	0,04	0,022
27	AM-02	OEFA	Mar frente a la desembocadura del río Tambo	0	196656	8099090	14/05/2016	13:11	7,40	52100	6,38	19,5	<0,007	0,005	<0,0005	<0,01	3,18	<0,001	333	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	6,468	0,07	0,118	0,087
28	AM-04	OEFA	Mar frente al sector de Motobomba	0	191855	8103102	14/05/2016	14:12	7,21	55200	7,82	19,9	<0,007	0,008	<0,0005	<0,01	3,186	<0,001	344,1	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	6,5836	0,08	0,026	0,089
29	AM-05	OEFA	Mar frente a la playa El Sombrero	0	189155	8107503	15/05/2016	10:47	7,55	52400	5,59	16,9	<0,007	0,003	<0,0005	<0,01	3,308	<0,001	373,6	<0,001	<0,002	<0,001	<0,003	5,0952	0,05	0,031	0,033
30	AM-L	INGEMMET	Agua de Mar Chorillos agua dulce	-	-	-	2015	-	7,62	51800	-	18,6	0,01	0,014	<0,002	<0,006	2,13	<0,001	395,6	<0,001	0,009	<0,02	-	9,03	-	0,6	0,1
31	PZ-1	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	439	208867	8115443	set 2009	-	7,60	7760	-	17,7	0,013	0,02	-	-	2,6	-	511	0,0222	0,004	0,0009	-	3	-	0,003	0,03
32	PZ-2	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	320	208669	8114537	set 2009	-	8,00	7320	-	18,5	0,006	0,01	-	-	2,1	-	623	0,0104	0,002	0	-	3	-	0,004	0,02
33	PZ-3	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	480	207805	8115395	set 2009	-	7,70	8270	-	24,6	0	0,03	-	-	2,2	-	578	0,0024	0,003	0,0002	-	3	-	0,006	0,05





N°	Punto de muestreo	Institución	Descripción	ALTITUD	WGS-84 Zona 19		FECHA	HORA	pH	C.E. (µs/cm)	O.D (mg/L)	T (°C)	As Total	Ba Total	Be Total	Bi Total	B Total	Cd Total	Ca Total	Co Total	Cu Total	Cr Total	Sn Total	Sr Total	P Total	Fe Total	Li Total
					mg/L	mg/L							mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L		
34	PZ-4	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	536	205229	8115967	set 2009	-	7,80	8710	-	17,5	0,006	0,03	-	-	1,8	-	722	0,0012	0,005	0,0016	-	5	-	0	0,04
35	PZ-6	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	800	205865	8117404	set 2009	-	8,40	2667	-	16,3	0,02	0,05	-	-	3,3	-	111	0,0002	0,005	0,0007	-	2	-	0,004	0,55
36	PZ-7	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	362	205427	8114070	set 2009	-	8,00	4490	-	17,9	0,011	0,03	-	-	1,8	-	145	0,0022	0,001	0,0006	-	1	-	0	0,03
37	PZ-8	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	528	202199	8115742	set 2009	-	7,90	9980	-	20,4	0,003	0,04	-	-	2,4	-	662	0	0,003	0	-	4	-	0,008	0,03
38	SA-1	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	790	196 254	8122 182	set 2009	-	7,40	38800	-	19,2	0	0	-	-	11,2	-	631	0	0	0	-	6	-	0	0

(-) En estos puntos no se analizaron estos parámetros  
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°2: Base de datos de calidad de agua de las lagunas del Santuario Nacional Lagunas de Mejía

N°	Punto de muestreo	Institución	Descripción	ALTITUD	WGS-84 Zona 19		FECHA	HORA	Mg Total	Mn Total	Mo Total	Ni Total	Ag Total	Pb Total	K Total	Se Total	Na Total	Tl Total	Ti Total	V Total	Zn Total	Bicarbonatos
					mg/L	mg/L			mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
1	AG-84	OEFA	Río Tambo a 200 metros aguas abajo de la confluencia con la quebrada Huayrondo.	263	222563	811331	11/05/2016	11:51	25,73	0,077	0,004	<0,002	<0,002	<0,001	19,98	<0,006	303,6	<0,007	0,016	<0,001	0,023	132,6
2	AG-85	OEFA	Río Tambo, 15 metros aguas abajo del medio de traslado "Huario" en el anexo Pascana.	224	218996	8119634	11/05/2016	14:46	25,11	0,078	0,004	<0,002	<0,002	<0,001	18,71	<0,006	303,3	<0,007	0,018	<0,001	0,023	127,2
3	AG-86	OEFA	En el río Tambo, a la altura del puente Santa Rosa.	144	213529	8115240	11/05/2016	17:20	26,07	0,077	0,004	<0,002	<0,002	<0,001	19,94	<0,006	299,3	<0,007	0,017	<0,001	0,024	136,6
4	AG-87	OEFA	En el río Tambo, a la altura del puente Chucarapi.	84	208803	8111024	11/05/2016	18:00	27,24	0,082	0,005	<0,002	<0,002	<0,001	19,56	<0,006	301	<0,007	0,018	<0,001	0,021	147,4
5	AG-88	OEFA	Quebrada Rosa María	768	201861	8117044	09/05/2016	10:29	337,1	0,005	<0,002	<0,002	<0,002	0,004	50,59	0,014	856,1	<0,007	<0,001	<0,001	0,004	108,5
6	AG-89	OEFA	En el río Tambo, antes del puente Freyre.	26	207719	8106667	12/05/2016	10:08	26,35	0,073	<0,002	<0,002	<0,002	<0,001	21,32	<0,006	346,6	<0,007	0,015	<0,001	0,011	170
7	AG-90	OEFA	En el río Tambo, después del puente Freyre.	5	200562	8101286	12/05/2016	12:00	26,75	0,116	<0,002	<0,002	<0,002	0,003	22,18	<0,006	347,5	<0,007	0,049	<0,001	0,015	145,8
8	AG-91	OEFA	En el río Tambo, desembocadura al mar.	0	198164	8099448	12/05/2016	14:46	30,38	0,141	<0,002	<0,002	<0,002	0,005	25,17	<0,006	382,5	<0,007	0,053	<0,001	0,014	184,7
9	AG-92	OEFA	Al Sur de la laguna Mejía.	13	193696	8103510	17/05/2016	18:10	58,96	0,299	0,007	<0,002	<0,002	0,007	63,55	<0,006	906,6	<0,007	<0,001	<0,001	0,285	370,2
10	AG-93	OEFA	Parte media de la Laguna Mejía.	14	193732	8103500	16/05/2016	18:17	59,06	0,302	0,007	<0,002	<0,002	0,0097	62,5	<0,006	871,6	<0,007	<0,001	<0,001	0,021	372,4
11	AG-94	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Norte	20	193989	8103258	16/05/2016	17:38	63,32	0,331	0,005	<0,002	<0,002	0,008	68,51	<0,006	903	<0,007	<0,001	<0,001	0,009	436,9
12	AG-95	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Norte	20	194014	8103227	16/05/2016	17:35	64,55	0,329	<0,002	<0,002	<0,002	0,007	70,33	<0,006	875,5	<0,007	<0,001	<0,001	0,0096	431,7
13	AG-96	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Norte	20	194048	8103300	17/05/2016	17:21	62,54	0,334	<0,002	0,016	<0,002	0,008	70,45	<0,006	832,4	<0,007	<0,001	<0,001	0,027	426,1
14	AG-97	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Norte		193998	8103202	16/05/2016	17:15	77,04	0,192	0,008	<0,002	<0,002	0,002	71,35	<0,006	590,7	<0,007	0,003	<0,001	0,005	274,5
15	AG-98	OEFA	Parte media de la Laguna Iberia Norte	21	194146	8103138	16/05/2016	17:06	63,15	0,206	0,007	<0,002	<0,002	0,008	67,66	<0,006	878,2	<0,007	<0,001	<0,001	0,093	282,9
16	AG-99	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Centro	23	194273	8102932	16/05/2016	16:30	72,42	0,061	0,005	<0,002	<0,002	0,0097	73,59	<0,006	1000	<0,007	<0,001	<0,001	0,008	207,6
17	AG-100	OEFA	Parte media de la Laguna Iberia Centro	22	194282	8102857	16/05/2016	16:19	74,47	0,024	0,008	<0,002	<0,002	0,008	71,1	<0,006	943,4	<0,007	<0,001	<0,001	0,006	93,9
18	AG-101	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Sur	21	194806	8102348	16/05/2016	15:29	70,86	0,047	0,005	<0,002	<0,002	0,009	73,53	<0,006	1025	<0,007	<0,001	<0,001	0,012	198,4
19	AG-102	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Sur	23	194990	8102189	16/05/2016	15:20	64,34	0,019	0,009	<0,002	<0,002	0,012	66,51	<0,006	924	<0,007	<0,001	<0,001	0,01	99,7
20	AG-103	OEFA	Parte media de la Laguna Iberia Sur	21	195202	8101909	16/05/2016	14:57	65,76	0,052	0,007	<0,002	<0,002	0,009	68,77	<0,006	968,7	<0,007	<0,001	<0,001	0,008	134,5
21	AG-104	OEFA	Parte media de la Laguna Iberia Sur	21	195133	8101866	16/05/2016	14:45	57,45	0,075	<0,002	<0,002	<0,002	0,005	71,79	<0,006	890	<0,007	<0,001	<0,001	0,008	217,1
22	AG-105	OEFA	Parte media de la Laguna Iberia Sur	21	195285	8102044	16/05/2016	14:25	64,99	0,024	0,008	<0,002	<0,002	0,011	70,15	<0,006	942,4	<0,007	<0,001	<0,001	0,006	101,4
23	AG-106	OEFA	Al sur de la laguna Iberia Sur.	23	195627	8101482	16/05/2016	14:13	86,56	0,395	<0,002	<0,002	<0,002	0,008	88,43	<0,006	1154	<0,007	0,004	<0,001	0,015	437,8



Handwritten signature



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

"Decenio de las Personas con discapacidad en el Perú"  
"Año de la Consolidación del Mar de Grau"

N°	Punto de muestreo	Institución	Descripción	ALTITUD	WGS-84 Zona 19		FECHA	HORA	Mg Total	Mn Total	Mo Total	Ni Total	Ag Total	Pb Total	K Total	Se Total	Na Total	Tl Total	Ti Total	V Total	Zn Total	Bicarbonatos
					mg/L	mg/L			mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
24	AG-107	OEFA	Al sur de la laguna Iberia Sur.	23	195646	8101541	16/05/2016	14:03	139,5	0,399	<0,002	<0,002	<0,002	0,009	132,6	<0,006	1678	<0,007	<0,001	<0,001	0,004	568,3
25	AG-108	OEFA	Parte media de la Laguna Boquerón.	19	196861	8100280	16/05/2016	13:08	143,2	0,419	<0,002	<0,002	<0,002	0,008	160,4	<0,006	1982	<0,007	0,002	<0,001	0,008	583,9
26	AG-109	OEFA	Quebrada Rosa María	805	202144	8117056	09/05/2016	12:08	315,8	0,005	<0,002	<0,002	<0,002	0,003	58,7	0,007	1020	<0,007	<0,001	<0,001	0,015	7,1
27	AM-02	OEFA	Mar frente a la desembocadura del río Tambo	0	196656	8099090	14/05/2016	13:11	1019	0,013	<0,002	<0,002	<0,002	<0,001	402,1	<0,006	10360	<0,007	<0,001	<0,001	0,042	-
28	AM-04	OEFA	Mar frente al sector de Motobomba	0	191855	8103102	14/05/2016	14:12	1037	0,011	<0,002	<0,002	<0,002	<0,001	409,7	<0,006	11320	<0,007	<0,001	<0,001	0,015	-
29	AM-05	OEFA	Mar frente a la playa El Sombrero	0	189155	8107503	15/05/2016	10:47	1233	0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,001	311,1	<0,006	9546	<0,007	<0,001	<0,001	0,02	-
30	AM-L	INGEMMET	Agua de Mar Chorillos agua dulce	-	-	-	2015	-	1181,3	0,001	-	-	<0,005	-	380,1	-	9127,4	-	-	-	-	149
31	PZ-1	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	439	208867	8115443	set 2009	-	134	0,31	0,02	0,01	-	-	134	0,011	654	-	-	0	0,14	138
32	PZ-2	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	320	208669	8114537	set 2009	-	110	0,27	0,06	0,002	-	-	110	0	621	-	-	0	0,02	145
33	PZ-3	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	480	207805	8115395	set 2009	-	146	0,86	0,02	0,003	-	-	146	0,0158	683	-	-	0	0,1	111
34	PZ-4	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	536	205229	8115967	set 2009	-	209	0,26	0,04	0,001	-	-	209	0,0042	854	-	-	0,0004	0,04	143
35	PZ-6	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	800	205865	8117404	set 2009	-	24	0,03	0,01	0,002	-	-	24	0,0013	283	-	-	0,0015	0,01	117
36	PZ-7	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	362	205427	8114070	set 2009	-	85	0,35	0,04	0,003	-	-	85	0,0004	597	-	-	0,0033	0,01	173
37	PZ-8	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	528	202199	8115742	set 2009	-	438	0,01	0,02	0	-	-	438	0,0175	1340	-	-	0,0057	0,06	218
38	SA-1	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	790	196 254	8122 182	set 2009	-	317	0	0	0	-	-	317	0	4997	-	-	0	0	210

(-) En estos puntos no se analizaron estos parámetros

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°3: Base de datos de calidad de agua de las lagunas del Santuario Nacional Lagunas de Mejía

N°	Punto de muestreo	Institución	Descripción	ALTITUD	WGS-84 Zona 19		FECHA	HORA	Fosfato	Cloruros	N Nitrito	N Amoniacal	N Nitrato	Nitrógeno Total	Sulfatos	Si Total	Hg Total	Al Total	Sb Total	Isótopos	
					Este	Norte														Oxígeno 18	Deuterio
1	AG-84	OEFA	Río Tambo a 200 metros aguas abajo de la confluencia con la quebrada Huayrondo.	263	222563	811331	11/05/2016	11:51	0,101	-	0,031	0,04	0,095	<1	254,5	16,9	<0,0001	0,9904	<0,006	-	-
2	AG-85	OEFA	Río Tambo, 15 metros aguas abajo del medio de traslado "Huario" en el anexo Pascana.	224	218996	8119634	11/05/2016	14:46	0,129	-	0,02	<0,01	0,32	<1	269,7	16,5	<0,0001	1,083	<0,006	-	-
3	AG-86	OEFA	En el río Tambo, a la altura del puente Santa Rosa.	144	213529	8115240	11/05/2016	17:20	0,033	-	<0,005	<0,01	0,53	<1	249,4	16,9	<0,0001	0,9603	<0,006	-	-
4	AG-87	OEFA	En el río Tambo, a la altura del puente Chucarapi.	84	208803	8111024	11/05/2016	18:00	0,041	-	0,02	0,06	0,24	<1	278,8	16,8	<0,0001	0,935	<0,006	-	-
5	AG-88	OEFA	Quebrada Rosa María	768	201861	8117044	09/05/2016	10:29	0,024	2317	0,031	<0,01	26,31	<1	653	14	0,0002	0,005	<0,006	-	-
6	AG-89	OEFA	En el río Tambo, antes del puente Freyre.	26	207719	8106667	12/05/2016	10:08	0,048	622,5	0,03	0,01	0,54	<1	242,4	16,1	<0,0001	0,669	<0,006	-	-
7	AG-90	OEFA	En el río Tambo, después del puente Freyre.	5	200562	8101286	12/05/2016	12:00	0,077	505	0,019	0,02	0,39	<1	273,5	15,7	<0,0001	1,459	<0,006	-	-



PERÚ

Ministerio del Ambiente

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

"Decenio de las Personas con discapacidad en el Perú"  
"Año de la Consolidación del Mar de Grau"

N°	Punto de muestreo	Institución	Descripción	ALTITUD	WGS-84 Zona 19		FECHA	HORA	Fosfato mg/L	Cloruros mg/L	N Nitrito mg/L	N Amoniacal mg/L	N Nitrato mg/L	Nitrógeno Total mg/L	Sulfatos mg/L	Si Total mg/L	Hg Total mg/L	Al Total mg/L	Sb Total mg/L	Isótopos	
					Este	Norte														Oxígeno 18	Deuterio
8	AG-91	OEFA	En el río Tambo, desembocadura al mar.	0	198164	8099448	12/05/2016	14:46	0,088	667,5	0,027	0,03	0,65	<1	220,7	16,2	<0,0001	1,554	<0,006	-	-
9	AG-92	OEFA	Al Sur de la laguna Mejía.	13	193696	8103510	17/05/2016	18:10	<0,007	1152	<0,005	0,03	<0,05	<1	622,2	13,1	<0,0001	0,016	<0,006	-	-
10	AG-93	OEFA	Parte media de la Laguna Mejía.	14	193732	8103500	16/05/2016	18:17	0,082	1162	<0,005	0,03	<0,05	1,44	597,6	16,3	<0,0001	0,013	<0,006	-	-
11	AG-94	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Norte	20	193989	8103258	16/05/2016	17:38	0,042	1232	<0,005	0,05	<0,05	-	488,4	18,9	<0,0001	0,014	<0,006	-	-
12	AG-95	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Norte	20	194014	8103227	16/05/2016	17:35	0,067	1172	0,005	0,05	<0,05	1,5	394,4	15,7	<0,0001	0,011	<0,006	-	-
13	AG-96	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Norte	20	194048	8103300	17/05/2016	17:21	0,05	1252	0,008	0,04	<0,05	1,36	518,3	19,3	<0,0001	0,012	<0,006	-	-
14	AG-97	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Norte		193998	8103202	16/05/2016	17:15	<0,007	1222	<0,005	0,04	<0,05	-	632,7	16,3	<0,0001	0,062	<0,006	-	-
15	AG-98	OEFA	Parte media de la Laguna Iberia Norte	21	194146	8103138	16/05/2016	17:06	<0,007	1272	<0,005	<0,01	<0,05	<1	562,1	15,6	<0,0001	0,025	<0,006	-	-
	AG-99	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Centro	23	194273	8102932	16/05/2016	16:30	<0,007	1970	<0,005	0,04	<0,05	-	772,2	14,2	<0,0001	0,0095	<0,006	-	-
	AG-100	OEFA	Parte media de la Laguna Iberia Centro	22	194282	8102857	16/05/2016	16:19	0,04	1472	<0,005	0,03	<0,05	<1	632,8	11,5	<0,0001	0,012	<0,006	-	-
18	AG-101	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Sur	21	194806	8102348	16/05/2016	15:29	0,082	1332	<0,005	0,03	<0,05	1,29	737,2	14,5	<0,0001	0,007	<0,006	-	-
19	AG-102	OEFA	Al Norte de la Laguna Iberia Sur	23	194990	8102189	16/05/2016	15:20	<0,007	1282	0,018	0,03	<0,05	-	742,8	10,1	<0,0001	0,009	<0,006	-	-
20	AG-103	OEFA	Parte media de la Laguna Iberia Sur	21	195202	8101909	16/05/2016	14:57	<0,007	1282	<0,005	0,04	0,14	-	401,2	10,8	<0,0001	0,03	<0,006	-	-
21	AG-104	OEFA	Parte media de la Laguna Iberia Sur	21	195133	8101866	16/05/2016	14:45	0,059	1342	<0,005	0,03	<0,05	<1	555,8	14,2	<0,0001	0,028	<0,006	-	-
22	AG-105	OEFA	Parte media de la Laguna Iberia Sur	21	195285	8102044	16/05/2016	14:25	0,037	1472	<0,005	0,03	<0,05	<1	657	11,3	<0,0001	0,007	<0,006	-	-
23	AG-106	OEFA	Al sur de la laguna Iberia Sur.	23	195627	8101482	16/05/2016	14:13	0,512	2430	0,044	0,2	0,12	-	498,9	16,7	<0,0001	0,032	<0,006	-	-
24	AG-107	OEFA	Al sur de la laguna Iberia Sur.	23	195646	8101541	16/05/2016	14:03	0,617	2816	0,215	0,35	0,16	2,22	711,7	14,6	<0,0001	0,024	<0,006	-	-
25	AG-108	OEFA	Parte media de la Laguna Boquerón.	19	196861	8100280	16/05/2016	13:08	0,906	2916	0,32	0,38	0,23	2,17	848,5	15,9	<0,0001	0,027	<0,006	-	-
26	AG-109	OEFA	Quebrada Rosa María	805	202144	8117056	09/05/2016	12:08	0,051	2627	0,26	0,02	25,53	<1	864,3	8,98	<0,0001	0,037	<0,006	-	-
27	AM-02	OEFA	Mar frente a la desembocadura del río Tambo	0	196656	8099090	14/05/2016	13:11	0,071	-	0,016	-	0,57	-	-	0,73	<0,0001	0,109	<0,006	-	-
28	AM-04	OEFA	Mar frente al sector de Motobomba	0	191855	8103102	14/05/2016	14:12	0,059	-	0,021	-	0,47	-	-	0,41	<0,0001	0,021	<0,006	-	-
29	AM-05	OEFA	Mar frente a la playa El Sombrero	0	189155	8107503	15/05/2016	10:47	0,086	-	0,028	-	0,28	-	-	3,76	<0,0001	0,052	<0,006	-	-
30	AM-L	INGEMMET	Agua de Mar Chorillos agua dulce	-	-	-	2015	-	-	18702	-	-	-	-	-	-	<0,02	-	-	-	-
31	PZ-1	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	439	208867	8115443	set 2009	-	-	1647	-	-	-	0,2	1851	14	-	0	-	-0,5	-4,4

S  
X



PERÚ

Ministerio  
del AmbienteOrganismo de Evaluación y  
Fiscalización Ambiental - OEFA

Dirección de Evaluación

"Decenio de las Personas con discapacidad en el Perú"  
"Año de la Consolidación del Mar de Grau"

N°	Punto de muestreo	Institución	Descripción	ALTITUD	WGS-84 Zona 19		FECHA	HORA	Fosfato mg/L	Cloruros mg/L	N Nitrito mg/L	N Amoniacal mg/L	N Nitrato mg/L	Nitrógeno Total mg/L	Sulfatos mg/L	Si Total mg/L	Hg Total mg/L	Al Total mg/L	Sb Total mg/L	Isótopos	
					Este	Norte														Oxígeno 18	Deuterio
32	PZ-2	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	320	208669	8114537	set 2009	-	-	1614	-	-	-	0,4	1589	20	-	0	-	0,9	11,5
33	PZ-3	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	480	207805	8115395	set 2009	-	-	1939	-	-	-	1,1	1689	13	-	0	-	0,95	9,8
34	PZ-4	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	536	205229	8115967	set 2009	-	-	2153	-	-	-	0,9	1628	5	-	0,003	-	-3,79	9,9
35	PZ-6	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	800	205865	8117404	set 2009	-	-	544	-	-	-	0,2	337	7	-	0,009	-	-11,89	10,6
36	PZ-7	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	362	205427	8114070	set 2009	-	-	1054	-	-	-	0,1	446	7	-	0,011	-	0,78	10,6
37	PZ-8	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	528	202199	8115742	set 2009	-	-	2745	-	-	-	25,7	1123	18	-	0	-	0,14	1,7
38	SA-1	SOUTHERN PERU COOPER CORPORATION	piezómetro	790	196 254	8122 182	set 2009	-	-	13279	-	-	-	136,5	2799	0	-	0	-	3,63	12,8

(-) En estos puntos no se analizaron estos parámetros  
Fuente: Elaboración propia



J.  
P.