



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudios de exploración geofísica realizados durante el
2015, 2016 y 2017 en el noroeste de Piura**

Trabajo de Investigación para optar el Grado de
Máster en Ingeniería Civil con mención en Recursos Hídricos

Ana María Paulini Palacios de Silva

**Asesora:
Dra. Ing. Adriadna del Socorro Chávez Jiménez**

Piura, enero de 2022



Dedicatoria

A Rómulo, a mis hijos y a mis padres;

Sin ellos este trabajo no hubiese sido posible.



Agradecimientos

El presente trabajo de investigación es producto del trabajo en equipo, en el cual trabajaron directa e indirectamente muchas personas. La investigación se realizó con el apoyo de Innóvate Perú a través del proyecto 395- PNICP-PIAP-2014 “Caracterización química de los Sedimentos presentes en las zonas de expansión agroindustrial del Noroeste del país; y monitoreo de su comportamiento ante el intemperismo actual y la acción hídrica”, desarrollado por la Universidad de Piura, en el Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria.

Agradezco a Wilfredo Castillo, quien ya no está con nosotros, pero fue pieza clave en el desarrollo de este proyecto. Gracias a que compartió toda su experiencia y conocimiento con los miembros del equipo, se lograron elegir los puntos más representativos para esta investigación.

A Judith Sullón, por su ayuda en el área de geología y su apoyo constante.

A Karen Inga y Rafael Sono, miembros del equipo de investigación, porque aprendieron rápidamente sobre geofísica, participando activamente en todas las salidas de campo.

A Adriadna Chávez, por la paciencia y dirección del presente trabajo.



Resumen

En los últimos años la región noroeste del Perú, ha experimentado un rápido crecimiento productivo en el ámbito de la agroexportación; al punto de ser considerada una de las regiones de más alto crecimiento en ese rubro en el país. Esta actividad trae consigo un aumento en la demanda del recurso hídrico, el cual por las condiciones climáticas de la zona, no está asegurado de manera constante durante todo el año. Por estos motivos, toma relevancia el conocimiento del subsuelo y, por ende, del agua subterránea, pues al ser un recurso más constante que el agua superficial, viene siendo utilizado por los agroexportadores.

El conocimiento del subsuelo implica conocer las propiedades físicas y litológicas de los materiales que lo conforman, así como del agua subterránea. Esto se puede realizar a través de sondeos geoelectricos, que permiten obtener información de las características petrográficas, estructurales, mineralógicas y geoclimáticas que difieren en edad y formación.

Para esta investigación han sido seleccionados 20 puntos, en los que se realizaron sondeos geoelectricos. Los puntos se ubicaron en zonas de cultivo y zonas que presentan un gran potencial de crecimiento agroindustrial; ya que conocer el suelo y la presencia de agua en estas áreas constituyen factores de vital importancia para lograr que este desarrollo sea sostenible. El procesamiento e inversión de datos da como resultado final una imagen 2D, que es interpretada en términos hidrogeológicos. Mediante el análisis de estos puntos, ha sido posible el reconocimiento de discontinuidades en profundidad y la presencia de agua subterránea.

Este trabajo de investigación, fue realizado como parte del proyecto 395- PNICP-PIAP-2014 "Caracterización química de los sedimentos presentes en las zonas de expansión agroindustrial del noroeste del país; y monitoreo de su comportamiento ante el intemperismo actual y la acción hídrica", que se llevó a cabo con fondos de Innóvate Perú del 2015 al 2017. El artículo al que dio origen, fue aprobado y expuesto en el I Congreso Internacional de Ingeniería y Dirección de Proyectos - III Congreso Regional IPMA-LATNET, llevado a cabo en la ciudad de Lima, del 04 al 05 de agosto del 2017 . Por otro lado, este año se presentó y expuso el artículo " Geophysical exploration with 2d resistivity images in the northwest zone of Peru", al 47th Congreso Mundial de Aguas Subterráneas IAH, realizado en Brasil del 20 al 24 de agosto del presente año.



Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO	17
1.1 FUNDAMENTOS DE LA EXPLORACIÓN GEOFÍSICA	17
1.2 CLASIFICACIÓN DE MÉTODOS GEOFÍSICOS	19
1.2.1 Método Magnético	19
1.2.2 Método gravimétrico	19
1.2.3 Métodos eléctricos	19
1.2.4 Método magnetotélúrico	19
1.2.5 Método resistivo	19
1.2.6 Método de caída de potencial	20
1.2.7 Método electromagnético	20
1.2.8 Método sísmico	20
1.2.9 Método radioactivo	20
1.3 MÉTODO ELÉCTRICO RESISTIVO	20
1.3.1 Resistividad del terreno	20
1.3.2 Deducción de las fórmulas	22
1.3.3 Medición de la resistividad en campo	23
1.3.4 Dispositivos de medición	25
1.3.5 Interpretación de resultados	26
CAPÍTULO 2 ZONA DE ESTUDIO	29
2.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	29
2.2 CRITERIOS GEOLÓGICOS PARA UBICACIÓN DE PUNTOS	31
2.3 DESCRIPCIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO	34
2.3.1 Punto A	34
2.3.2 Punto B	34
2.3.3 Punto C	35
2.3.4 Punto D	36
2.3.5 Punto E	37
2.3.6 Punto F	38
2.3.7 Punto G	38
2.3.8 Punto H	39
2.3.9 Punto I	40
2.3.10 Punto J	41
2.3.11 Punto K	42
2.3.12 Punto L	43
2.3.13 Punto M	44
2.3.14 Punto N	45

2.3.15	Punto O.....	46
2.3.16	Punto P.....	47
2.3.17	Punto Q.....	48
2.3.18	Punto R.....	49
2.3.19	Punto S.....	50
2.3.20	Punto T.....	51
CAPÍTULO 3 DATOS DE CAMPO Y RESULTADOS		53
3.1	METODOLOGÍA.....	53
3.2	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS TRES FASES DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA.....	57
3.2.1	Punto A.....	57
3.2.2	Punto B.....	58
3.2.3	Punto C.....	59
3.2.4	Punto D.....	60
3.2.5	Punto E.....	61
3.2.6	Punto F.....	62
3.2.7	Punto G.....	63
3.2.8	Punto H.....	64
3.2.9	Punto I.....	65
3.2.10	Punto J.....	66
3.2.11	Punto K.....	67
3.2.12	Punto L.....	68
3.2.13	Punto M.....	69
3.2.14	Punto N.....	70
3.2.15	Punto O.....	71
3.2.16	Punto P.....	72
3.2.17	Punto Q.....	73
3.2.18	Punto R.....	74
3.2.19	Punto S.....	75
3.2.20	Punto T.....	76
CAPÍTULO 4 ARTÍCULO PUBLICADO.....		79
CONCLUSIONES.....		89
RECOMENDACIONES.....		91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		93

Lista de figuras

Figura 1. Ley de Ohm	23
Figura 2. Flujo eléctrico en medio natural.	24
Figura 3. Configuración Schlumberger.....	24
Figura 4. Configuración Wenner.	25
Figura 5. Distribución de electrodos para realizar una sección.	26
Figura 6. Equipo de prospección geofísica. Distribución de electrodos para modelo 3D (superficie) .	26
Figura 7. Gráfico de interrelación de datos de resistividad aparente vs predictivos.....	27
Figura 8. Modelo 2D del terreno.....	27
Figura 9. Mapa de ubicación de puntos.....	30
Figura 10. Mapa geológico con puntos de muestreo.	33
Figura 11. Punto A.....	34
Figura 12. Punto B.....	35
Figura 13. Punto C.....	36
Figura 14. Punto D.....	37
Figura 15. Punto E.....	37
Figura 16. Punto F.....	38
Figura 17. Punto G.....	39
Figura 18. Punto H.....	40
Figura 19. Punto I.....	41
Figura 20. Punto J.....	42
Figura 21. Punto K.....	43
Figura 22. Punto L.....	44
Figura 23. Punto M.....	45
Figura 24. Punto N.....	46
Figura 25. Punto O.....	47
Figura 26. Punto P.....	48
Figura 27. Punto Q.....	49
Figura 28. Punto R.....	50
Figura 29. Punto S.....	51
Figura 30. Punto T.....	52
Figura 31. Resistímetro Super string R8.....	55
Figura 32. Caja conmutadora.....	55
Figura 33. Electrodos.....	56
Figura 34. Earth Imager 2D.....	56
Figura 35. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto A.....	58
Figura 36. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto B.....	59

Figura 37. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto C.....	60
Figura 38. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto D.....	61
Figura 39. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto E.....	62
Figura 40. Perfiles geoelectrónicos 2D, punto G.....	63
Figura 41. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto G.....	64
Figura 42. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto H.....	65
Figura 43. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto I.....	66
Figura 44. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto J.....	67
Figura 45. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto K.....	68
Figura 46. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto L.....	69
Figura 47. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto M.....	70
Figura 48. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto N.....	71
Figura 49. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto O.....	72
Figura 50. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto P.....	73
Figura 51. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto Q.....	74
Figura 52. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto R.....	75
Figura 53. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto S.....	76
Figura 54. Perfiles geoelectrónicos 2D de las tres campañas de campo, en el punto S.....	77



Lista de Tablas

Tabla 1. Orden de magnitud de las resistividades, en distintos tipos de terreno	21
Tabla 2. Tiempo de medición del Super string R1 y R8.....	54





Introducción

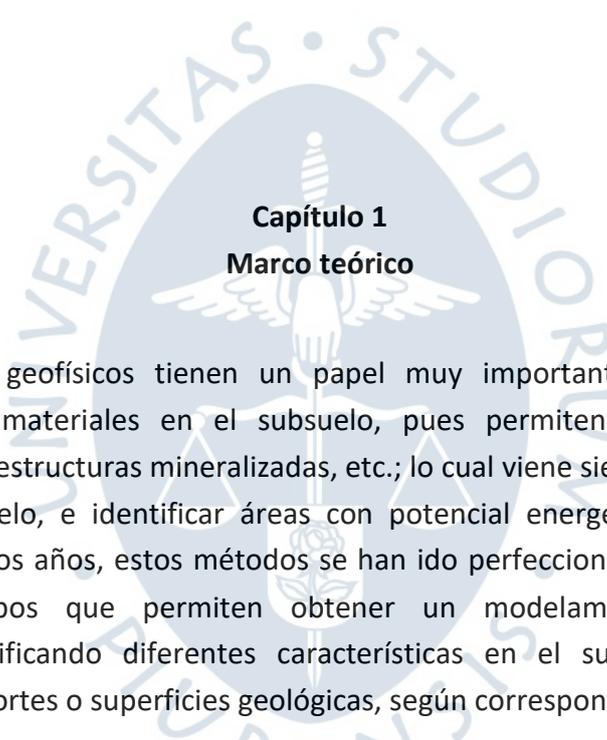
La exploración geofísica viene siendo usada a nivel mundial para lograr un conocimiento integral del subsuelo, es decir, de las características de los estratos, y la presencia de agua, logrando identificar horizontes acuíferos. Por ejemplo, en Argentina se ha utilizado la prospección geofísica para evaluar el yacimiento Las Águilas (Skostadinoff et al., 2004), también hay diversos estudios que han evaluado la eficacia del uso de los sondeos eléctricos verticales para conocer las propiedades del subsuelo (Shailaja al., 2005); y otros que utilizan los métodos geoelectricos para explorar la presencia de aguas subterráneas (Teikeu et al., 2012).

En nuestro país el método geoelectrico más utilizado en la exploración de aguas subterráneas y para determinar las propiedades del subsuelo, es la técnica de los Sondajes Eléctricos Verticales (SEV). En la región Piura los estudios a detalle del potencial de agua subterránea que se tiene son muy pocos, los proyectos de investigación realizados revelan presencia de acuíferos en las zonas del Alto, Medio y Bajo Piura, pero el área y volumen total del acuifero aún no se conoce por falta de estudios. Entre los estudios realizados en la zona se encuentran por ejemplo, la investigación hidrogeológica en el predio de la empresa Doig, en el distrito 26 de octubre (Yajahuanca, 2019) o la modelación hidrogeológica conceptual del Alto Piura (Távora, 2005).

Para lograr un mayor conocimiento de la zona, el proyecto “Caracterización química de los sedimentos presentes en las zonas de expansión agroindustrial del noroeste del país; y monitoreo de su comportamiento ante el intemperismo actual y la acción hídrica”, llevado a cabo con fondos de Innóvate Perú a través del proyecto 395-PNICP-PIAP-2014 por la Universidad de Piura; propuso como uno de sus objetivos la realización de tres campañas geofísicas, cuyos datos se utilizarían para relacionarlos con los análisis físico-químicos de los mismos puntos, y lograr una caracterización química de los sedimentos del noroeste piurano.

El objetivo de este trabajo de investigación es lograr un mayor conocimiento geofísico de la zona noroeste del Perú, que pueda servir como base de datos para la elaboración de estudios más profundos que conlleven a la identificación y posterior cuantificación del recurso hídrico subterráneo, el cual es de vital importancia para el desarrollo de actividades económicas en la región Piura.





Capítulo 1

Marco teórico

Los métodos geofísicos tienen un papel muy importante en la búsqueda de información de los materiales en el subsuelo, pues permiten identificar estructuras acuíferas, anomalías, estructuras mineralizadas, etc.; lo cual viene siendo un gran apoyo para caracterizar el subsuelo, e identificar áreas con potencial energético (Custodio, Llamas, 2001). A lo largo de los años, estos métodos se han ido perfeccionando a tal punto que se han diseñado equipos que permiten obtener un modelamiento bidimensional y tridimensional, identificando diferentes características en el subsuelo que luego son interpretadas como cortes o superficies geológicas, según corresponda.

En el presente capítulo, veremos de forma general, los fundamentos de la geofísica, y los diversos métodos que existen para explorar el subsuelo. Finalmente nos centraremos en la prospección geofísica, que es el método utilizado en este trabajo de investigación, para determinar las diversas capas del subsuelo.

1.1 Fundamentos de la exploración geofísica

La geofísica estudia las propiedades físicas de la Tierra, su objeto es el estudio de la estructura y composición del subsuelo. La geofísica aplicada encamina los estudios hacia la definición de condiciones físicas de las estructuras del subsuelo y permiten identificar los límites de las formaciones geológicas (Custodio, Llamas, 2001).

La prospección geofísica es una rama de la geofísica aplicada, desarrollada con la finalidad de estudiar y reconocer la conformación del subsuelo con fines prácticos, para la

identificación de yacimientos de sustancias como el petróleo, agua subterránea, minerales, entre otros. Estas técnicas de observación de los fenómenos físicos a nivel de superficie, sean éstos naturales o provocados, buscan conocer la distribución de los materiales en el subsuelo y sus propiedades. Se considera una ciencia, porque se basa en fenómenos físicos científicamente establecidos; y una técnica, porque utiliza equipos y métodos técnicos para estudios en zonas accesibles (Custodio, Llamas, 2001).

La prospección geofísica consiste en producir una serie de efectos sobre la superficie del terreno o en el aire, con la finalidad de identificar las características de las formaciones existentes. Cualquier fenómeno es utilizable, no sólo para interpretar indirectamente la distribución de los materiales, su estado y sus accidentes, sino, para estudiar directamente sus características. En esencia, las mediciones consisten en determinar las variaciones de uno o varios campos de fuerza en el espacio y el tiempo. El valor de estas variaciones es determinado, entre otros factores, por la naturaleza de las estructuras del subsuelo y por las propiedades físicas de las rocas que conforman el subsuelo. Con frecuencia, las discontinuidades físicas corresponden a límites geológicos, por lo que numerosos problemas estructurales se reducen a la interpretación de los campos medidos en superficie en función de las características de estas discontinuidades. Evidentemente, la mayor o menor facilidad de efectuar estas interpretaciones dependerán del grado del contraste de las propiedades físicas de las rocas presentes en la estructura que se investiga; y la elección del método se hará en función de las propiedades físicas, que, dentro de la estructura, ofrezca mayores contrastes. Sin embargo, la elección del método puede hacerse más por la necesidad de una mayor precisión en la interpretación, aun cuando esto implique trabajar con magnitudes físicas que presenten menores contrastes entre sus valores (Manilla, 2003).

En conclusión, los métodos geofísicos permiten (Griffiths & Barcker, 1993):

- Obtener información de la estructura del subsuelo.
- Determinar la profundidad del nivel freático y del sustrato rocoso.
- Identificar la existencia de yacimientos minerales, petrolíferos, etc.
- Identificar fracturas y cavidades (bien sean naturales o artificiales)

Existen muchas ventajas asociadas a la utilización de estas técnicas, tales como: su relativo bajo costo, la posibilidad de cubrir grandes extensiones de terrenos y que son técnicas no destructivas. La principal desventaja es la incertidumbre en los resultados, pues al ser técnicas indirectas, requieren conocer muy bien el terreno y amplia experiencia para relacionar correctamente los valores obtenidos (Centro de Estudios y de Investigación de Obras Públicas [CEDEX], s.f.).

1.2 Clasificación de métodos geofísicos

Gracias a los avances tecnológicos y científicos, los métodos geofísicos han aumentado en número y calidad. A continuación, expondremos los principales:

1.2.1 Método Magnético

Es el método más antiguo, usado desde el siglo XVIII para ubicar zonas con materiales magnéticos específicos. Consiste en interpretar la susceptibilidad magnética de los materiales del subsuelo, ante un campo magnético inducido, para clasificarlos como paramagnéticos (positiva) o diamagnéticos (negativa). Normalmente es utilizado para el reconocimiento cualitativo rápido de grandes áreas y poco pobladas (Custodio, Llamas, 2001).

1.2.2 Método gravimétrico

Estudia las variaciones de la gravedad en la superficie terrestre, para deducir la distribución y naturaleza del subsuelo. Es utilizado para identificar la presencia de fallas relevantes, definidas por el contacto de rocas con densidades diferentes que permitan deducir la estructura del basamento a nivel regional. Su costo es elevado, así como el tiempo necesario para la interpretación; por lo que normalmente no se usa para resolver problemas hidrogeológicos (Custodio, Llamas, 2001).

1.2.3 Métodos eléctricos

Existen varias técnicas destinadas a detectar anomalías en las propiedades eléctricas de las rocas, tales como conductibilidad, auto-potencial y respuesta a la inducción. A base de estas anomalías puede resultar posible localizar minerales que ofrezcan características eléctricas distintivas, o levantar características estructurales asociadas a yacimientos de petróleo o de minerales. Estas técnicas suelen ser usadas para estudios regionales y en zonas que presenten una baja complejidad geológica (Lugo et al., 2008).

1.2.4 Método magnetoteléurico

Conocido como corrientes telúricas, consiste en la observación de la variación de corrientes naturales de muy baja intensidad en la superficie terrestre, originados por fenómenos que actualmente continúan en investigación, influidas entre otras causas por la posición y comportamiento de la radiación electromagnética del Sol. La medición simultánea de los potenciales eléctricos en diversos puntos de la superficie permite estimar la resistividad y su distribución en el subsuelo (Custodio, Llamas, 2001).

1.2.5 Método resistivo

Consiste en introducir en el suelo, mediante electrodos, una corriente alterna, por lo general de alta frecuencia; y sobre la superficie o en el aire se miden la intensidad y el desfase de los potenciales inducidos por las rocas enterradas. Con esta técnica es posible reconstruir la estructura del subsuelo (Custodio, Llamas, 2001).

1.2.6 Método de caída de potencial

Estudia la variación o caída de potenciales en cinco electrodos alineados, con la finalidad de medir el potencial entre tres electrodos y a una distancia prácticamente infinita, permitiendo estimar los espesores de las capas del subsuelo. Es un método muy poco utilizado (Custodio, Llamas, 2001).

1.2.7 Método electromagnético

Detecta la influencia de la inducción de campos electromagnéticos artificiales en las propiedades de las rocas del subsuelo. Los estudios generalmente se realizan desde aviones para cubrir grandes extensiones, y se alcanzan profundidades inferiores a 20 metros. Se trata de un método económico y muy útil, sin embargo; es muy sensible al ruido provocado por estructuras metálicas (Lugo et al., 2008).

1.2.8 Método sísmico

Se basa en el cambio de las propiedades acústicas entre dos capas de diferentes materiales, que provocan la reflexión o refracción de las ondas que se inyectan. El objetivo es determinar la velocidad de las ondas elásticas, dando como resultado la zonificación del terreno de acuerdo a la velocidad de onda.

La prospección sísmica es de gran exactitud y penetración, siendo utilizada fundamentalmente en exploraciones petroleras. Dado su amplio uso, existen diversos métodos, que se diferencian, sobre todo, por ser métodos de refracción o de reflexión (Custodio, Llamas, 2001).

1.2.9 Método radioactivo

Este método consiste en medir la emisión natural de la radiación gamma, para determinar la concentración de elementos radioactivos en las rocas superficiales. El objetivo es localizar y definir zonas de alteración asociada a yacimientos minerales, por ejemplo: uranio, torio y potasio, los cuales tienen un alto potencial de ser explotados con fines económicos (Custodio, Llamas, 2001).

1.3 Método eléctrico resistivo

La prospección eléctrica basa su aplicación en la presencia de la conductividad eléctrica, y de los potenciales de oxidación-reducción (REDOX), por lo que es una técnica muy utilizada. Su aplicación principal es localizar cuerpos de materiales geológicos capaces de almacenar agua, zonas de agua caliente, estratos arcillosos, rocosos, mapeo de contaminantes, etc. (Lugo et al., 2008).

1.3.1 Resistividad del terreno

La resistividad del suelo es una propiedad intrínseca del terreno que consiste en la capacidad que tiene para oponerse al flujo de electricidad, y es conocida además como la resistencia específica del terreno. En su medición, se promedian los efectos de las resistividades de las diferentes capas que componen el terreno bajo estudio, ya que éstos no suelen ser uniformes en cuanto a su composición, obteniéndose lo que se denomina resistividad aparente (Custodio, Llamas, 2001).

La resistividad se mide en ohmio-metro, y puede variar desde cero hasta unos cientos y miles. Está determinada por varios factores, entre ellos (Custodio, Llamas, 2001):

- Sales solubles: La resistividad del suelo es determinada principalmente por su cantidad de electrolitos; esto es, por la cantidad de humedad, minerales y sales disueltas.
- Composición propia del terreno: La composición del terreno depende de la naturaleza del mismo.
- Estratigrafía: El terreno no es uniforme a lo largo de su profundidad, pues se presenta por capas, que no necesariamente se observan de modo uniforme.
- Granulometría: Influye bastante sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y sobre la calidad del contacto con los electrodos aumentando la resistividad con el mayor tamaño de los granos de la tierra. Por esta razón la resistividad de la grava es superior a la de la arena, y la de la arena mayor que la de la arcilla.
- Estado higrométrico: El contenido de agua y la humedad influyen en forma apreciable. Su valor varía con el clima, época del año, profundidad y el nivel freático. Como ejemplo, la resistividad del suelo se eleva considerablemente cuando el contenido de humedad se reduce a menos del 15% del peso de éste. Pero, un mayor contenido de humedad del 15% mencionado, causa que la resistividad sea prácticamente constante.
- Temperatura: A medida que desciende la temperatura aumenta la resistividad del terreno y ese aumento se nota aún más al llegar a 0° C, hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos los cuales influyen en la resistividad de la tierra.
- Compactación: La resistividad del terreno disminuye al aumentar la compactación del mismo. Por ello, se procurará siempre colocar los electrodos en los terrenos más compactos posibles.

La Tabla 1 muestra los rangos usuales de variación de la resistividad, en distintos tipos de terreno.

Tabla 1. Orden de magnitud de las resistividades, en distintos tipos de terreno.

Materiales	Resistividad ($\Omega \times m$)
Agua de mar	1
Arenas arcillosas	50 a 500

Arenisca, guijarros de río, piedra triturada	10,000,000
Arena fina y guijarros secos	1,000
Arena silíceas	200 a 3,000
Arcillas ferrosas	10
Arcillas secas	30
Arcillas plásticas	50
Barro arenoso	150
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1,000 a 5,000
Carbón	10 ⁵ a 10 ⁶
Cuarzo	1,000,000,000
Esquistos graffíticos	5
Grafitos	0.0001
Granitos antiguos	1.5 a 2,000
Granitos compactos, y gres muy alterado	de 100 a 600
Grava y arena gruesa	100 a 1,000
Guijarros de río y cascajo de piedra triturada	5,000
Humus	10 a 150
Limo	20 a 100
Margas y humos secos	50
Margas, turbas y humus secos	de 5 a 100
Margas y arcillas compactas	de 100 a 200
Minerales Conductores	0.01
Pizarras	de 50 a 300
Rocas compactas, cemento ordinario	1,000,000
Rocas madre, basaltos y granitos antiguos	10,000
Rocas de mica y cuarzo	800
Soluciones salinas	0.1
Suelo pedregoso cubierto de césped	de 300 a 500
Suelos calcáreos y rocas aluvionarias	400
Suelo pedregoso desnudo	de 1,500 a 3,000
Terrenos rocosos y calizas	3,000
Terreno pantanoso	30
Terreno cultivable	50
Tierra arenosa con humedad	200
Yeso seco	2,000

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

1.3.2 Deducción de las fórmulas

El flujo de una corriente eléctrica a través de las rocas o los sedimentos, puede explicarse mediante la Ley de Ohm (Auge, 2008), como se puede ver en la Figura 1; que establece que la caída de potencial ΔV entre 2 puntos por los que circula una corriente eléctrica de intensidad I , es proporcional a ésta y a la resistencia R que ofrece el medio al paso de la corriente (Ecuación 1).

$$\Delta V = I \cdot R \quad (1)$$

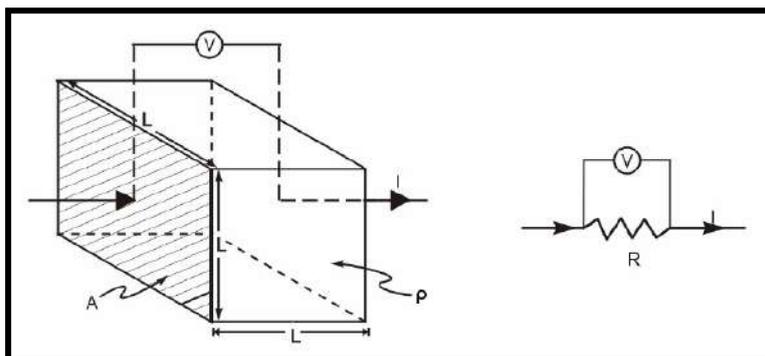


Figura 1. Ley de Ohm

Fuente: Auge (2008).

La resistencia está en función de la naturaleza y geometría del conductor (Auge, M. 2008). Si ésta pudiera imaginarse como un cilindro de longitud L y sección S , se expresaría según la ecuación 2:

$$R = (\rho \cdot L) / S \quad (2)$$

Donde ρ representa la naturaleza del conductor y se denomina resistividad. Reemplazando R de la ecuación (1) en (2), tendremos la ecuación 3:

$$\Delta V = I \cdot (\rho \cdot L) / S \quad (3)$$

La resistividad es la inversa de la conductividad eléctrica; se expresa en ohmios por metro (W.m). En la mayoría de rocas y sedimentos secos será muy elevada, es decir, son materiales de muy baja conductividad. Este comportamiento cambia significativamente cuando los poros están ocupados por agua, pues su capacidad conductora aumenta, y por tanto disminuye drásticamente la resistividad. Además del grado de saturación, el contenido de sales también influye en la conductividad del terreno; a mayor salinidad, menor resistividad y viceversa. Los contrastes en las resistividades, son los que permiten aplicar con éxito los métodos de prospección geofísica (Auge, 2008).

1.3.3 Medición de la resistividad en campo

Las mediciones se llevan a cabo directamente sobre el terreno, abarcando distancias significativamente mayores a las que se van a investigar. Por otro lado, la mayor complicación surge, al darnos cuenta que el terreno sobre el que trabajamos no es homogéneo ni isotrópico, como se supone es el medio ideal (Auge, 2008).

El subsuelo no es isótropo ni homogéneo, por lo que las superficies equipotenciales y las líneas de corriente no son regulares ni rectas. Esto supone que la resistividad obtenida corresponde a la integración de los valores medios de los materiales que conforman cada una de las capas del subsuelo, en los que incide la anisotropía y la heterogeneidad del terreno y la posición relativa de los electrodos (ver Figura 2); a esta resistividad se le conoce como resistividad aparente (ρ_a).

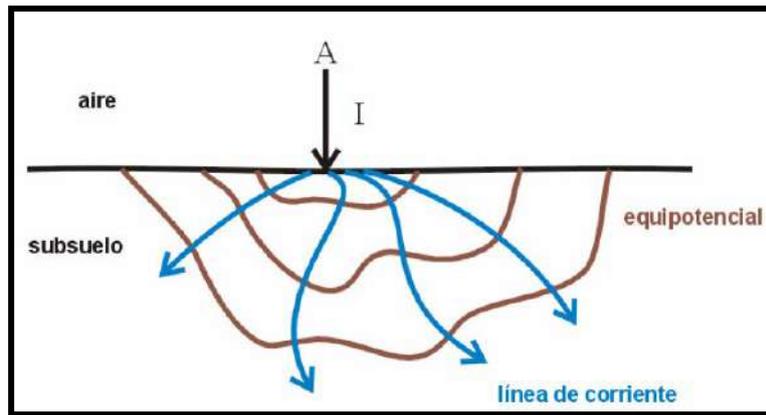


Figura 2. Flujo eléctrico en medio natural.

Fuente: M. Auge, 2008.

Una forma de medir la resistividad aparente del terreno, es a través de una disposición lineal: se colocan cuatro electrodos sobre un mismo eje, luego se inyecta la corriente al terreno a través de dos de los mismos (conocidos como electrodos de inyección) y se mide la diferencia de potencial a través de los otros dos dispositivos. Existen diferentes configuraciones en las que se pueden colocar estos electrodos, siendo las más usadas las que se explican en los siguientes acápite.

1.3.3.1 Configuración Schlumberger

Se colocan cuatro electrodos en línea recta (ver Figura 3), teniendo que estar cada par (potencial y corriente) simétricamente ubicados. El operador mantendrá los electrodos internos fijos, mientras que los dos electrodos externos se van alejando a medida que se desee profundizar en las mediciones.

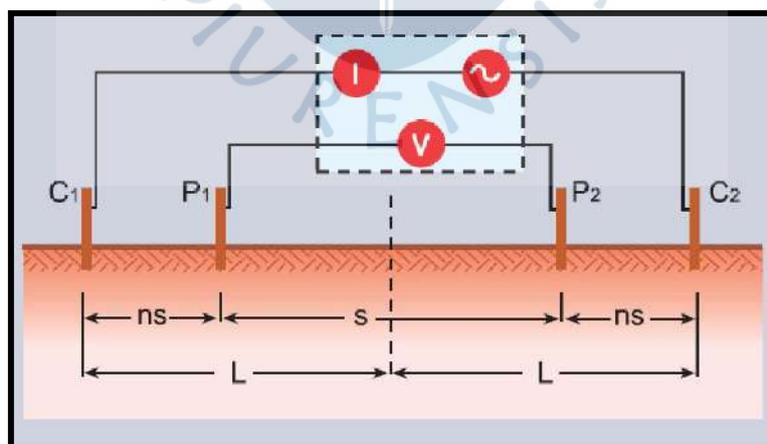


Figura 3. Configuración Schlumberger.

Fuente: M. Auge, 2008.

1.3.3.2 Configuración Wenner

Es un caso especial de la configuración Schlumberger. Los cuatro electrodos se ubican en línea recta, separados entre sí una misma distancia "s". Al iniciar las mediciones, se deberá elegir un centro de medida "0", el cual permanecerá fijo, aún cuando se modifique la separación "s". Por ende, por cada medida que se desee realizar, a diferentes profundidades, se tendrán que mover los cuatro electrodos, para asegurar se mantenga el mismo espaciamiento entre electrodos, de acuerdo a lo mostrado en la Figura 4.

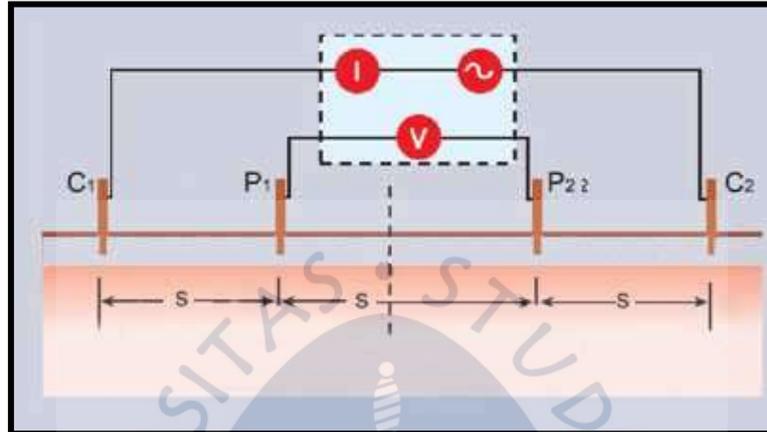


Figura 4. Configuración Wenner.

Fuente: M. Auge, 2008.

1.3.4 Dispositivos de medición

En el mercado existen gran variedad de equipos, que se usan para medir la resistividad del terreno. Todos ellos se diferencian, fundamentalmente, en la precisión de las mediciones, la profundidad hasta la que es posible trabajar y la rapidez para realizarlas. Así, existen equipos que permiten medir la resistividad de terreno, en un punto a la vez, mientras que otros, facilitan la medida del parámetro en varios puntos simultáneamente, logrando obtener, no solo los datos de un puntos, sino, un corte muy aproximado del terreno (ver Figura 5); o incluso la superficie en 3D (ver Figura 6).



Figura 5. Distribución de electrodos para realizar una sección.

Fuente: Adaptado de GDD Instrumentation [Fotografías],
<https://www.gddinstrumentation.com/es/ip-receptores>

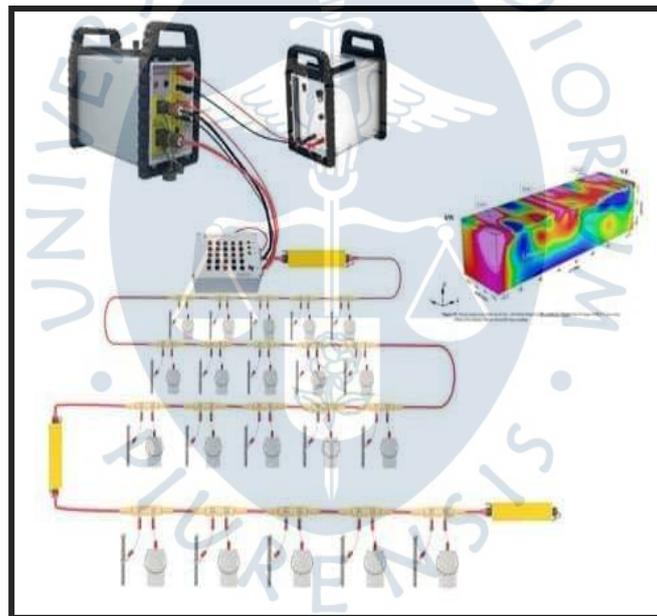


Figura 6. Equipo de prospección geofísica. Distribución de electrodos para modelo 3D (superficie)

Fuente: Adaptado de Geomative [Fotografías],
<https://www.geomative.com/GD20Electrical/20/16.html>

1.3.5 Interpretación de resultados

Debido a los avances tecnológicos, y a la gran cantidad de datos que se toman en cada proceso de medición, se hace necesaria la utilización de softwares, los cuales aplican una serie de algoritmos para identificar las diversas capas del subsuelo.

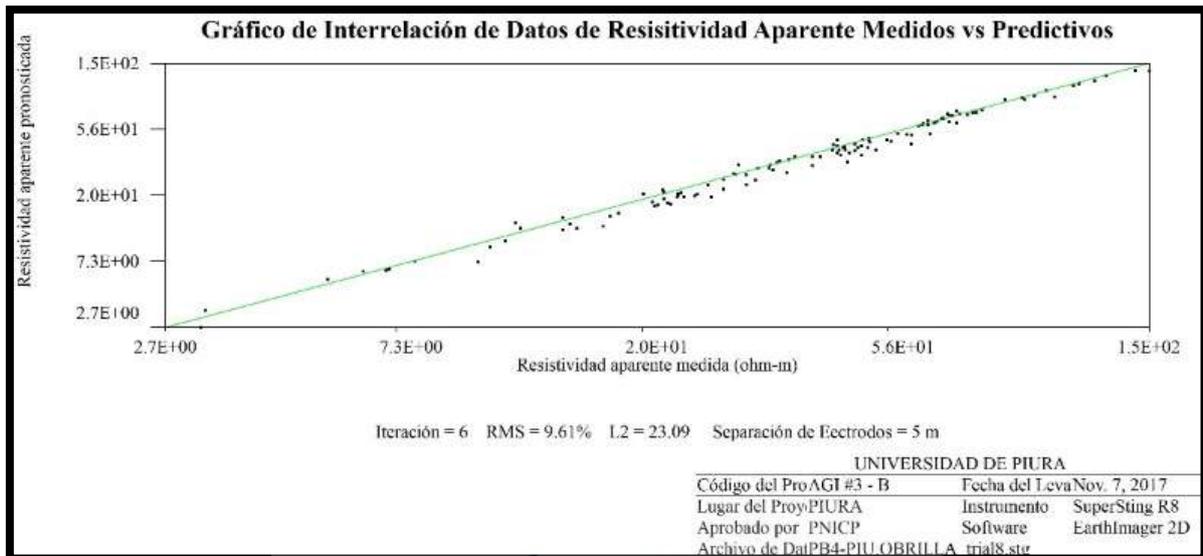


Figura 7. Gráfico de interrelación de datos de resistividad aparente vs predictivos

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

En primer lugar, se deben revisar los datos obtenidos, y limpiar todos aquellos que están claramente fuera de rango (ver Figura 7). Posteriormente, se procede a la inversión de los resultados, para pasar de valores de resistividad aparente, a valores de resistividad. Finalmente, y dependiendo del software utilizado, será posible obtener un modelo 2D (corte, ver Figura 8) o 3D (superficie) del terreno investigado, después de realizar una serie de iteraciones dentro del mismo.

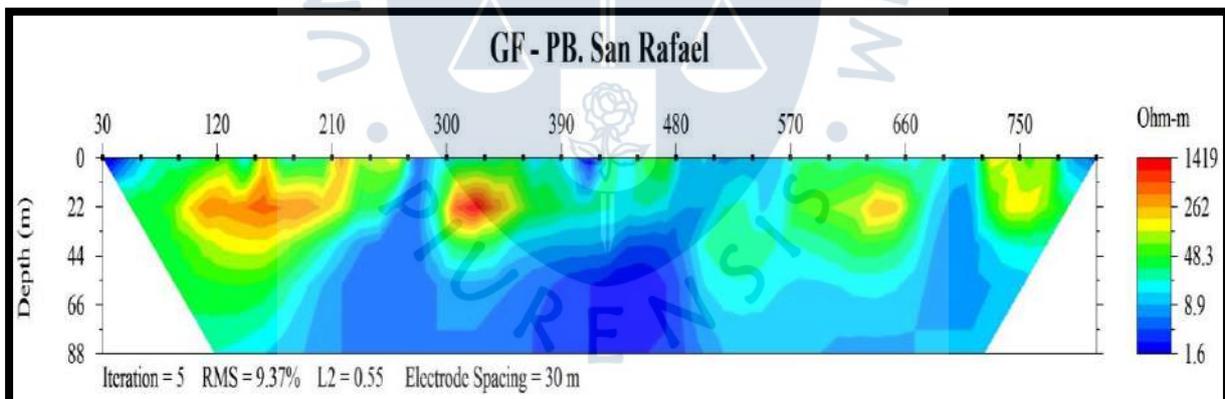


Figura 8. Modelo 2D del terreno

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).



Capítulo 2

Zona de estudio

2.1 Ubicación de la zona de estudio

En la zona noroeste del Perú existen estudios hidrogeológicos realizados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) a gran escala, cuyo producto es el mapa hidrogeológico de la zona (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2020); y estudios de zonas específicas, realizados para ubicar pozos, por diversas empresas del sector agroindustrial. Sin embargo, no se ha estudiado cómo influyen la lluvia y el riego de los cultivos en la variación de los niveles freáticos. Por otro lado, en los últimos años, el noroeste del Perú ha experimentado un acelerado crecimiento agroindustrial, así como un incremento en el uso del agua y del suelo, junto con una disminución de la capacidad de almacenamiento de agua en los reservorios de Poechos y San Lorenzo. Frente a estos problemas de la falta de un recurso hídrico superficial permanente para atender los incrementos en el uso del agua, el recurso hídrico subterráneo es cada vez más importante. Conocer la localización de fuentes de agua subterránea sería un punto de partida de gran relevancia junto con el conocimiento detallado de estos cuerpos de agua subterráneos. Esto se puede lograr mediante estudios geológicos y geoelectrónicos que permiten una caracterización del medio acuífero en área y volumen.

Por todo lo mencionado anteriormente, esta investigación seleccionó 20 puntos de análisis dentro del departamento de Piura. Estos puntos buscan abarcar distintas formaciones geológicas y que representen zonas de cultivo y de un gran potencial de crecimiento agroindustrial que permitan lograr un mejor conocimiento de nuestra región.

El área del proyecto se enmarca en las provincias de Sullana, Las Lomas, Piura, Chulucanas y Morropón del departamento de Piura (ver Figura 9).

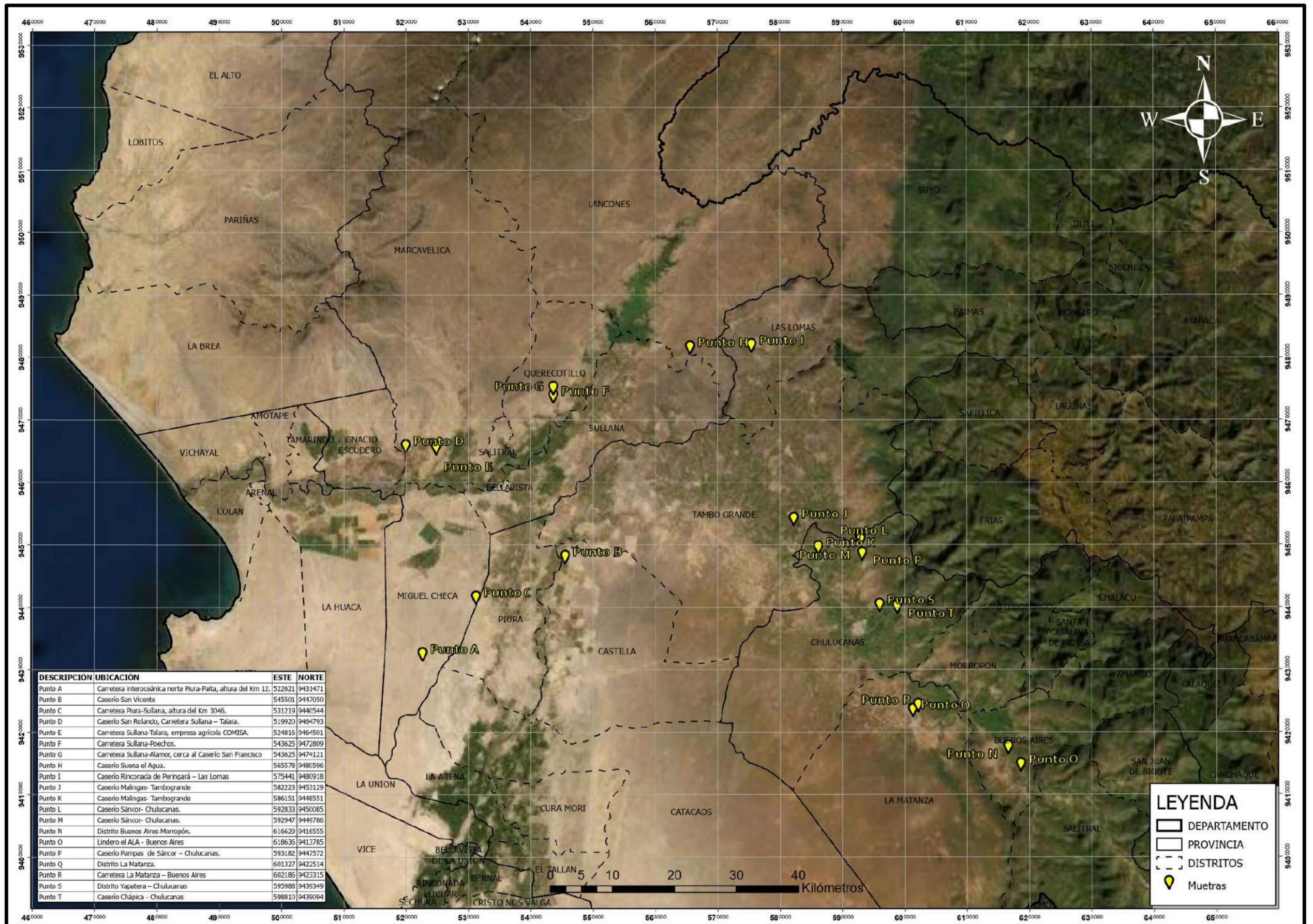


Figura 9. Mapa de ubicación de puntos.

2.2 Criterios geológicos para ubicación de puntos

El área del proyecto se enmarca sobre dos de las cuencas geológicas más complejas del noroeste del Perú: Talara y Lancones, cuyas características petrográficas, mineralógicas, paleontológicas y geoclimáticas difieren en edad y formación. Los sedimentos que forman los suelos de estas cuencas geológicas son el producto de la alteración y meteorización de las rocas expuestas en superficie a los procesos endógenos. Estos afloramientos brindan información del tipo de roca que existe en el subsuelo y los rasgos estructurales que predominan. Por tanto, la evolución y desarrollo del suelo, está en función de los factores de superficie, y de las características de los materiales presentes en el subsuelo. Dichas cuencas se encuentran separadas por la montaña de los Amotapes. La cuenca Talara se encuentra en su mayor área dentro del zócalo continental y otra parte en el continente, a diferencia de la cuenca Lancones que se encuentra en su totalidad sobre el continente.

La cuenca Talara es de origen sedimentario y la cuenca Lancones, de origen volcánico a volcánico sedimentario. Los eventos ocurridos durante el cuaternario, originaron la mayor acumulación de materiales detríticos que han dado lugar a formaciones acuíferas. Por lo tanto, es necesario el estudio de los materiales del subsuelo a través de sus propiedades de resistividad, como una de las variables de interpretación de los materiales en profundidad. El agua es un agente que actúa en la interacción de los sedimentos tanto en superficie como en profundidad, su ubicación en el subsuelo puede determinarse a través de la interpretación de datos geofísicos.

Las características petrográficas en cada área son diferentes, ya que las condiciones de formación no fueron las mismas. En el proyecto se llevó a cabo la toma de muestras de suelo para un análisis químico cuantitativo y cualitativo. Los resultados están en función del contenido mineralógico aportado por la roca madre de origen de las partes altas que están sujetas a los procesos endógenos de meteorización, erosión y transporte. Como resultado los suelos presentan diferente composición química.

Los puntos de muestreo están distribuidos dentro de las unidades geológicas (ver Figura 10), de la siguiente forma:

- **Punto A:** se ubica dentro de la unidad Tablazo Talara, actualmente cubierta por depósitos eólicos. En estas áreas se encuentra una gran presencia de diatomita, gravas remanentes del tablazo y pequeñas capas de yeso.
- **Punto B:** ubicado en áreas del cuaternario reciente, formadas por depósitos eólicos.
- **Puntos C y E:** ubicados sobre un afloramiento de la formación Miramar, actualmente cubierto por material cuaternario.
- **Punto D:** se ubica en áreas de depósitos aluviales, formadas por los sedimentos de las partes altas de la formación Chira. El suelo presenta gran cantidad de óxidos y material calcáreo.

- **Puntos F y G:** se ubican en depósitos aluviales, formados por sedimentos que fueron transportados de las partes altas de la formación Verdún.
- **Punto H e I:** ubicados en zona de depósitos fluviales, formados por el río Chipillico. Presentan afloramientos de la formación La Bocana, que se desarrolló durante el cretáceo.
- **Punto J y K:** ubicados en áreas de cultivo, que presentan depósito fluvial, formado por acumulación de sedimentos del río Piura.
- **Puntos L, M, N, O, P, Q y R:** ubicados sobre las subcuencas del Medio y Alto Piura.



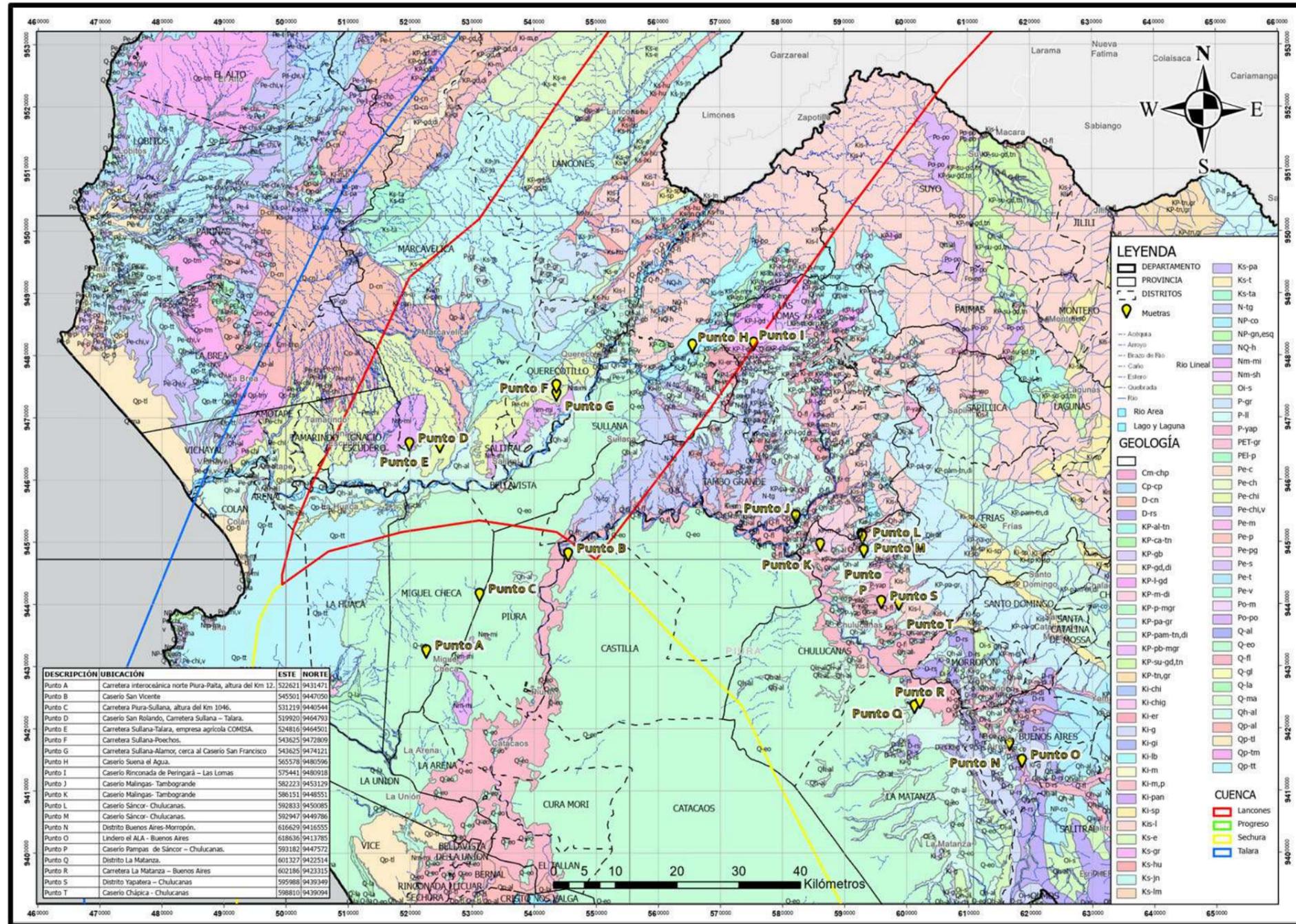


Figura 10. Mapa geológico con puntos de muestreo.

Fuente: Elaboración propia – capas de INGEMMET.

2.3 Descripción de puntos de muestreo

2.3.1 Punto A

- Ubicación: Carretera interoceánica norte Piura-Paita, altura del Km 12, distrito de Miguel Checa, provincia de Sullana.
- Coordenadas: 522621 m E; 9431471 m N
- Altitud: 109 m s.n.m.
- Geomorfología: Presencia de dunas cubriendo a la Formación Tablazo Talara.
- Erosión: Altamente erosionado los 20 primeros centímetros, coloraciones de manchas rojizas por oxidación de hierro.
- Drenaje: Drenaje superficial lento.
- Material parental: Arenas de grano muy fino, procedentes de depósitos eólicos formados en el cuaternario reciente, afloramientos de diatomita.
- Vegetación: Escasa vegetación, algarrobos pequeños (ver Figura 11).



Figura 11. Punto A.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.2 Punto B

- Ubicación: Caserío San Vicente, distrito de Castilla, provincia de Piura.
- Coordenada: 545501 m E 9447050 m N
- Altitud: 54 m s.n.m.
- Geomorfología: Presencia de depósitos eólicos, formados durante el cuaternario reciente.
- Erosión: Ligeramente erosionado.
- Drenaje: La litología de la zona muestra un drenaje excesivamente ocasional.
- Material parental : Arenas de grano muy fino, procedentes de depósitos eólicos.

- Vegetación: Escasa vegetación, Algarrobos pequeños y plantas de pasto que crecen en los meses de lluvia, de enero a marzo (ver Figura 12).



Figura 12. Punto B.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.3 Punto C

- Ubicación: Carretera Piura-Sullana, altura del Km 1046, distrito y provincia de Piura.
- Coordenadas: 531219 m E 9440544 m N
- Altitud: 55 m s.n.m.
- Geomorfología: De baja pendiente a casi plano, la muestra corresponde a un afloramiento de la Formación Miramar.
- Erosión: Altamente erosionado, manchas de color ocre por oxidación de los minerales Fe.
- Drenaje: Drenaje moderado.
- Material parental: Arenas de grano fino, limos y arcillas procedentes de la Formación Miramar.
- Vegetación: Cerca del lugar se observa una escasa vegetación (ver Figura 13).



Figura 13. Punto C.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.4 Punto D

- Ubicación: Caserío San Rolando, km 1070 Carretera Sullana – Talara, distrito de Marcavelica, provincia de Sullana.
- Coordenadas: 519920 m E 9464793 m N
- Altitud: 40 m s.n.m.
- Geomorfología: Presencia de lomadas pertenecientes, de pendiente moderada a ligeramente altas, redondeadas por la erosión.
- Erosión: Altamente erosionado, oxidación de los minerales de Fe.
- Drenaje: Moderadamente bien drenado.
- Material parental: La erosión de afloramiento del Terciario, por acción del agua y favorecidas por la gravedad forman sedimentos de arenas finas a grano medio, limos y arcillas que se encuentran en la zona. Muy cerca al punto se encuentra aflorando la Formación Miramar altamente meteorizada.
- Vegetación: cultivos de arroz en mayoría (ver Figura 14).



Figura 14. Punto D.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.5 Punto E

- Ubicación: Carretera Sullana-Talara, empresa agrícola COMISA, distrito de Marcavelica, provincia de Sullana.
- Coordenadas: 524816 m E 9464501 m N
- Altitud: 50 m s.n.m.
- Geomorfología: Presencia de lomadas de coloración rojiza, de pendiente moderada a ligeramente moderada.
- Erosión: Altamente erosionado, coloraciones rojizas por oxidación de los minerales de Fe.
- Drenaje: El suelo presenta un buen drenaje.
- Material parental: Presenta gravillas de granos angulares y subangulares, arenas de grano fino a medio, limos y arcillas, procedentes de la Formación Chira.
- Vegetación: Abundante vegetación a los alrededores de la zona (ver Figura 15).



Figura 15. Punto E.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.6 Punto F

- Ubicación: km 29 Carretera Sullana-Poechos, distrito de Querecotillo, provincia de Sullana.
- Coordenadas: 543625 m E 9472809 m N
- Altitud: 72 m s.n.m.
- Geomorfología: Presencia de lomadas redondeadas por la erosión, con pendiente moderada.
- Erosión: Altamente erosionado.
- Drenaje: El suelo presenta un drenaje bueno.
- Material parental: Se ubica dentro de la Formación Verdún, compuesta por areniscas de grano medio a fino de compactación moderada.
- Vegetación: Sembríos de plátano en su mayoría, ubicados cerca al punto de muestreo (ver Figura 16).



Figura 16. Punto F.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.7 Punto G

- Ubicación: Carretera Sullana-Alamor, cerca al Caserío San Francisco, distrito de Querecotillo, provincia de Sullana.
- Coordenadas: 543625 m E 9474121 m N
- Altitud: 75 m s.n.m.

- Geomorfología: Presencia de lomadas redondeadas por la erosión, de pendiente moderada.
- Erosión: Moderadamente erosionado.
- Drenaje: Presenta un drenaje factible a bueno.
- Material parental: Se ubica dentro de la Formación Verdún, compuesta por areniscas de grano medio a fino de compactación moderada.
- Vegetación: Sembríos de plátano en su mayoría, ubicados cerca al punto (ver Figura 17).



Figura 17. Punto G.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.8 Punto H

- Ubicación: Caserío Suená el Agua, distrito de Lancones, provincia de Sullana.
- Coordenadas: 565578 m E 9480596 m N
- Altitud: 166 m s.n.m.
- Geomorfología: Depósitos aluviales y fluviales formados por el río Chipillíco.
- Erosión: Altamente erosionado
- Drenaje: La presencia de las arenas permite un drenaje bueno.
- Material parental: sedimentos transportados por el río Chipillíco, que forma depósitos aluviales y fluviales en su recorrido, se observa cerca de la zona afloramientos de la Formación La Bocana.
- Vegetación: presencia de abundante vegetación, debido a las precipitaciones de los meses de Enero y marzo del presente año (ver Figura 18).



Figura 18. Punto H.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.9 Punto I

- Ubicación: Caserío Rinconada de Peringará, distrito de Las Lomas, provincia de Piura.
- Coordenadas: 575441 m E 9480918 m N
- Altitud: 190 m s.n.m.
- Geomorfología: Depósitos aluviales y fluviales formados por el río Chipillíco. Al entorno presente del lugar se encuentran cerros de pendientes pronunciadas de rocas ígneas.
- Erosión: Altamente erosionado.
- Drenaje: Suelo con buen drenaje.
- Material parental: sedimentos transportados por el río Chipillíco, que forma depósitos aluviales y fluviales en su recorrido, sedimentos de origen volcanosedimentario formados por la erosión de afloramientos rocosos.
- Vegetación: Sembrío de camote, arroz, maíz, etc. (ver Figura 19).



Figura 19. Punto I.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.10 Punto J

- Ubicación: Caserío Malingas, distrito de Tambogrande, provincia de Piura.
- Coordenadas: 582223 m E 9453129 m N
- Altitud: 81 m s.n.m.
- Geomorfología: En el entorno se encuentran cerros de pendiente pronunciada afloramientos de la formación Volcánico Ereo, en la zona del punto el terreno es casi plano por la presencia de depósitos aluviales.
- Erosión: Altamente erosionado.
- Drenaje: Presenta un drenaje factible a bueno.
- Material parental: La presencia de sedimentos, producto de la erosión de afloramientos rocosos de las formación El Ereo que son transportados por corrientes de agua.
- Vegetación: sembríos de mango, limón, uva, etc (ver Figura 20).



Figura 20. Punto J.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.11 Punto K

- Ubicación: Caserío Malingas, distrito de Tambogrande, provincia de Piura.
- Coordenadas: 586151 m E 9448551 m N
- Altitud: 79 m s.n.m.
- Geomorfología: El entorno presenta cerros de pendiente pronunciada afloramientos de la formación Volcánico Ereo, en la zona del punto el terreno es casi plano por la presencia de depósitos aluviales.
- Erosión: Altamente erosionado.
- Drenaje: Presenta un drenaje factible a bueno.
- Material parental: La presencia de sedimentos, producto de la erosión de afloramientos rocosos de la Formación El Ereo que son transportados por corrientes de agua.
- Vegetación: sembríos de mango, limón, uva, etc (ver Figura 21).



Figura 21. Punto K.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.12 Punto L

- Ubicación: Caserío Sancor, distrito de Chulucanas, provincias de Morropón.
- Coordenadas: 592833 m E 9450085 m N
- Altitud: 121 m s.n.m.
- Geomorfología: Depósitos aluviales formados durante el cuaternario reciente, el entorno presenta cerros de pendiente muy pronunciada pertenecientes a los afloramientos de la Formación Volcánico Lancones.
- Erosión: Suelo moderadamente erosionado.
- Drenaje: Presenta un drenaje superficial medio, permanece en la superficie por periodos cortos luego se evapora o infiltra formando grandes grietas de disecación, que produce hundimiento en grandes áreas de terreno.
- Material parental: material sedimentario de los grandes afloramientos rocosos de las partes altas, transportados por corrientes de agua.
- Vegetación: Escasos sembríos (ver Figura 22).



Figura 22. Punto L.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.13 Punto M

- Ubicación: Caserío Sancor, distrito de Chulucanas, provincia de Morropón.
- Coordenadas: 592947 m E 9449786 m N
- Altitud: 118 m s.n.m.
- Geomorfología: Depósitos aluviales, el entorno presenta cerros de pendiente muy pronunciada pertenecientes a los afloramientos de la Formación Volcánico Lancones.
- Erosión: Suelo moderadamente erosionado.
- Drenaje: Presenta un drenaje superficial medio, permanece en la superficie por periodos cortos luego se evapora o infiltra formando grandes grietas de
- disecación, que produce hundimiento en grandes áreas de terreno.
- Material parental: material sedimentario de los grandes afloramientos rocosos de las partes altas, transportados por corrientes de agua.
- Vegetación: Escasos sembríos (ver Figura 23).



Figura 23. Punto M.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.14 Punto N

- Ubicación: Distrito de Buenos Aires, provincia de Morropón.
- Coordenadas: 616629 m E 9416555 m N
- Altitud: 130 m s.n.m.
- Geomorfología: Depósitos fluviales formados por el río Piura, en su recorrido atraviesa la formación Rio Seco - Paleozoico y Formación Goyarisquizga - cretácico inferior, afloramientos de pendiente muy pronunciada.
- Erosión: Suelo altamente erosionado.
- Drenaje: suelo con drenaje bueno.
- Material parental: Los sedimentos son producto de la erosión de los afloramientos rocosos de las partes altas.
- Vegetación: Extensas áreas de sembrío (Ver Figura 24).



Figura 24. Punto N.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.15 Punto O

- Ubicación: Lindero El Ala, distrito de Buenos Aires, provincia de Morropón.
- Coordenadas: 618636 m E 9413785 m N
- Altitud: 138 m s.n.m.
- Geomorfología: Depósitos fluviales formados por el río Piura, en su recorrido atraviesa la formación Río Seco - Paleozoico y Formación Goyarisquizga - cretácico inferior, afloramientos de pendiente muy pronunciada.
- Erosión: Suelo altamente erosionado.
- Drenaje: suelo con drenaje bueno.
- Material parental: Los sedimentos son producto de la erosión de los afloramientos.
- En las partes altas se observan formaciones de complejos metamórficos.
- Vegetación: Extensas áreas de sembrío: limón, maíz, etc. (ver Figura 25).



Figura 25. Punto O.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.16 Punto P

- Ubicación: Caserío Pampas de Sancor, distrito de Chulucanas, provincia de Morropón.
- Coordenadas: 593182 m E 9447572 m N
- Altitud: 102 m s.n.m.
- Geomorfología: Extensas áreas cubiertas por depósitos aluviales, aproximadamente 6 Km al este se encuentra la Formación Yapatara.
- Erosión: Suelo moderadamente erosionado.
- Drenaje: Drenaje superficial lento, el agua se infiltra rápidamente siendo aprovechada por las plantas en su mayoría.
- Material parental: Los sedimentos son producto de la erosión de los afloramientos rocosos de las partes altas.
- Vegetación: Presenta áreas de sembrío de limón, mango, maíz, etc. (ver Figura 26).



Figura 26. Punto P.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.17 Punto Q

- Ubicación: Distrito La Matanza, provincia de Morropón.
- Coordenadas: 601327 m E 9422514 m N
- Altitud: 104 m s.n.m.
- Geomorfología: Depósitos aluviales que cubren grandes áreas donde se desarrolla gran actividad agrícola, al entorno se encuentran afloramientos de las formaciones Río Seco y Goyarisquizga.
- Erosión: Suelo moderadamente erosionado.
- Drenaje: Suelo con buen drenaje.
- Material parental: Los sedimentos que se encuentran formando los depósitos cuaternarios son producto de la erosión de afloramientos rocosos de las partes altas.
- Vegetación: Presenta áreas de sembrío, limón, mango, maíz, etc. Cerca de la zona se desarrollan fundos con extensas áreas agrícolas. Ejemplo: Fundo Iqueño (ver Figura 27).



Figura 27. Punto Q.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.18 Punto R

- Ubicación: Carretera La Matanza – Buenos Aires, distrito de La Matanza, provincia de Morropón.
- Coordenadas: 602186 m E 9423315 m N
- Altitud: 100 m s.n.m.
- Geomorfología: Depósitos aluviales que cubren grandes áreas donde se desarrolla gran actividad agrícola, al entorno se encuentran afloramientos de las formaciones Río Seco y Goyarisquizga.
- Erosión: Suelo moderadamente erosionado.
- Drenaje: Suelo con buen drenaje.
- Material parental: Los sedimentos que se encuentran formando los depósitos cuaternarios son producto de la erosión de afloramientos rocosos de las partes altas.
- Vegetación: Presenta áreas de sembrío, limón, mango, maíz, uva, etc. (ver Figura 28).



Figura 28. Punto R.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.19 Punto S

- Ubicación: Carretera Yapatera – Chulucanas, distrito de Chulucanas, provincia de Morropón.
- Coordenadas: 595988 m E 9439349 m N
- Altitud: 109 m s.n.m.
- Geomorfología: Lomadas de pendiente moderada a ligeramente pronunciadas, redondeadas por la brusca erosión y alteración de los minerales Fe.
- Erosión: Suelo altamente erosionado.
- Drenaje: Suelo con buen drenaje.
- Material parental: sedimentos originados por la erosión de afloramientos de la Formación Yapatera y Formación Volcánico Lancones.
- Vegetación: Presenta áreas de sembrío, limón, mango, maíz, uva, etc. Zona de gran desarrollo agrícola (ver Figura 29).



Figura 29. Punto S.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

2.3.20 Punto T

- Ubicación: Caserío Chapica, distrito de Chulucanas, provincia de Morropón.
- Coordenadas: 598810 m E 9439094 m N
- Altitud: 128 m s.n.m.
- Geomorfología: En su entorno se observan afloramientos de pendiente pronunciada, por acción de los factores endógenos han dado origen a depósitos aluviales en el cuaternario reciente.
- Erosión: Suelo altamente erosionado.
- Drenaje: Suelo con buen drenaje.
- Material parental: sedimentos originados por la erosión de afloramientos de la Formación Yapatera y Formación Volcánico Lancones.
- Vegetación: Presenta áreas de sembrío, limón, mango, maíz, uva, etc. Zona de gran desarrollo agrícola (ver Figura 30).



Figura 30. Punto T.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).



Capítulo 3

Datos de campo y resultados

3.1 Metodología

3.1.1 Procedimiento:

En general, para realizar sondeos eléctricos verticales, utilizando configuración Schlumberger, el procedimiento a seguir, independientemente del equipo que se usará, es el siguiente:

- Se toma como centro, el punto en el cual se quiere tomar datos.
- Se colocan 04 electrodos, siguiendo la configuración elegida, en este caso Schlumberger.
- Se inyecta una corriente eléctrica en el suelo, a través de dos electrodos: A y B. La corriente abarca desde 1 mA hasta 2A. Por este motivo, este sistema necesita de una o dos baterías de 12 V.
- El potencial resultante, se mide entre dos electrodos (M y N). Los voltajes medidos abarcan desde poco micro voltios a decenas de voltios.
- Un valor de resistividad aparente deriva de la corriente inyectada, y es una función de la litología media del terreno, contenido de humedad, porosidad, química, permeabilidad, temperatura, etc.
- Los datos medidos se invierten, mediante un software, para producir la distribución de resistividad real del subsuelo.
- Finalmente, la distribución de resistividad, se correlaciona con la geología del subsuelo.

De esta forma, es posible conseguir los datos del subsuelo en un determinado punto.

Específicamente, en este trabajo de investigación, ha sido posible realizar numerosas medidas con una sola corrida del instrumento, gracias a la versatilidad del equipo; logrando obtener los datos de muchos puntos, lo que permitió realizar un corte geológico en cada medida. El procedimiento a seguir, para lograr un corte geológico, es el siguiente:

- Se coloca un gran número de electrodos al mismo tiempo (entre 30 y 200 electrodos), los cuales se instalan en el terreno y se conectan al resistivímetro simultáneamente.

- Al mismo tiempo, el equipo está conectado a las baterías, que son las que darán la energía necesaria para realizar las pruebas.
- Una vez que se tiene el sistema listo, se hace una prueba inicial, para comprobar que exista continuidad entre los electrodos, y la transmisión de corriente se realice de manera correcta. Si existiera algún error, se debe evaluar cuál es la falla, y resolverla para poder iniciar con la toma de datos.
- La adquisición de datos se controla mediante un archivo de comandos pre-programados.
- La conmutación de electrodos se realiza de forma automática. Este equipo no tiene límite en la configuración de electrodos.
- El tiempo que demora la toma de datos de cada sección, dependerá de la cantidad de electrodos y la configuración utilizada (ver Tabla 2).

Tabla 2. Tiempo de medición del Super sting R1 y R8

Configuración	28 Electrodo			56 Electrodo			84 Electrodo		
	# de puntos	Tiempo SS R1	Tiempo SS R8	# de puntos	Tiempo SS R1	Tiempo SS R8	# de puntos	Tiempo SS R1	Tiempo SS R8
Wenner	117	18 min	18 min	495	1.3 hr	1.3 hr	1134	3.0 hr	3.0 hr
Schlumberger, inv.	171	27 min	9 min	842	2.2 hr	37 min	1068	2.8 hr	48 min

- Los datos se almacenan automáticamente en el equipo, y luego se pasan a un computador para ser procesados.
- Se usa el software, en este caso EarthImager 2D, para el procesamiento de datos.
- Finalmente, los cortes obtenidos de resistividad, se correlacionan con la geología del terreno.

3.1.2 Equipo utilizado

El equipo geofísico utilizado para la adquisición de datos ha sido un resistímetro Super Sting R8, que consta de las siguientes partes:

- Resistímetro Super Sting de 8 canales hecho por AGI Advanced Geosciences, Inc.: Sistema multi-electrodos de 8 canales para imágenes de resistividad y potencial espontáneo (ver Figura 31).



Figura 31. Resistivímetro Super string R8

Fuente: <http://www.advancedgeosciences.com/index.sp.shtml>

- Switch box grid o caja conmutadora: Se utiliza para controlar las conexiones de los electrodos vía cables pasivos (ver Figura 32).



Figura 32. Caja conmutadora

Fuente: <http://www.advancedgeosciences.com/index.sp.shtml>

- Cable de transmisión
- Electrodos (ver Figura 33).



Figura 33. Electrodo

Fuente: <http://www.advancedgeosciences.com/index.sp.shtml>

3.1.3 Software

El software de procesamiento de datos usado fue el EARTHIMAGER 2D (ver Figura 34). Con este software, los datos registrados con los instrumentos se pueden interpretar fácilmente al leer las secciones del subsuelo en 2D.

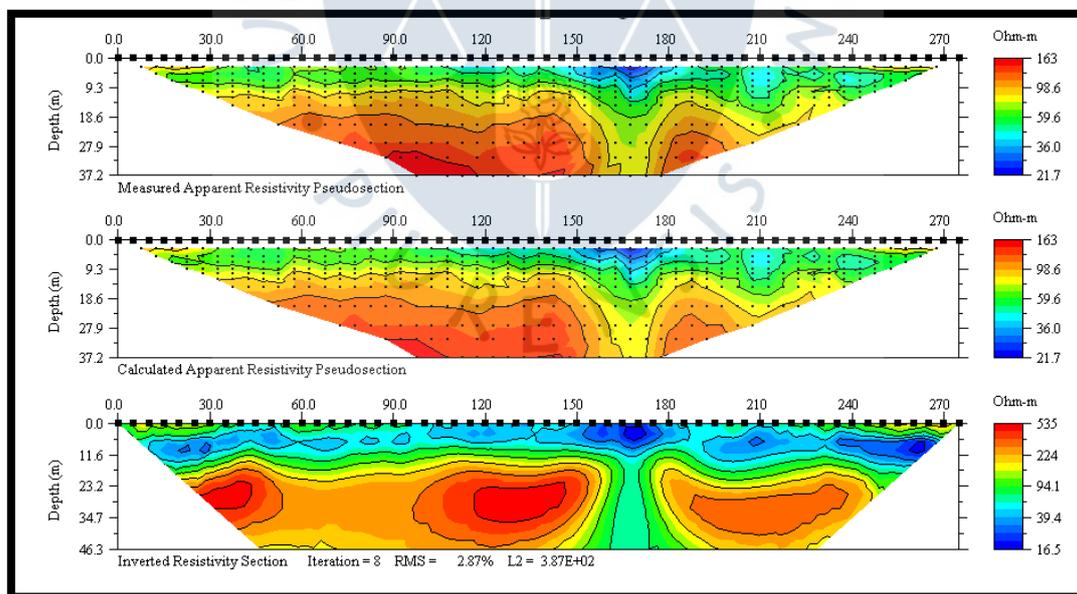


Figura 34. Earth Imager 2D

Fuente: <http://www.advancedgeosciences.com/index.sp.shtml>

Se han realizado perfiles de diferente longitud y profundidad, y la distribución de electrodos en espaciamiento y longitud total, ha sido variable, dependiendo de las condiciones topográficas del terreno. Para la gestión de archivos comandos y descarga de

datos se ha utilizado el programa SSADMIN. El método geoelectrico utilizado ha sido Shlumberger.

3.2 Comparación de resultados de las tres fases de exploración geofísica

Las fases de exploración se han realizado en diferentes condiciones climáticas, la primera campaña se realizó en los meses de octubre y noviembre del año 2015, encontrando el suelo con grietas de desecación debido a la alta evaporación, propias de la región. En el verano anterior se registraron pocas precipitaciones, lo que permitió baja infiltración en el subsuelo. La segunda campaña se realizó en los meses de junio y julio del año 2016, después de precipitaciones de regular intensidad en los meses de enero a marzo de ese año, por lo que las condiciones del subsuelo se vieron alteradas en la mayoría de los puntos de investigación. La tercera campaña, realizada entre los meses de octubre y noviembre del 2017, presentó condiciones climáticas distintas (altas precipitaciones en meses anteriores), que alteraron los valores de resistividad, puesto que se observaron cambios considerables en el subsuelo de todos los puntos de investigación.

A continuación se muestran los resultados de las exploraciones en las tres campañas realizadas para cada uno de los 20 puntos seleccionados en el estudio.

3.2.1 Punto A

Se encuentra en depósitos de arenas, limos y arcillas; cerca de la zona ha sido posible observar perfiles de 2 metros de altura identificando zonas con venillas de yeso y materiales carbonatados. En la primera tomografía eléctrica el subsuelo presenta una capa de colores verdes representando a los sedimentos finos con resistividades de 4 a 20 $\Omega \cdot m$ en estado seco. En las secciones de la segunda y tercera campaña los materiales presentan resistividades por debajo de los 8 $\Omega \cdot m$, indicando la presencia de humedad en el subsuelo, estos cambios en el subsuelo se deben a que las campañas 2 y 3 se han desarrollado después de haber ocurrido periodos de lluvia. Las anomalías con los valores más altos están presentes en las tres secciones indicando alteración de los componentes mineralógicos propios de la zona (ver Figura 35).

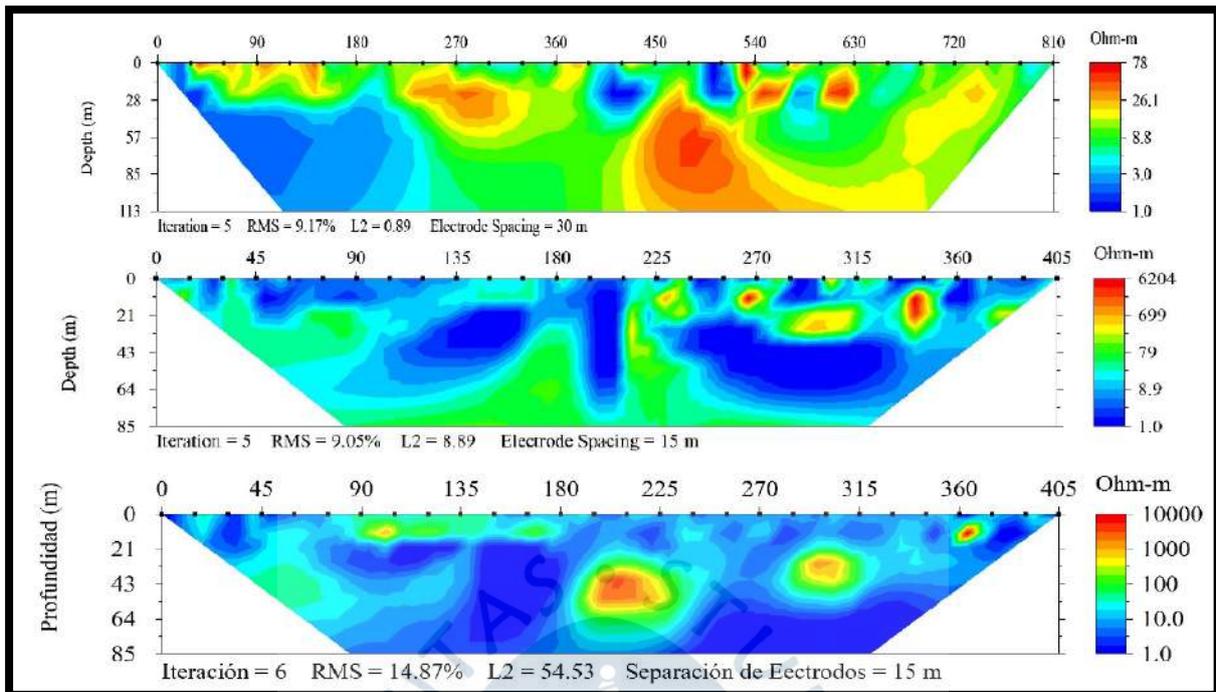


Figura 35. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto A.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.2 Punto B

La profundidad de estudio es diferente en las tres campañas, pero ha sido posible identificar dos tipos de materiales en el subsuelo (ver Figura 36). La primera tomografía con 88 metros de profundidad identifica que desde la superficie hasta los 28 metros existe una capa de material con valores de resistividad entre $110 - 12 \Omega \cdot m$. También se ha logrado identificar en la sección 2 graficando la anomalía con tonalidades de color verde y los mismos valores de resistividades. Los datos obtenidos en la tercera campaña presentan un perfil con profundidad de investigación de 22 metros, graficando claramente materiales del tipo arena limosa en estado húmedo a consecuencia de las altas precipitaciones registradas en el último año.

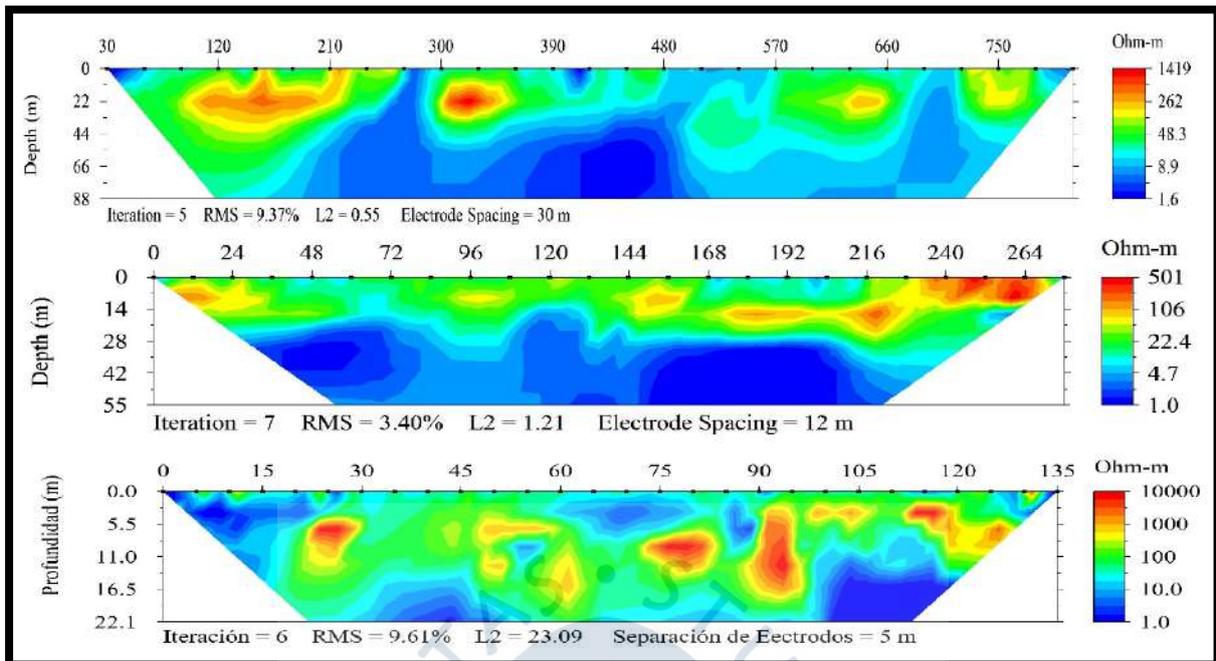


Figura 36. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto B.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.3 Punto C

Las tres fases de exploración se han realizado a diferente escala de profundidad, obteniendo 132 metros en la primera fase de investigación con anomalías de tonalidades azules y valores de resistividad por debajo de los $15 \Omega \cdot m$ localizadas a 33 metros de la superficie, en la segunda fase la profundidad de estudio llega hasta los 66 metros y se ha podido observar que las anomalías registradas en la primera fase corresponden a un cambio de material en el subsuelo asociadas a capas de sedimentos consolidados (ver Figura 37). En la tercera campaña la profundidad de estudio llega a los 39 metros, y se puede observar en la sección el cambio de material en profundidad tal como se había inferido en las dos primeras secciones. La capa de material fino arena limosa, se presenta con ligero grado de saturación aumentando en profundidad.

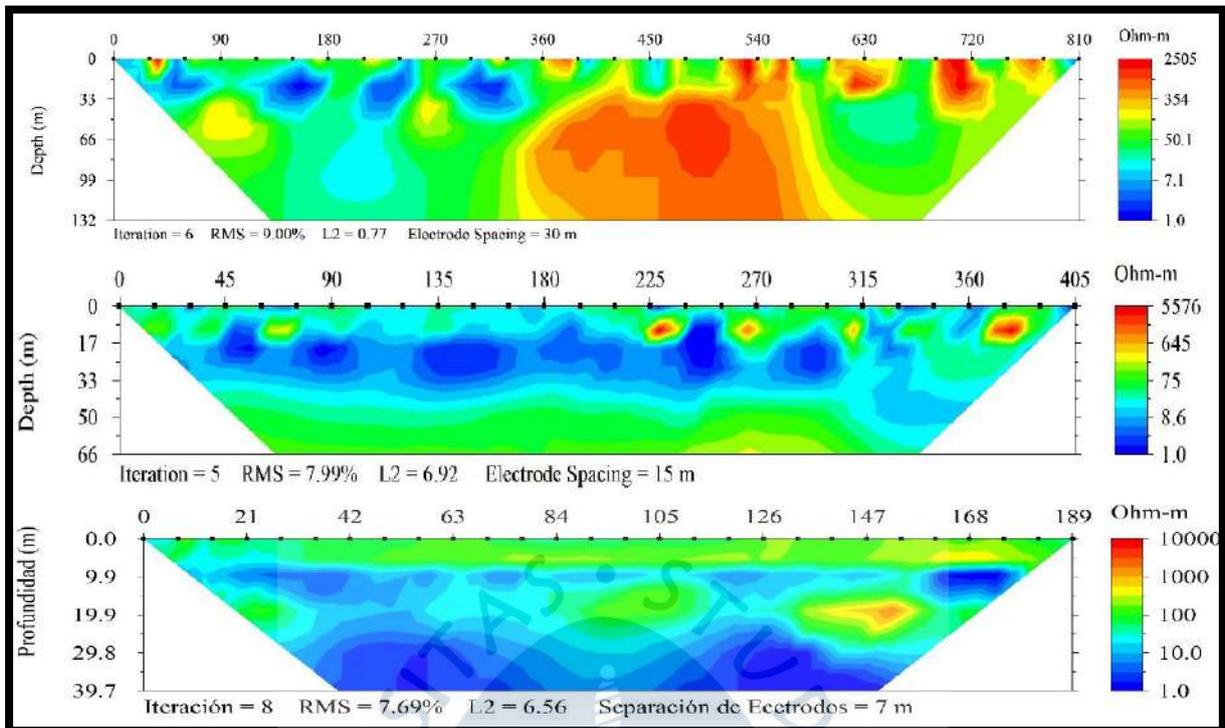


Figura 37. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto C.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.4 Punto D

La disposición de los estratos en el subsuelo es de forma horizontal y se han desarrollado con 5 metros de espaciamento obteniendo la misma escala de profundidad para las tres campañas. Las dos primeras secciones presentan una anomalía de tonalidades rojas con los valores más altos de resistividad disminuyendo en la tercera fase de investigación (ver Figura 38). La presencia de capas de arcillas y limos en la superficie en estado seco permiten el aumento de los valores de resistividad registrándolos como anomalías, ocurriendo lo contrario en la sección 3 donde los valores disminuyen por causa de la humedad y la saturación de poros.

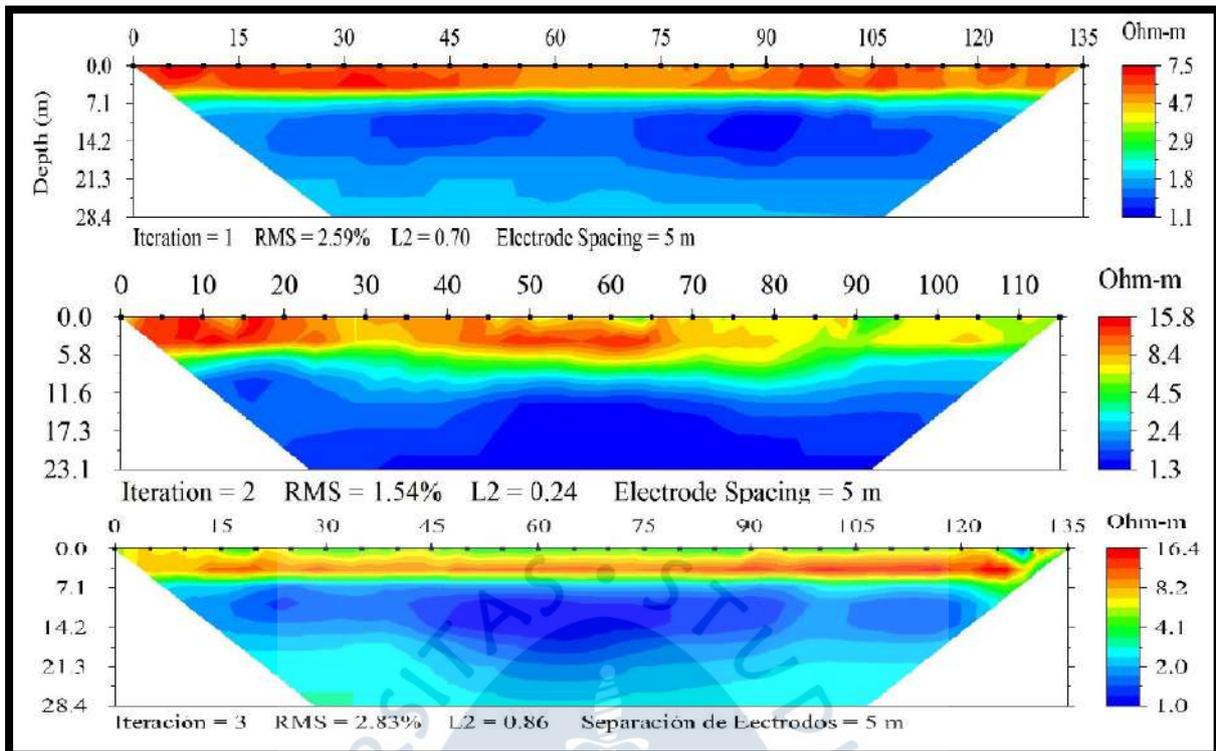


Figura 38. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto D.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.5 Punto E

En las tres campañas de exploración geofísica se observan que puede existir en profundidad materiales con mayor índice de poros, que permiten el almacenamiento de agua. Las dos primeras secciones son paralelas en el suelo presentando congruencia en las resistividades, en toda la sección del perfil se encuentran capas de arcillas de diferente espesor con intercalaciones de arenas y limos, además la presencia de venillas de yeso que actúan con resistividades altas que se pueden presentar como anomalías. La presencia de humedad en profundidad es mínima para las dos campañas, y máxima para la tercera campaña incluso desde muy cerca de la superficie (ver Figura 39).

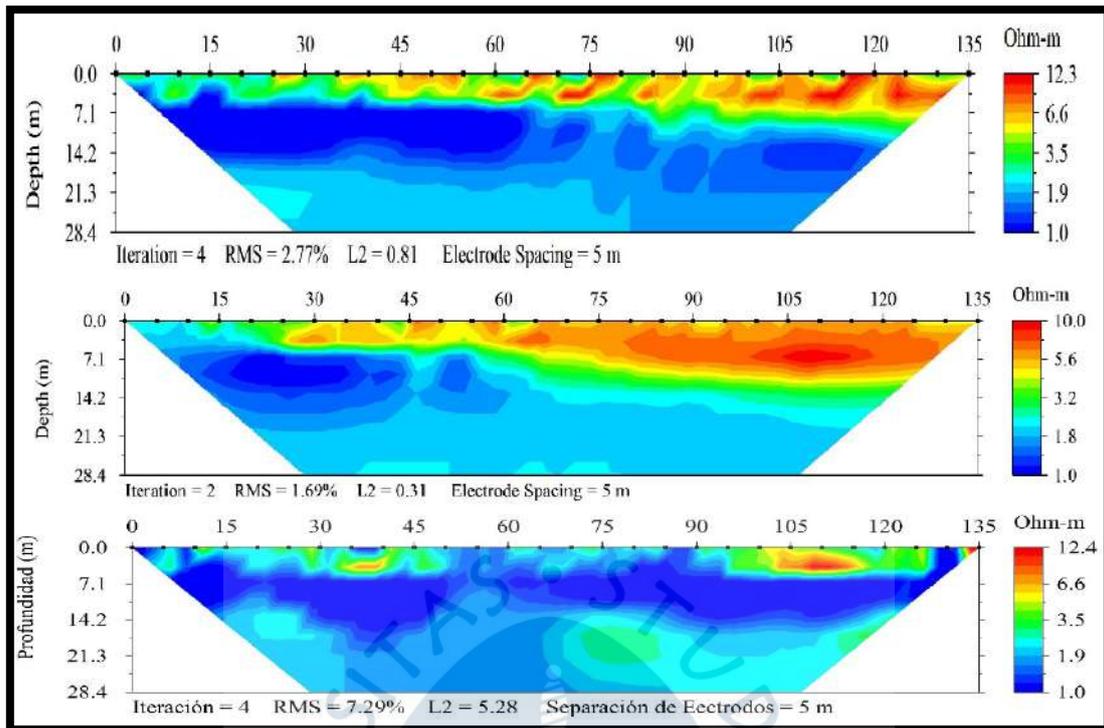


Figura 39. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto E.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.6 Punto F

Por ubicarse dentro de la formación Verdún, en el subsuelo se pueden encontrar estratos de areniscas con intercalaciones de horizontes de arcilla y limo. Las tomografías eléctricas indican un cambio en las resistividades a partir de los 4 metros de profundidad, asociadas a la presencia de materiales finos tipo arcillas y limos. Son las capas de arenas de grano medio las que predominan en las secciones, siendo la última sección con variación en los valores y tonalidades a causa de la humedad y posible presencia de poros saturados (ver Figura 40).

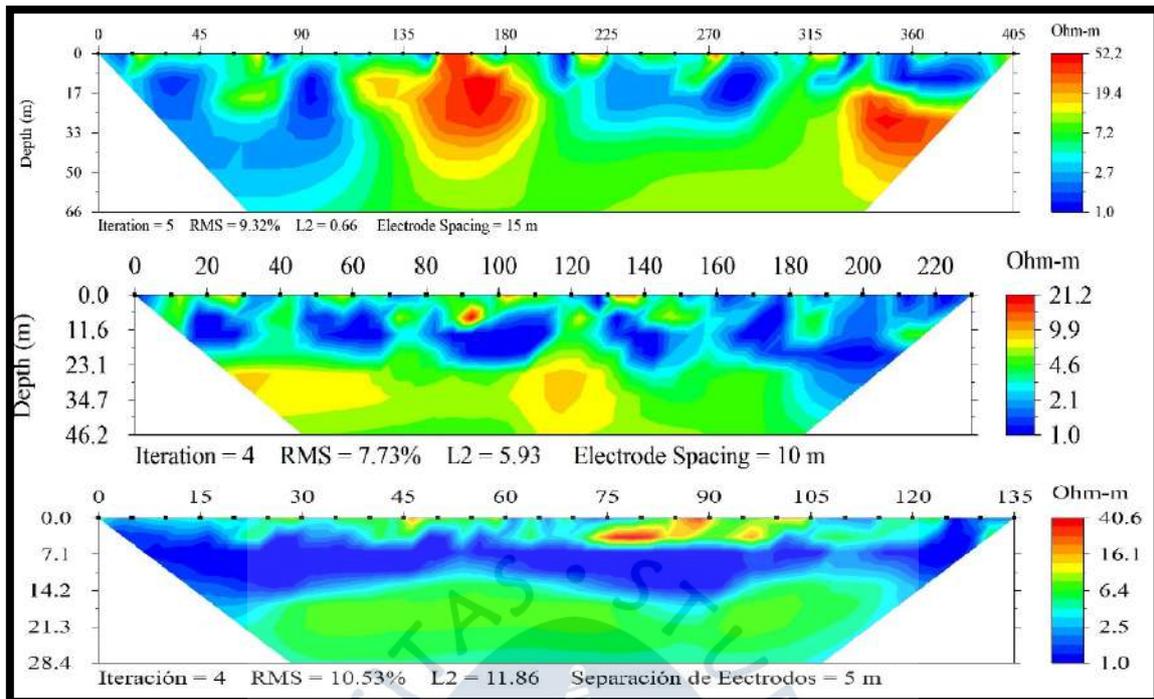


Figura 40. Perfiles geoelectricos 2D, punto F.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.7 Punto G

Los estudios de exploración se han realizado a la misma escala, por ello se logra mantener la profundidad de investigación. La primera tomografía eléctrica muestra una disposición de capas semi paralelas con resistividades por debajo de los $14 \Omega \cdot m$ asociada a capas de sedimentos finos tipo arena de grano fino, limos y arcillas. En las secciones 2 y 3 las resistividades menores se encuentran cubriendo todo el perfil debido al aumento de humedad y mayor saturación de poros. En la primera campaña el subsuelo se encontraba sin humedad y las precipitaciones fueron mínimas en la región. En la segunda campaña se presenta de forma regular y es en la tercera fase, donde ocurren altas precipitaciones produciendo mayor infiltración (ver Figura 41).

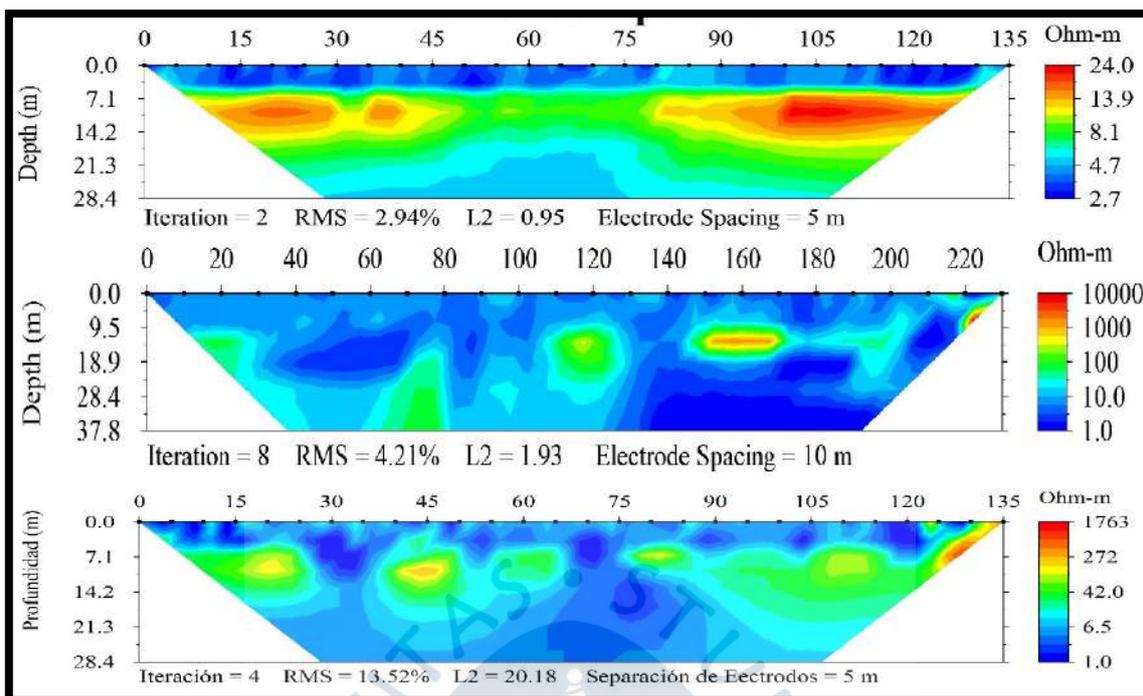


Figura 41. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto G.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.8 Punto H

El espaciamiento entre electrodos ha sido el mismo para las tres campañas alcanzando la misma escala de profundidad, las tres secciones han logrado identificar tres horizontes de diferentes características. La anomalía de color verde con valores de resistividades por debajo de los 100 metros se correlaciona con arenas de grano medio a fino y presencia de limos. El espesor del estrato varía en forma paralela a la dirección horizontal del perfil, llegando a profundidades de 7 hasta los 28 metros. Dentro del estrato se ubican lentes de limos y arcillas que dan resistividades más bajas. A los 15 metros de distancia horizontal por debajo de los 7 metros aparecen anomalías con las resistividades más altas que disminuyen a lo largo del perfil, se correlaciona con la presencia de materiales rocosos alterados del tipo volcánico (ver Figura 42). Es en la tercera sección donde aparecen cambios en las resistividades indicando la presencia de humedad en el subsuelo, específicamente en el estrato representado por la anomalía de color verde.

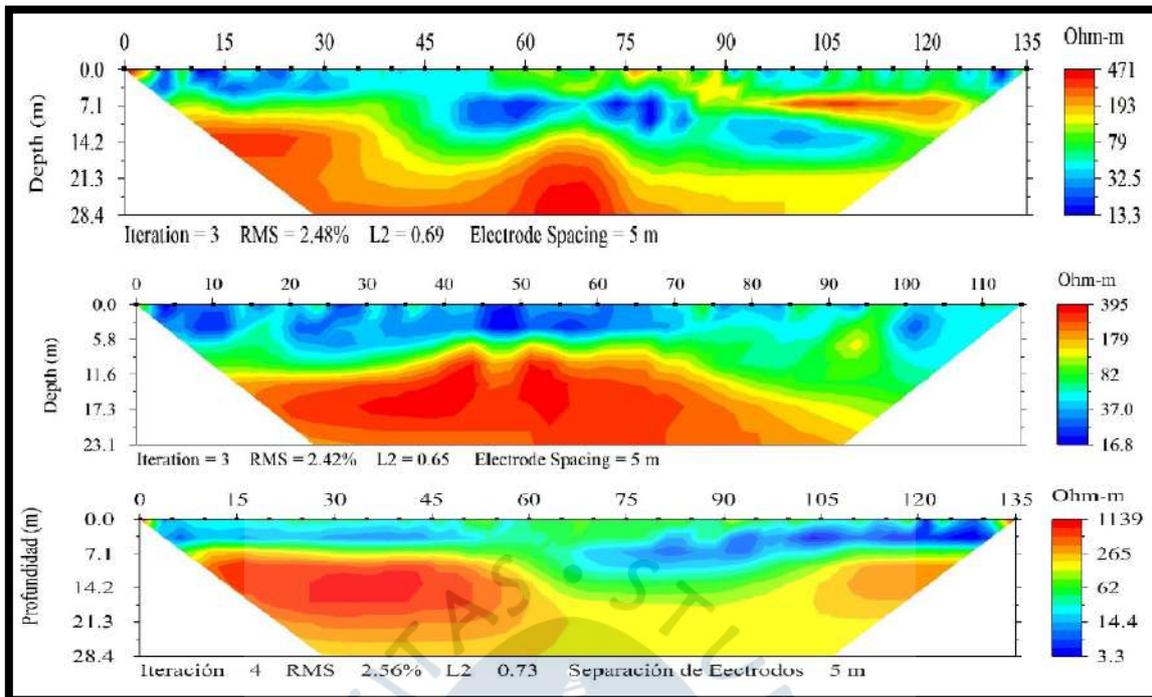


Figura 42. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto H.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.9 Punto I

Los primeros metros del perfil se componen de materiales finos como limos y arcillas. En las tres secciones se mantienen los espesores de la capa de sedimentos, apareciendo una anomalía de tonalidades azules con resistividades menores a $6 \Omega \cdot m$ asociadas a capas de arcillas. Los valores han disminuido en la sección tres esto se debe a la causa de mayor infiltración de agua que ha permitido la saturación de los poros (ver Figura 43). Los valores más altos indican la presencia de material rocoso con alteración y humedad.

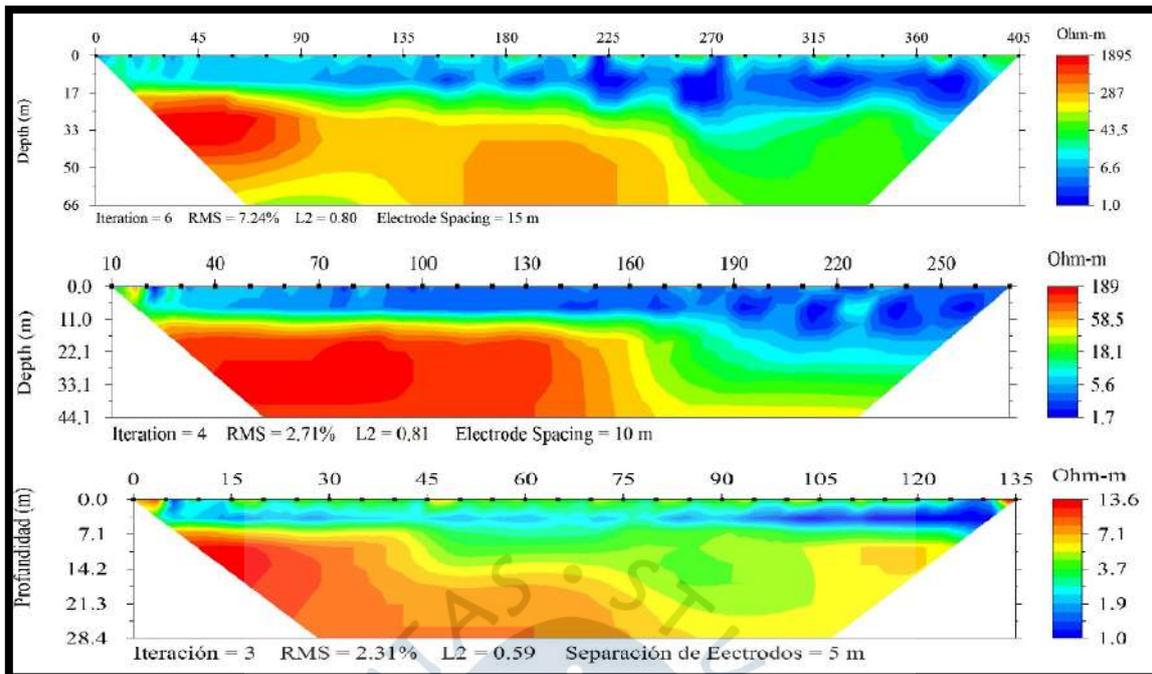


Figura 43. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto I.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.10 Punto J

Para la disposición de los electrodos en campo se ha tenido como guía de dirección de un canal de regadío. La primera sección corresponde a la disposición de electrodos en forma paralela al canal y las dos últimas secciones se ubican de forma perpendicular, ubicando al primer electrodo en la línea de canal. En cada tomografía geoelectrica las mayores resistividades se encontraron cerca de la superficie indicando estratos de limo y la presencia de arenas a mayor profundidad. En la primera tomografía la napa freática se encuentra entre 0.5 y 5 metros. En la tomografía, la sección muestra la napa freática por debajo de los 5 metros, variando el espesor a lo largo del perfil. En la tercera sección la napa sube muy cerca de la superficie y todo el perfil se encuentra altamente saturado (ver Figura 44).

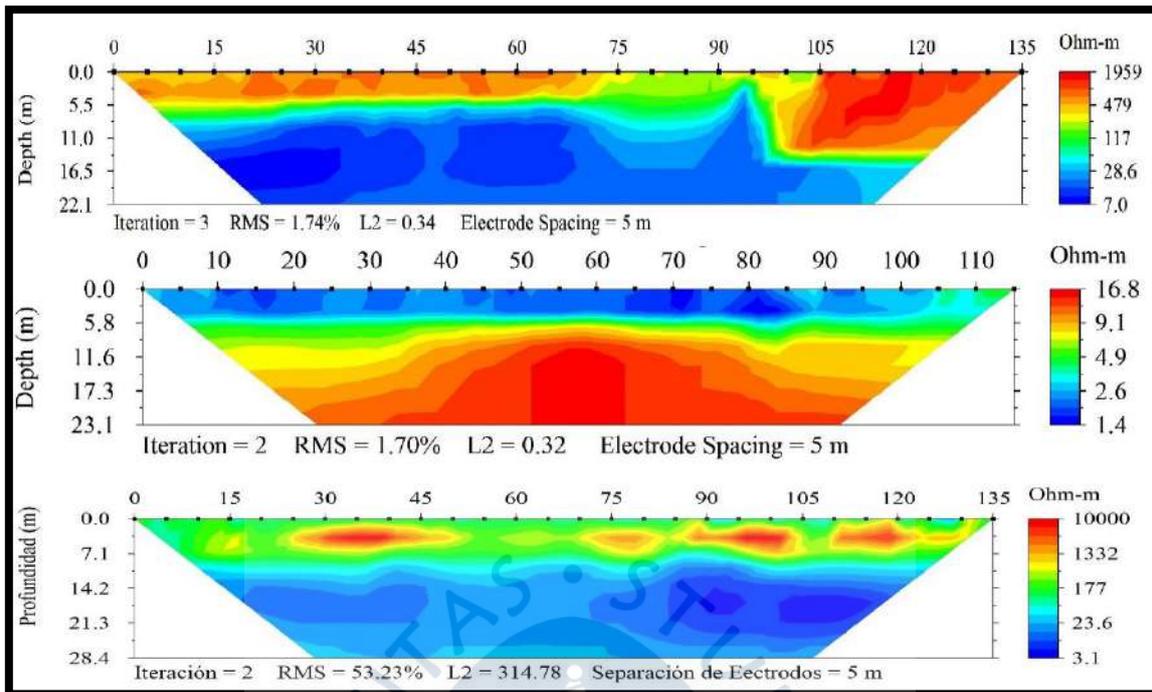


Figura 44. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto J.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.11 Punto K

En las dos primeras secciones se observa un perfil de bajas resistividades asociadas a sedimentos de limos y arcillas. A mayor profundidad los valores cambian y pueden estar asociadas a la presencia de humedad. En la tercera se identifican grandes espesores de limos, lo cual indica una gran posibilidad de la existencia de humedad (ver Figura 45).

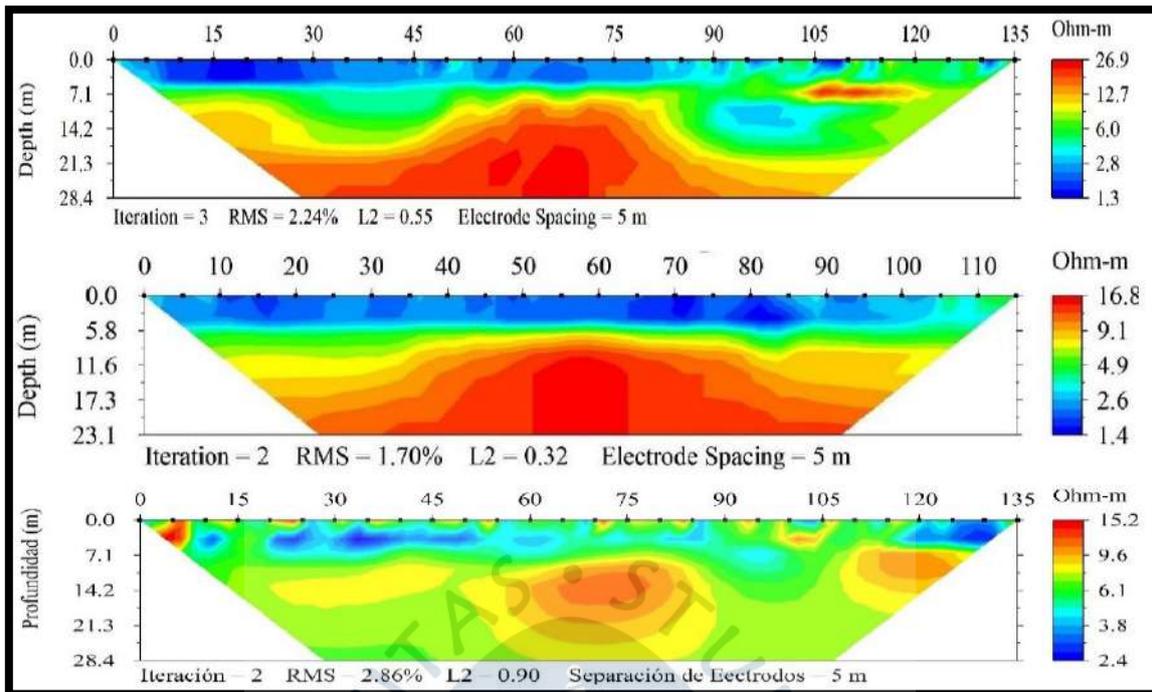


Figura 45. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto K.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.12 Punto L

Las tomografías geoelectricas presentan diferente profundidad de investigación, pero ha sido posible identificar horizontes de limos, arcillas y arenas; que corresponden a los valores entre los rangos de 28 a $1 \Omega \cdot m$, a profundidades de 100 metros pueden ubicarse material rocoso alterado que será identificado por valores altos de resistividades. La última sección asociada a espesores de sedimentos finos presenta variación en las resistividades consecuencia del aumento de saturación en los poros (ver Figura 46).

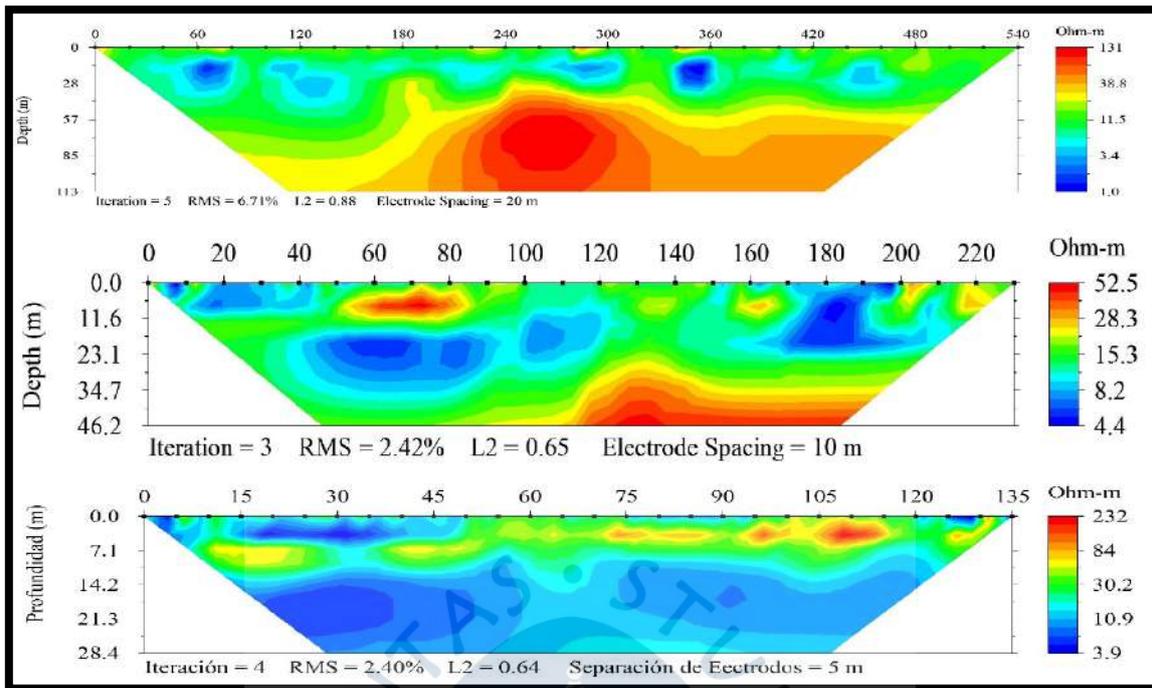


Figura 46. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto L.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.13 Punto M

El subsuelo en esta área de terreno se compone en los primeros metros cerca de la superficie de materiales finos limos y arcillas, para luego dar paso a materiales de grano medio a grueso como arenas, gravas y conglomerados. La napa freática fluctúa entre 7 y 14 metros de profundidad para las dos primeras secciones, es en la tercera sección donde se ubica muy cerca de la superficie entre 1.5 y 9 metros (ver Figura 47).

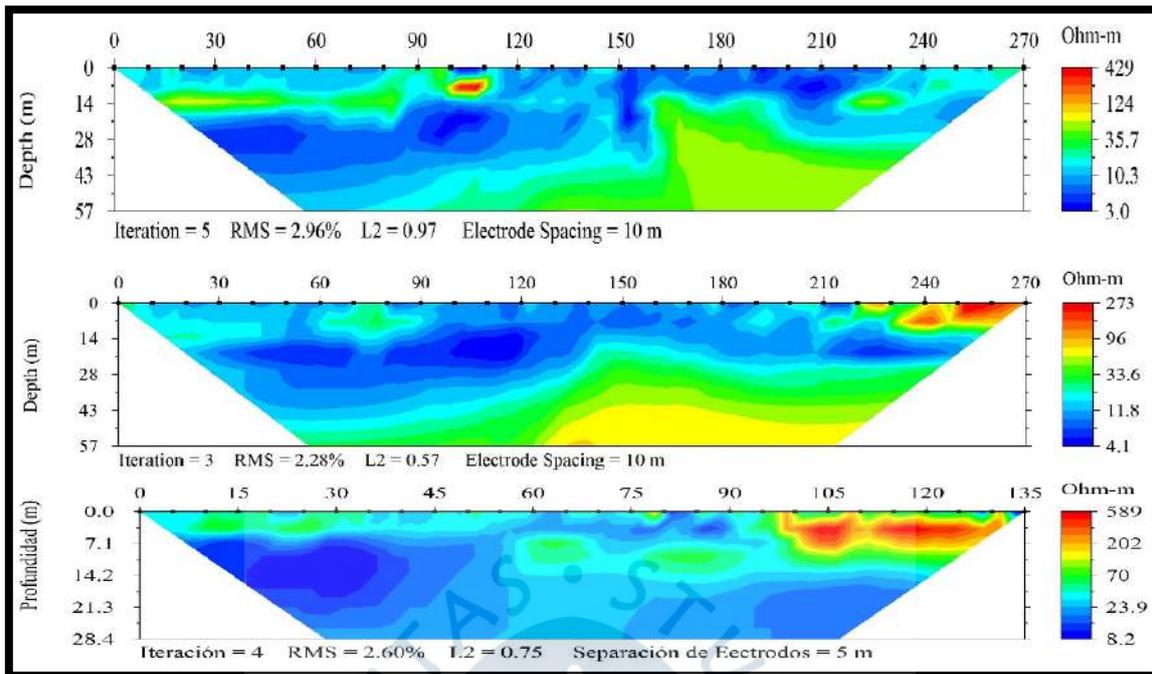


Figura 47. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto M.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.14 Punto N

Las tomografías obtenidas de cada fase de exploración registran valores por debajo de los 80 Ohm-m indicando la presencia de materiales sedimentarios en el subsuelo. Las secciones identifican a pocos metros de la superficie capas de material limo arenoso, a mayor profundidad el grano de los materiales cambia de medio a grueso, apareciendo anomalías con valores altos que pueden estar asociadas a conglomerados. La primera tomografía identifica anomalías de zonas saturadas, esto puede ser posible ya que los electrodos se ubicaron cerca de una quebrada que pasa por el terreno de estudio, las secciones 2 y 3 se han desarrollado en la misma dirección y área; observando que los materiales en profundidad se encuentran saturados a diferencia de la segunda campaña (ver Figura 48).

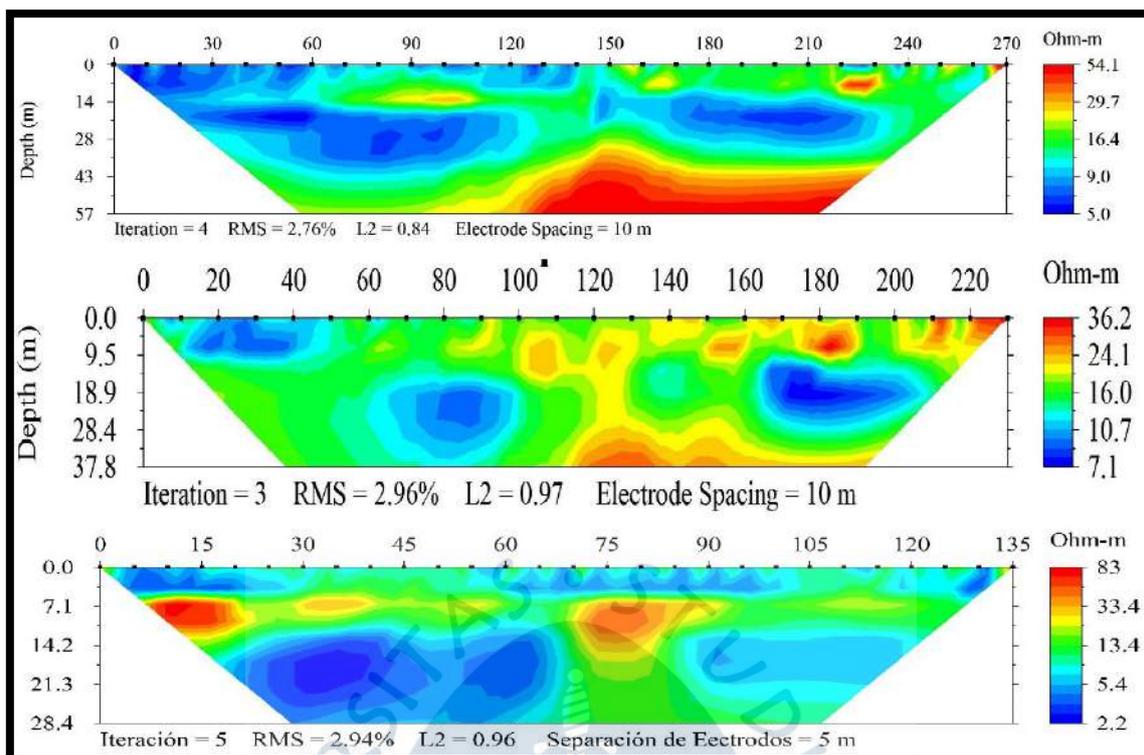


Figura 48. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto N.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.15 Punto O

La profundidad de investigación es diferente para cada tomografía, se ha considerado un canal de riego como referencia para la disposición de electrodos. El primer estudio se realizó en forma paralela y los dos últimos de forma vertical al canal de referencia. El subsuelo presenta espesores de limos y arcillas aproximadamente hasta los 23 metros de profundidad. Con anomalías de resistividades altas asociadas a lentes de sedimentos gruesos tipo conglomerados, las zonas de baja resistividad son materiales con mayor grado de saturación de poros que aumentan considerablemente en la última sección (ver Figura 49).

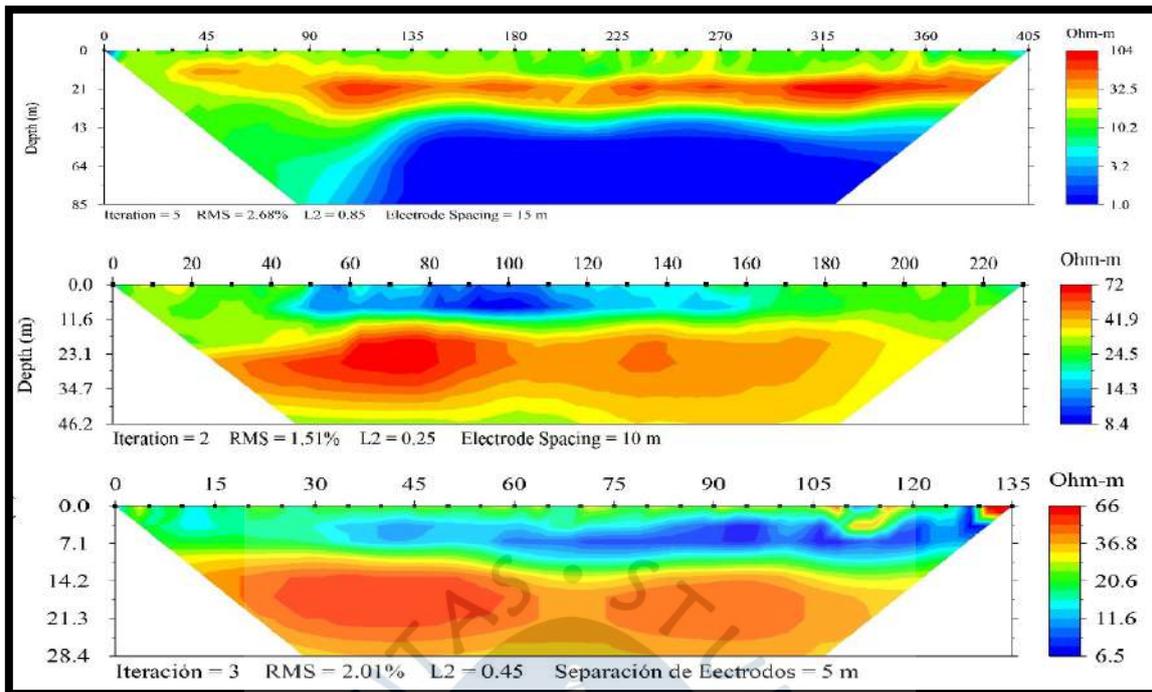


Figura 49. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto O.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.16 Punto P

El área de estudio se ubica en depósitos cuaternarios formados por sedimentos finos y gruesos del tipo; limos, arcillas, arenas, gravas y conglomerados, a 100 metros del río Piura. La disposición de electrodos se ha desarrollado en áreas de cultivos con suelos limoso y limoarenoso. La profundidad de investigación es diferente para cada tomografía, las dos primeras secciones corresponden a un mismo terreno, identificándose 3 capas de características diferentes, desde la superficie hasta los 23 metros con materiales del tipo limoarenoso y limos; a mayor profundidad se presenta una capa en correlación a la anomalía con los valores más altos que puede asociada a materiales tipo conglomerados. Y los valores más bajos se correlacionan a la presencia de una lata saturación de los poros, observando la fluctuación de la napa cerca de la superficie (Ver Figura 50).

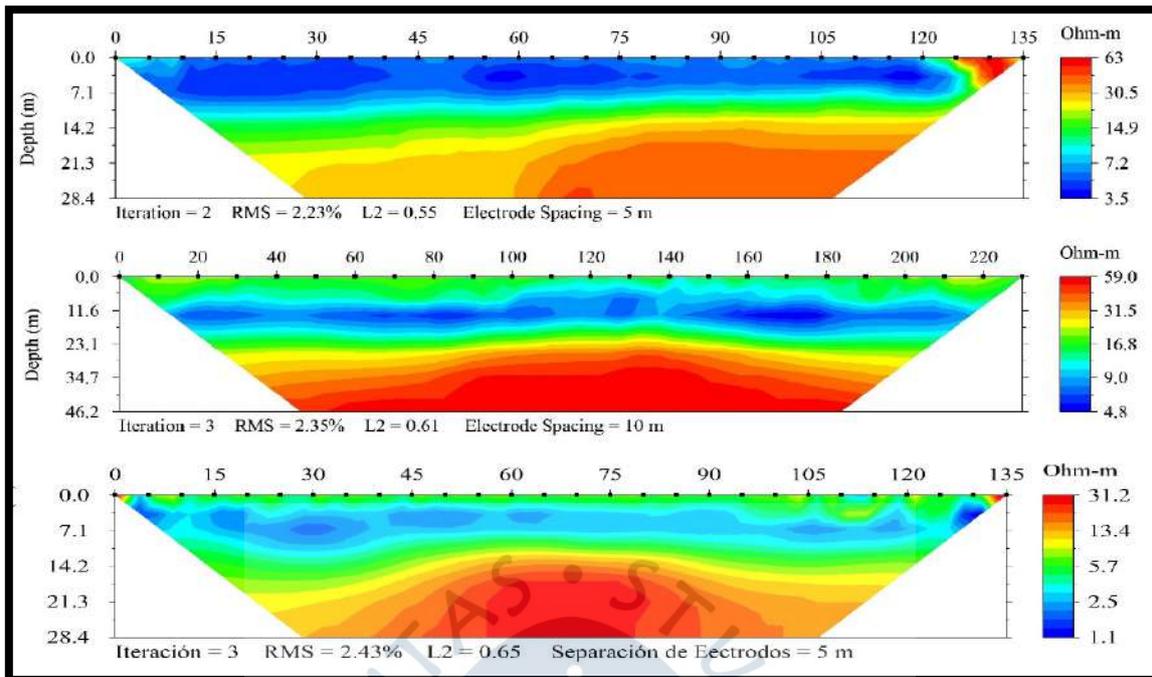


Figura 50. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto P.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.17 Punto Q

El área de estudio presenta materiales tipo limoarenoso, en las tres secciones se observan anomalías con valores de resistividades menores que pueden estar asociadas a capas consolidadas que permiten la retención del agua en los poros. Cabe resaltar que las resistividades menores se han encontrado muy cerca de la superficie en la tercera fase exploratoria, como consecuencia de una mayor infiltración de los últimos meses (ver Figura 51).

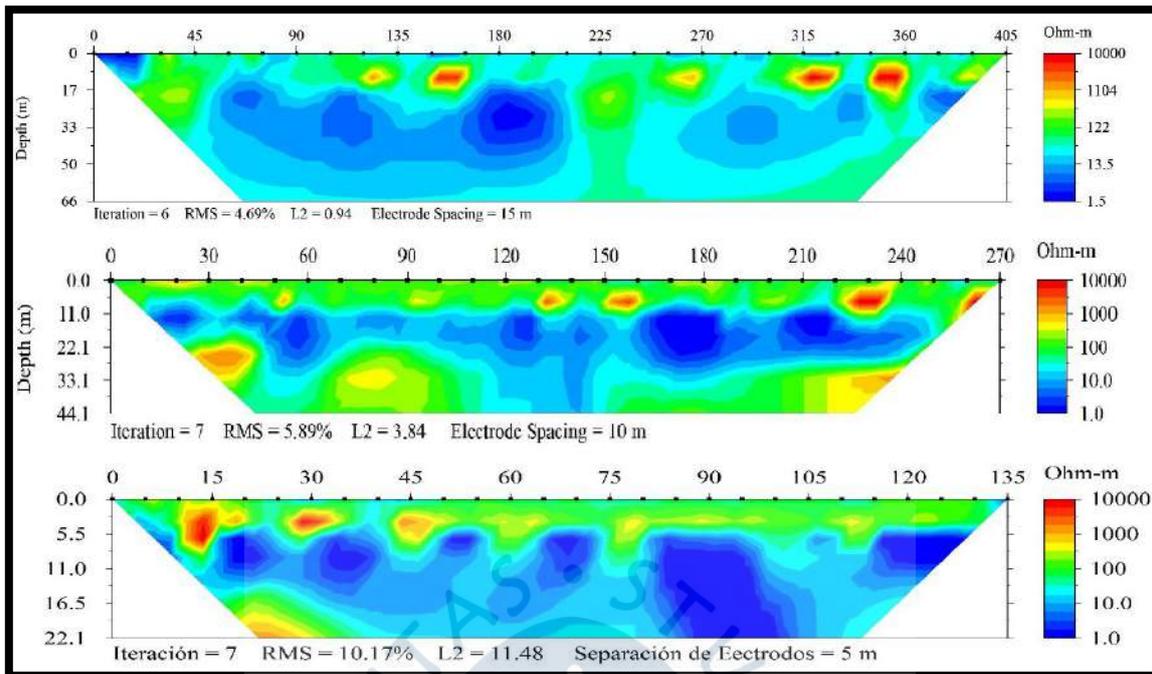


Figura 51. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto Q.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.18 Punto R

Se observan que los dos primeros perfiles muestran materiales sueltos y secos; y corresponden a un espesor relativo de sedimentos tipo limoarenoso y conglomerados, para luego presentar valores entre 400 – 500 $\Omega \cdot m$. de capas de arenas con posible humedad. La primera y segunda campaña se presentaron pocas precipitaciones y alta evaporación estos factores alteran las características litológicas aumentando los valores de resistividad. A partir de los 17 metros de profundidad en la primera campaña y segunda campaña aparecen resistividades menores que pueden indicar la presencia de humedad. La tercera campaña, se realizó después de un período de intensas lluvias que cambian las características de subsuelo indicando la recarga de espacios entre los granos (ver Figura 52).

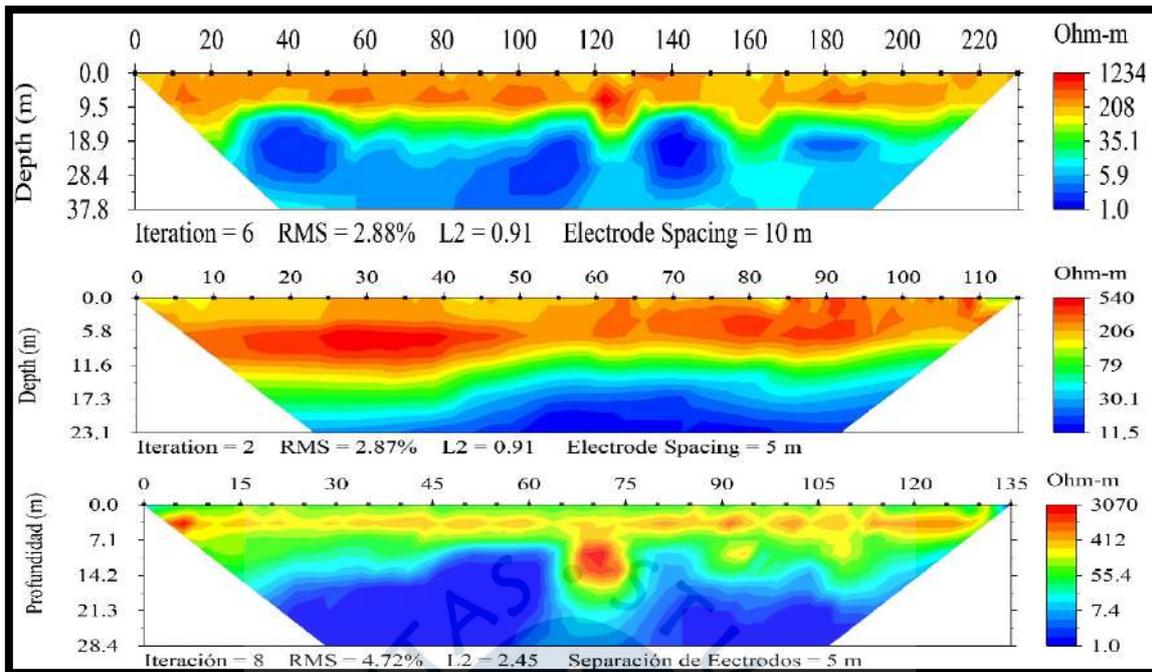


Figura 52. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto R.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.19 Punto S

La distribución de los electrodos en el terreno para la segunda campaña se realizó de forma semiparalela a la primera exploración, y la tercera exploración en dirección perpendicular a las dos primeras. Se mantiene la uniformidad del espesor de las capas en las tres secciones, la capa con mayor espesor formada por sedimentos finos y de grano medio. En ella se presenta una capa con valores más altos de resistividad y puede correlacionarse con la presencia de conglomerados. Las anomalías de color azul indican capas más consolidadas y con alto grado de saturación. En la tercera campaña ha sido posible observar el cambio mayor saturación en las capas del subsuelo (ver Figura 53).

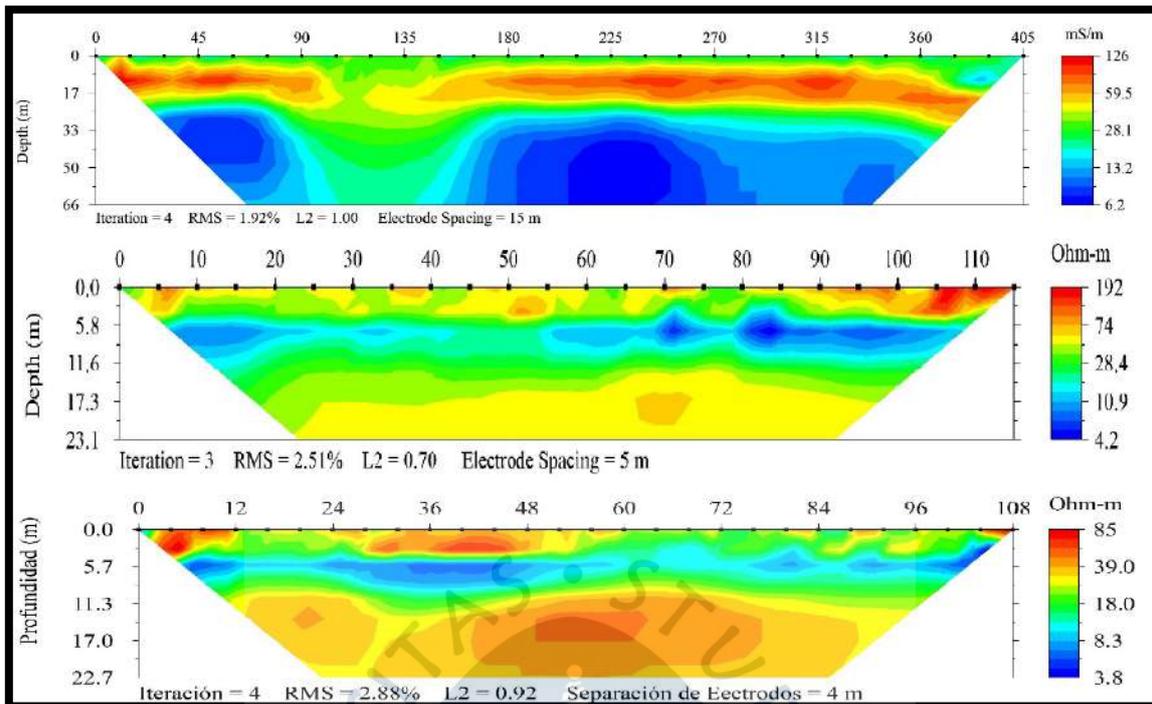


Figura 53. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto S.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).

3.2.20 Punto T

Los materiales en el subsuelo se asocian a capas de sedimentos más finos cerca de la superficie aumentado el tamaño de granulometría en profundidad, el espesor de las capas varía tal como se observa en la primera sección, la capa de sedimentos del tipo arenas y limos se encuentra en toda la sección. A diferencia de las secciones de la segunda y tercera fase. Se incrementa la napa freática y disminuye las resistividades en profundidad (anomalías de color rojo) que pueden correlacionar capas de conglomerados o roca alterada (ver Figura 54).

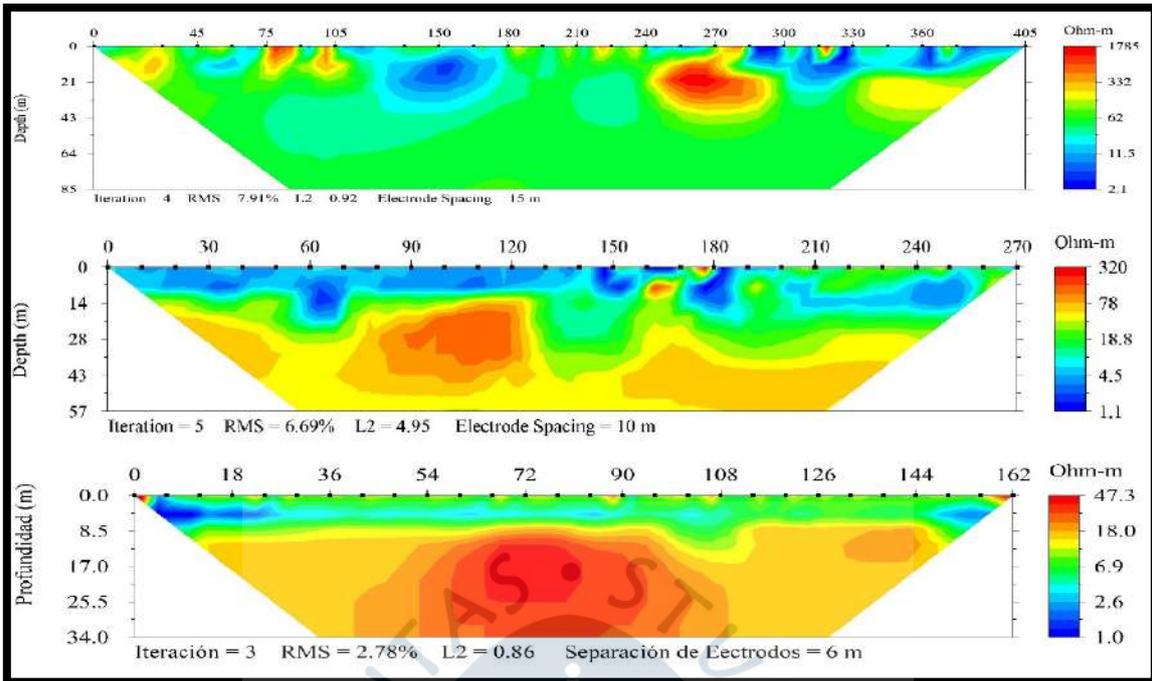


Figura 54. Perfiles geoelectricos 2D de las tres campañas de campo, en el punto S.

Fuente: Adaptado de Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017).



Capítulo 4

Artículo publicado

Este artículo, fue presentado, aprobado y expuesto, en el I Congreso Internacional de Ingeniería y Dirección de Proyectos - III Congreso Regional IPMA-LATNET con el título “Exploración geofísica con imágenes de resistividad 2D en la zona noroeste del Perú”. Los autores de este artículo son: Ana María Paulini, Wilfredo Castillo, Karen Inga, Judith Sullon y Rafael Sono. A continuación, el artículo expuesto y publicado, tal cual fue presentado al Congreso.



I CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y DIRECCIÓN DE
PROYECTOS
III CONGRESO IPMA-LATNET

EXPLORACIÓN GEOFÍSICA EN LA ZONA NOROESTE DEL PERÚ

Ana María Paulini*, Wilfredo Castillo, Karen Inga, Judith Sullon, Rafael Son

Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Calle Mártir Olaya 162 – Miraflores, Lima, Perú.

* Autor en correspondencia: Ana María Paulini

Correo electrónico: ana.paulini@udep.pe

Palabras clave: Sondeo eléctrico vertical (SEV), resistividad, agua subterránea, cuenca geológica, conductividad.

RESUMEN

En los últimos años la región Noroeste del país, ha experimentado un rápido crecimiento productivo en el ámbito de la agroexportación; al punto de ser considerada una de las regiones de más alto crecimiento en ese rubro en el Perú. Esta actividad trae consigo un aumento en la demanda del recurso hídrico, el cual por las condiciones climáticas de la zona no está asegurado de manera constante durante todo el año. Por estos motivos, toma relevancia el conocimiento del subsuelo, y por ende del agua subterránea, pues al ser un recurso constante, viene siendo utilizado por los agroexportadores.

El estudio de las propiedades físicas y litológicas de los materiales del subsuelo, así como del agua subterránea; a través de sondeos geoelectricos permiten obtener información de las características petrográficas, estructurales, mineralógicas y geoclimáticas que difieren en edad y formación.

Para esta investigación, han sido seleccionados 20 puntos, ubicados sobre las cuencas geológicas de Talara y Lancones, en los que se realizaron sondeos geoelectricos. El procesamiento e inversión de datos da como resultado final una imagen 2D, que es interpretada en términos hidrogeológicos. Ha sido posible el reconocimiento de disconformidades en profundidad y la presencia de agua subterránea.

Keywords: Vertical electrical survey (SEV), resistivity, groundwater, geological basin, conductivity.

ABSTRACT

In last few years the Northwest region of Perú has experiment a rapid production growth in the field of agroexport; to the point of being considered one of the regions of highest growth in that heading in Peru. This activity brings an increase in the demand of the water resource, which because the climatic conditions of the zone is not assured in constantly way throughout the year. For these reasons, knowledge of the subsoil and groundwater becomes relevant, because it is being used by agroexporters.

The study of the physical and lithological properties of subsoil materials, as well as groundwater; through geoelectrical surveys, provide information on the petrographic,

structural, mineralogical and geo-climatic characteristics that differ in age and formation.

For this research 20 points were selected, located on the geological basins of Talara and Lancones, in which geoelectric surveys were carried out. Data processing and inversion results in a 2D image, which is interpreted in hydrogeological terms. It has been possible to recognize in-depth disconformities and the presence of groundwater.

Introducción

La exploración geofísica es una rama de la física que involucra conceptos físicos y matemáticos diseñando métodos que ayudan a los hidrogeólogos a interpretar datos y solucionar problemas que se presentan en la exploración del subsuelo. En nuestro país el método geoelectrico más utilizado en la exploración de aguas subterráneas, para determinar las propiedades del subsuelo, es la técnica de los Sondajes Eléctricos Verticales (SEV), que consiste en obtener valores de resistividad de los materiales rocosos en profundidad. En la interpretación de los parámetros obtenidos es posible localizar una formación geológica capaz de almacenar y transmitir agua, a la que conocemos como acuífero.

En la región Piura los estudios a detalles del potencial de agua subterránea que se tiene son muy pocos, los proyectos realizados revelan presencia de acuíferos en las zonas del Alto, Medio y Bajo Piura, pero el área y volumen total del acuífero aún no se conoce por falta de estudios en la zona.

Justificación

En los últimos 10 años, el noroeste del Perú desarrolló un acelerado crecimiento agroindustrial, haciendo mayor uso del agua y el suelo. El agua, como factor principal en épocas de lluvia, se almacena en los reservorios de Poechos y San Lorenzo, pero actualmente los embalses han disminuido su capacidad de almacenamiento, generando malestar para abastecer a todas las actividades de la población.

En el simposio de la APEC realizado en la ciudad de Piura en setiembre del 2016, el viceministro de gestión ambiental del MINAN anunció que en el último año las costas del Perú han presentado el período más seco de los últimos treinta años con repercusiones en el agua y agricultura. Por estos motivos el recurso hídrico subterráneo es de vital importancia para el desarrollo sostenible de actividades agrícolas, dada la falta de continuidad del recurso hídrico superficial. La localización de fuentes de agua subterránea se complementa con estudios geológicos y geoelectricos que permiten una caracterización del medio acuífero en área y volumen.

Objetivo

Lograr un mayor conocimiento geofísico de la zona nor-oeste del Perú, que pueda servir como base de dato para la elaboración de estudios más profundos que conlleven a la identificación y posterior cuantificación del recurso hídrico subterráneo, el cual es de vital importancia para el desarrollo de actividades económicas en la Región.

Desarrollo del tema

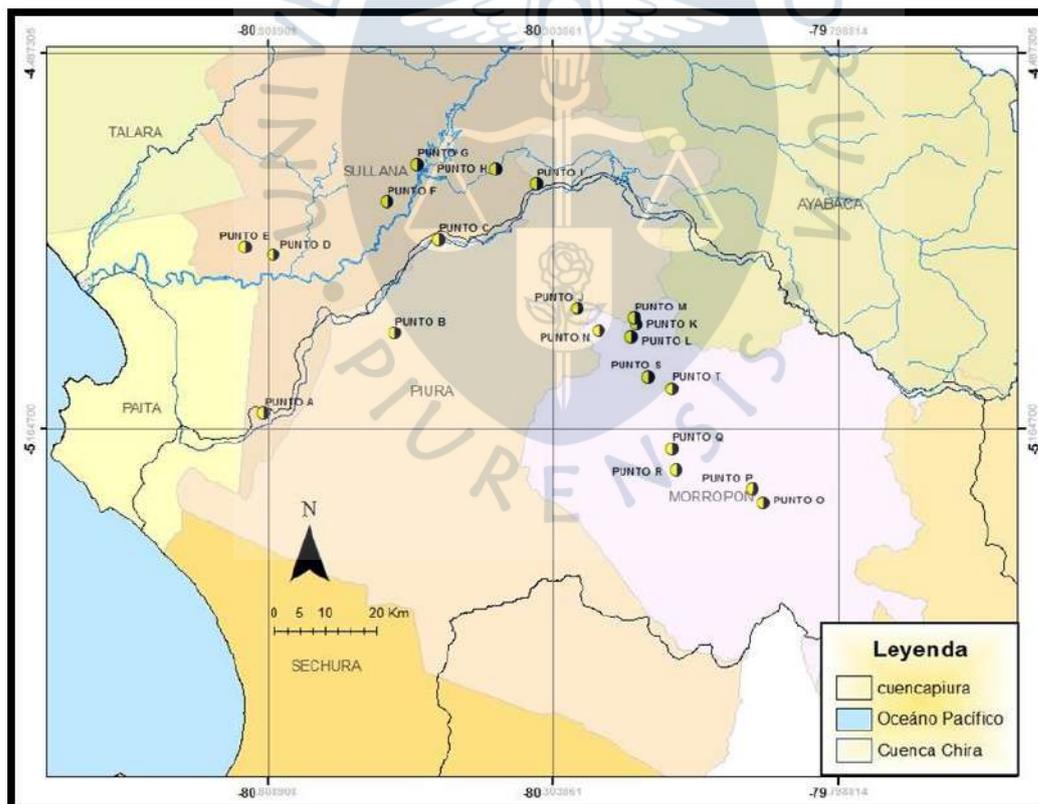
3.3 Área de estudio

El área del proyecto se ubica en las dos cuencas geológicas más importantes del Noroeste del Perú: Talara y Lancones. En ambas, la geología es variable debido a los diferentes procesos sedimentarios y estructurales que han dado lugar a diferentes tipos de rocas. La cuenca Talara es de origen sedimentario y la cuenca Lancones, de origen volcánico a volcánico sedimentario. Los eventos ocurridos durante el cuaternario, originaron la mayor acumulación de materiales detríticos que han dado lugar a formaciones acuíferas.

3.4 Metodología

Las campañas de campo se han organizado en función a dos fases; la primera fase se desarrolló en los meses de noviembre y diciembre; temporada con ausencia de lluvias, y la segunda temporada en los meses de julio y agosto, después de algunos meses de haberse registrado lluvias de poca intensidad. Se seleccionaron 20 puntos de estudio (Ver Figura 1), previo a un reconocimiento de campo e identificación de zonas agrícolas, de los cuales 8 se ubican en la cuenca Talara y 12 en la cuenca Lancones. El método geoelectrico utilizado es Schlumberger, el más utilizado en exploración de agua.

Figura 1. Ubicación de puntos en la zona de estudio



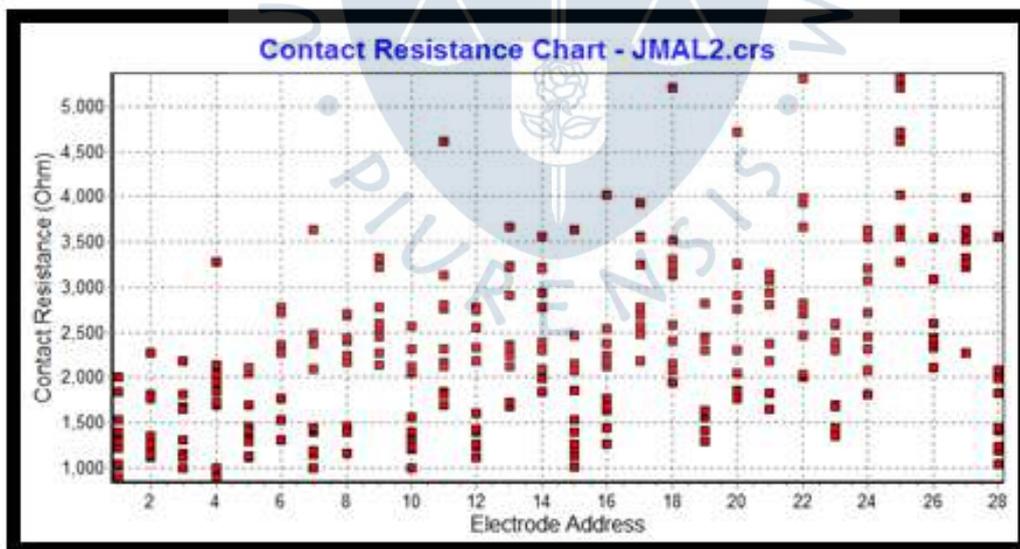
La adquisición de datos se realizó a través de un resistímetro SuperSting R8, con una distribución de 28 electrodos (ver figura 2), teniendo en cuenta diferentes longitudes y profundidades. El software de procesamiento de datos ha sido EARTHIMAGER 2D, y para la gestión de archivos comandos y descarga de datos se ha utilizado el programa SSADMIN. En primer lugar se obtienen los valores de resistencia (ver Figura 3), que luego se invierten y procesan para obtener los valores de resistividad. El resultado final es la

imagen de resistividad 2D, indicando los valores reales del subsuelo, los cuales son luego interpretados con la información geológica e información adicional de la zona (por ejemplo otros sondeos y/o gammagrafías) para obtener perfiles.

Figura 2. Distribución de los electrodos en campo



Figura 3. Valores de resistencia



3.5 Resultados

Se han realizado en total 40 sondeos eléctricos verticales, desarrollándose 2 sondeos por cada punto. El perfil de resistividades varía en función a la distancia a profundidad.

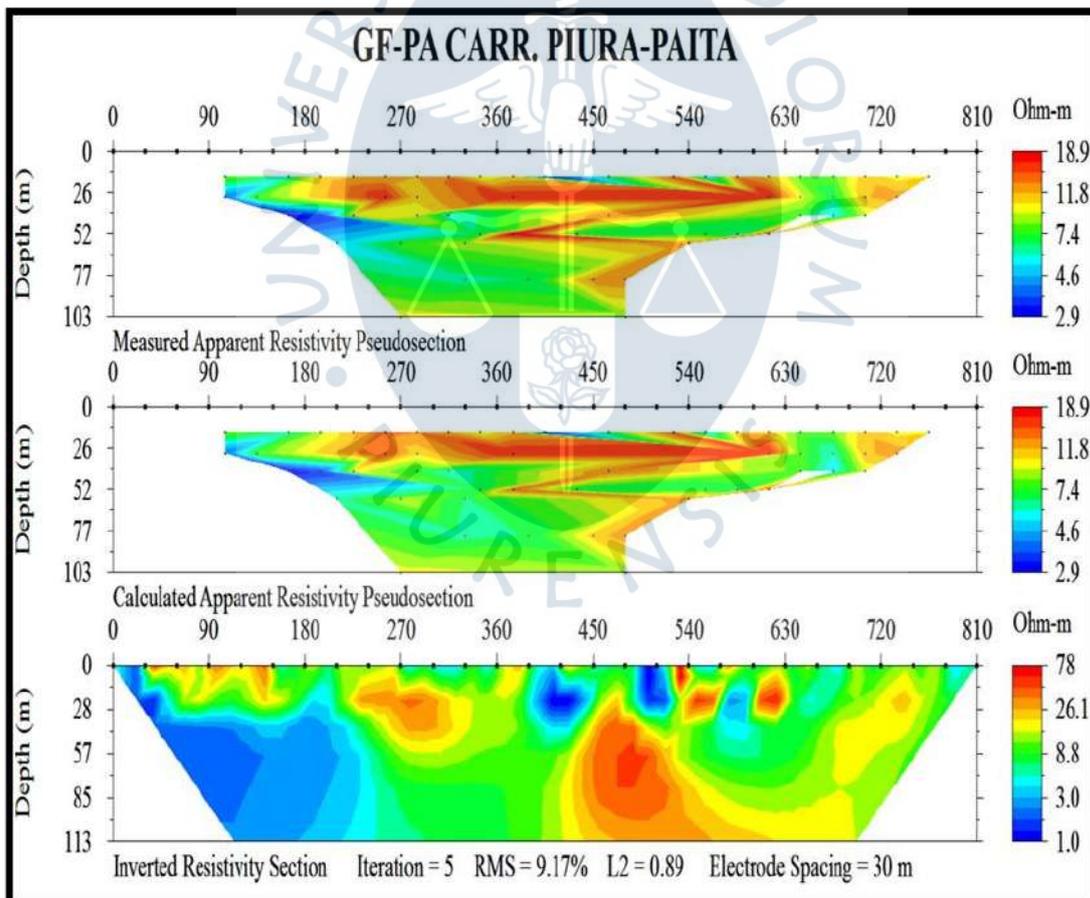
3.5.1 Primera campaña geofísica

La primera campaña se realizó entre los meses de noviembre y diciembre del 2015, después de muchos meses sin lluvias. Se ubicaron 20 puntos distribuidos en las Cuencas de Talara y Lancones. Los puntos ubicados en el área de la cuenca Talara registran la presencia de mayores espesores de arena de origen eólico, con intercalaciones de limos y arcillas que originan cambios en los valores de resistividad. A continuación se muestran los resultados obtenidos en tres de los veinte puntos analizados.

Punto A

En la Figura N°4, se tienen los valores de resistividad aparente medida y calcula, y el perfil geoelectrico del punto A, ubicado en la carretera Piura-Paita. Los mayores valores de resistividad de 78 Ohm-m, se presentan cerca de la superficie interpretándose como arenas sueltas sin compactación, a mayor profundidad se ubica una discordancia que puede estar relacionada con remanentes del Tablazo Talara; los colores verdes indican los espesores de arenas limosas, con intercalaciones de arcillas que se presentan con anomalías de color azul y tienen los valores menores de resistividad que van de 1 a 5 Ohm-m.

Figura 4. Tomografía geoelectrica del Punto A.

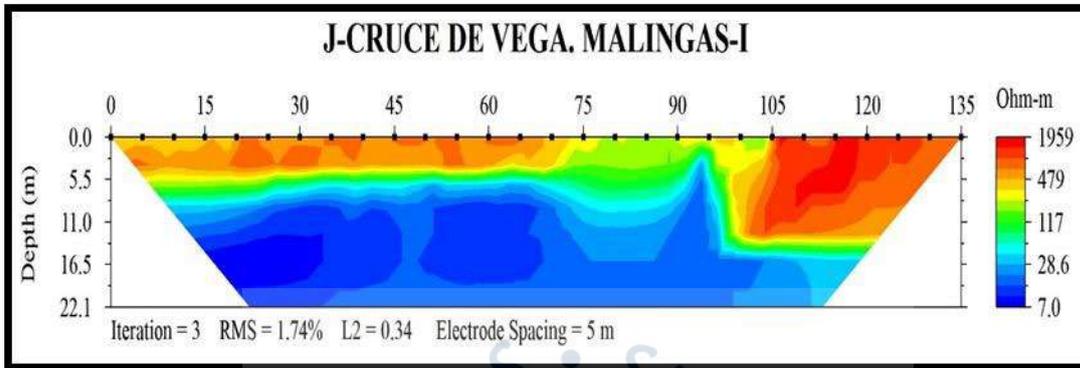


Punto J

En la figura N°5, se obtuvo un perfil de menor profundidad con estratos casi horizontales en el subsuelo, el punto J, se ubica en el sector Malingas y se ubica en la cuenca Lancones, se conforma por depósitos fluvioaluviales con materiales tipo gravas, arenas y limos. Los mayores valores de resistividad se interpretan con la presencia de gravas y arenas

semiconsolidadas, los menores valores que se extienden a mayor profundidad con resistividades de 7 a 28 Ohm-m, indican la presencia de materiales saturados de mayor porosidad y permeabilidad.

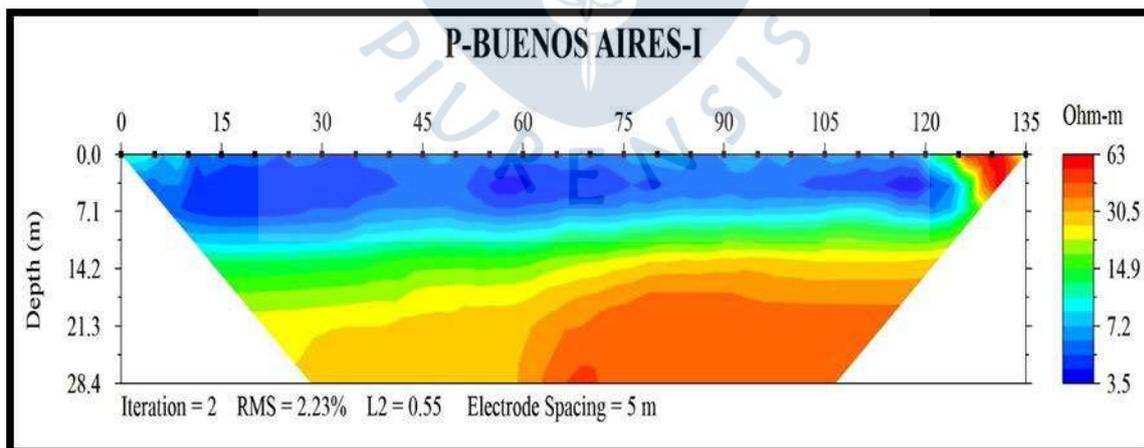
Figura 5. Tomografía geoelectrica del Punto J.



Punto P

El punto P, ubicado en el distrito de Buenos Aires, la geología de la zona se representa por formaciones del paleozoico hasta el cuaternario reciente, la ubicación de los electrodos se desarrolló en áreas de depósitos aluviales, indicando un perfil de horizontes horizontales con altas propiedades de almacenamiento, la capa más cerca de la superficie indica los valores más bajos de resistividad interpretando una mayor saturación de poros que se extiende los 20 metros de profundidad. Esta capa presenta los mayores valores de conductividad en todo el perfil.

Figura 6. Tomografía geoelectrica del Punto A.



3.5.2 Segunda campaña geofísica

El trabajo de campo se desarrolló durante los meses de julio y agosto; los terrenos se encontraron muy compactos y con presencia de grietas debido a la pérdida de

humedad y presencia escasa de lluvias. En la mayoría de los puntos se ha utilizado agua para mejorar el paso de la corriente.

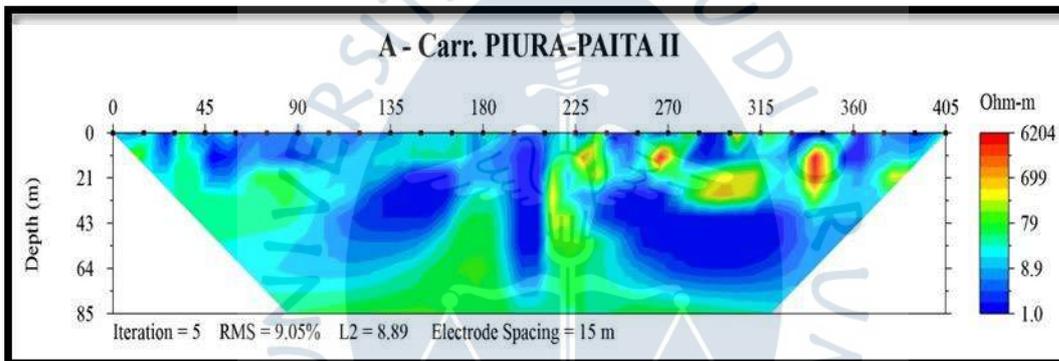
A continuación mostramos los resultados obtenidos de tres de los veinte puntos analizados.

Punto A:

La zona de estudio presenta depósitos eólicos que se encuentran cubriendo parte del tablazo Talara, la aplicación de sondajes se realizó a 200 metros de la carretera Piura – Paita, en áreas pertenecientes a la comunidad de Catacaos. En algunas áreas de la zona es posible encontrar abundante material de calcáreo que ha sido posible su extracción para fines industriales, el relieve constantemente está siendo modelado por la acción del viento que trae diferente tipo de materiales finos y son depositados cerca del lugar.

La distribución de electrodos en el punto A, se ubicaron a menor distancia disminuyendo la profundidad de exploración (85 m.), la imagen de resistividades presenta una mayor intercalación de arcillas con espesores variables y valores de 1 – 12 Ohm-m.

Figura 7. Tomografía geoelectrica del Punto A II.

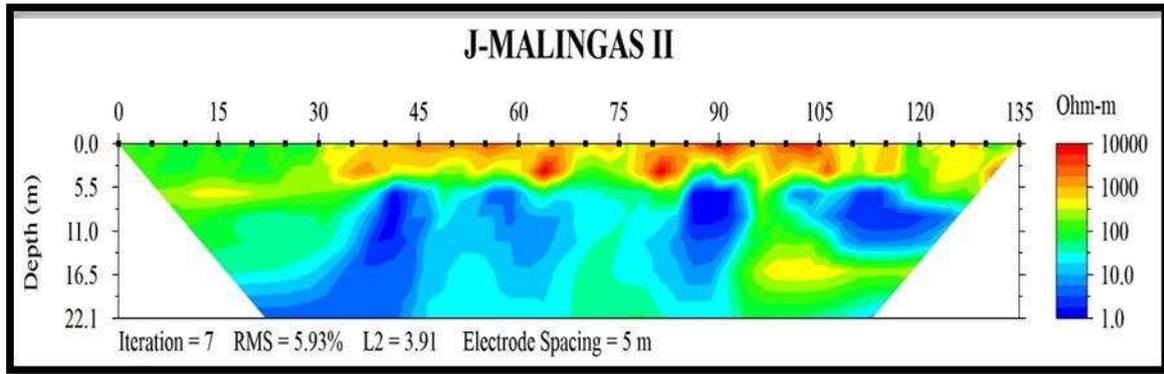


Punto J:

En los últimos años, las áreas de terreno sin cultivar ya fueron ocupadas y se encuentran en producción, a diferencia de otros puntos de estudio que aún se encuentran sin ser cultivadas. Para la ubicación del punto de estudio J, se solicitó permiso para ingresar a una parcela, ubicada a 100 metros de la carretera Tambogrande-Chulucanas, a pocos metros de la quebrada San Francisco. A diferencia del primer estudio, los cables fueron ubicados en sentido vertical, formando una "T". Los cables pasan por canales de regadío; sembríos de mango y plátano.

En la figura N°8, la profundidad de estudio es igual a la primera fase, la tomografía geoelectrica presenta anomalías con valores de 1 a 10 Ohm-m. con menor espesor a diferencia del primer sondeo.

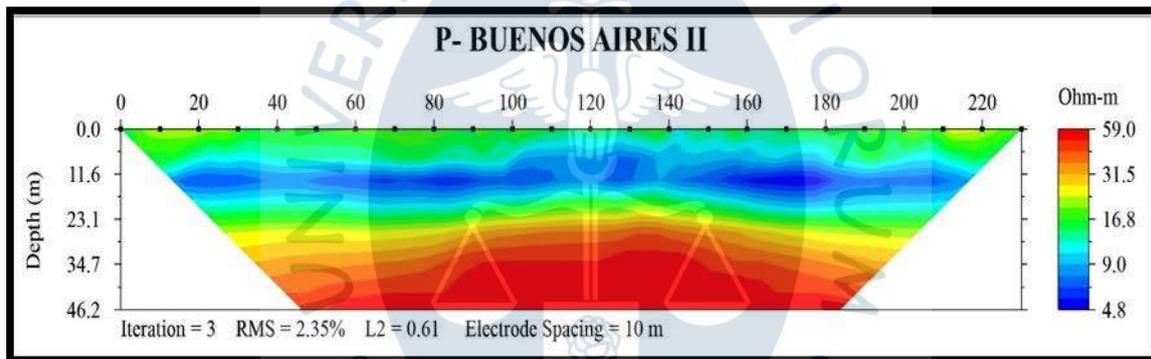
Figura 8. Tomografía geoelectrica del Punto J II.



Punto P

En la figura N°9, el perfil geoelectrico presenta mayor profundidad de estudio, la disposición de capas horizontales confirman la presencia de materiales fluvioaluviales con diferentes características físicas, litológicas y químicas.

Figura 9. Tomografía geoelectrica del Punto P II.



Conclusiones

Las imágenes de resistividad 2D representan una herramienta importante para la exploración de aguas subterráneas, identificando estructuras y cambios litológicos en profundidad. La interpretación de los resultados se realiza luego del procesamiento de inversión.

De acuerdo a los resultados obtenidos, en el sector de Morropón y Chulucanas se observan los estratos de menor resistividad muy cerca de la superficie a diferencia de los otros sectores de investigación.

Debido a la escasa presencia de lluvias no se pudo obtener una clara variación de la formación acuífera después de un periodo seco y de un periodo lluvioso. Actualmente se ha propuesto al Fincyt realizar una tercera campaña de campo, ya que se ha tenido un periodo de fuertes lluvias en el presente año.

En cada punto de investigación, las imágenes de resistividad muestran valores menores de coloración azul que se pueden correlacionar con estratos de arcillas en el caso de la cuenca Talara, a diferencia del resto de puntos donde se interpretan con la presencia de poros saturados, dando origen a un tipo de acuífero poroso no consolidado.

El uso de métodos geoelectrónicos junto con el conocimiento geológico de la zona, resulta ser una técnica de menor costo y no destructiva para lograr la identificación y ubicación de estratos acuíferos. La profundidad y precisión de los resultados obtenidos dependerá de la configuración que se emplee, así como de la cantidad y espaciado entre electrodos.

Agradecimiento

Este proyecto se realizó con el apoyo de Innóvate Perú a través del proyecto 395-PNICPPIAP-2014 desarrollado por la Universidad de Piura.

Referencias Bibliográficas

- Auken, E., Pellerin, L., Christensen, N. B., & Sørensen, K. (2006). A survey of current trends in near-surface. *Geophysics*, 71, 206-249.
- Benavent, I., Castillo, W., Farías de Reyes, M., Chávez, A., Távara, C., Alcas, J., & DunínBorkowski, M. (2009). Hidrología Isotópica para Optimizar la Gestión de los Recursos. *IAEA-TECDOC-1611*, 160-173.
- Griffiths, D., & Barcker, R. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling. *Journal of Applied Geophysic*, 29, 211-226.
- Guzman Martínez, A. (1994). Estudio geodinámico del a Cuenca del Río Piura, *INGEMMET*, Lima.
- Lugo, E., Playa, E., & Rivero, L. (2008). Aplicación de la tomografía eléctrica a la prospección, *Geogaceta*, 44, 223-226.
- Vílchez Mata, M., Luque Poma, G., & Rosado Seminario, M. (2013). *Riesgo Geológico en la Región Piura*, Boletín 52 INGEMMET, Lima.

Conclusiones

Las imágenes de resistividad 2D representan una herramienta importante para la exploración de aguas subterráneas, identificando estructuras y cambios litológicos en profundidad. La interpretación de los resultados se realiza luego del procesamiento de inversión.

El uso de métodos geoelectrónicos junto con el conocimiento geológico de la zona, resulta ser una técnica de menor costo y no destructiva para lograr la identificación y ubicación de estratos acuíferos. La profundidad y precisión de los resultados obtenidos dependerá de la configuración que se emplee, así como de la cantidad y espaciamiento entre electrodos.

De acuerdo a los resultados obtenidos, en el sector de Morropón y Chulucanas se observan los estratos de menor resistividad muy cerca de la superficie a diferencia de los otros sectores de investigación.

En cada punto de investigación, las imágenes de resistividad muestran valores menores de coloración azul que se pueden correlacionar con estratos de arcillas en el caso de la cuenca Talara, a diferencia del resto de puntos donde se interpretan con la presencia de poros saturados, dando origen a un tipo de acuífero poroso no consolidado.

En los puntos ubicados en los sectores de Sullana, se ha podido observar, a través de las secciones; que las capas de arcillas se encuentran con mayor índice de humedad

Los perfiles geoelectrónicos han logrado determinar la variación de los niveles freáticos según las estaciones y factores litológicos, pues se observa una variación de los mismos, según la presencia o escasez de lluvia, y dependiendo del tipo de suelo.

La interacción agua-suelo, se presentan a mayor escala en las épocas de lluvia donde el nivel freático llega a niveles muy cerca de la superficie, alterando los minerales del suelo en porcentajes de sodio y sales, causando problemas en los sembríos.



Recomendaciones

Esta investigación, podría servir como punto de partida para lograr la optimización del uso del suelo, y por tanto, obtener mayores rendimientos en los cultivos. Conocer la variabilidad de las propiedades del suelo, es un factor de gran interés, puesto que realizando un manejo adecuado de las mismas, sería posible lograr la reducción de costes de producción, aprovechándose mejor las materias primas y el uso de maquinarias agrícolas. Todo esto sería posible aplicando métodos de prospección geofísica; correlacionando los valores obtenidos de conductividad eléctrica aparente (horizontal y vertical) del suelo, con sus propiedades y muestras extraídas con este fin. Estudios de este tipo se han realizado en diversas partes del mundo, por ejemplo en la Comarca de Terra Chá, en Galicia, España. (García-Tomillo, 2014), logrando muy buenos resultados.



Referencias bibliográficas

- AGI Advance Geosciences (18 de agosto de 2021).
<http://www.advancedgeosciences.com/index.sp.shtml>
- Auge, M. (2008). *Métodos geoeléctricos para la prospección de agua subterránea*. Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Autoridad Nacional del Agua (2 de octubre de 2020). *ANA inició el estudio hidrogeológico de los acuíferos Tumbes, Zarumilla y Casitas*. <https://www.gob.pe/institucion/ana/noticias/306712-ana-inicio-el-estudio-hidrogeologico-de-los-acuiferos-tumbes-zarumilla-y-casitas>
- Centro de Estudios y de Investigación de Obras Públicas [CEDEX], Gobierno de España, Ministerio de Fomento, Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. *Técnicas Geofísicas*. <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/C63444EB-3A5F-4346-9CE0-AF209AB125F1/132409/ENSAYOSGEOFISICOS.pdf>
- Custodio, E., Llamas, M.R. (2001) *Hidrología Subterráneas*. Segunda Edición Corregida. Ediciones Omega S.A. Barcelona, España.
- García-Tomillo, A. (2014). *Aplicación de métodos geofísicos al estudio del suelo*. Universidad La Coruña. Departamento de Química, Física. Brasil.
- Geomative (22 agosto 2021). *Instrumentos de geofísica*.
<https://www.geomative.com/GD20Electrical/20/16.html>
- GDD Instrumentation (10 de setiembre de 2021). *Equipos de geofísica*.
<https://www.gddinstrumentation.com/es/ip-receptores>
- Griffiths, D., & Barcker, R. (1993). *Two-dimensional resistivity imaging and modelling*. Journal of Applied Geophysic, 29, 211-226.
- Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (2017). *Informe final del proyecto Caracterización química de los sedimentos presentes en las zonas de expansión agroindustrial del noroeste del país; y monitoreo de su comportamiento ante el intemperismo actual y la acción hídrica*. Proyecto financiado por Innóvate Perú a través del proyecto 395-PNICP-PIAP-2004. Piura.
- Lugo, E., Playa, E., & Rivero, L. (2008). *Aplicación de la tomografía eléctrica a la prospección*. Geogaceta, 44, 223-226.

Manilla Aceves, Alfonso Alvarez (2003). *Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil*. Publicación Técnica N° 229. Sanfandila, Qro.

Shailaja, G., Laxminarayana, M., Patril, J.D., Erram, V.C., Suryawanshi, R.A. and Gautam Gupta (2005). *Efficacy of anisotropic properties in groundwater exploration form geoelectric sounding covered terrain*. Journal of Indian Geophysical Union, pp. 453-461.

Skostadinoff, J., Bjoerg E., Mogessie, A., Raniolo, A. , Alvarez, G. , Santiago, E. (2004). *Prospección geofísica del yacimiento Las Águilas, provincia de San Luis*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, pp. 121-128.

Távora, C. (2005). *Modelación hidrogeológica conceptual de un acuífero aluvial: Caso Alto Piura*. Tesis para obtener el título profesional de Ingiero Civil. Universidad de Piura. Piura.

Teikeu, W., Njandjock, P., Ndougsa-Mbarga T. and Tabod, T. (2012). *Geoelectric Investigation for Groundwater Exploration in Yaoundé Area, Cameroon*. International Journal of Geosciences, Vol. 3 No. 3, pp. 640-649.

Yajahuanca, F. (2019). *Investigación hidrogeológica con fines de aprovechamiento de recursos hídricos subterráneos en predio de la empresa Doig, sector Coscomba, distrito 26 de octubre, provincia y departamento de Piura*. Tesis para obtener el título profesional de Ingiero Civil. Universidad Nacional de Piura. Piura.

