

FACTIBILIDAD EN DETECTAR CONTAMINACION DEL SUBSUELO POR MEDIO DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA (DIPOLO-DIPOLO) Y SONDAJE ELECTRICO VERTICAL (SEV) EN LAS CERCANÍAS DE ENAP, HUALPÉN, REGION DEL BÍO BÍO

Francisca Aravena Díaz¹, A. Muñoz Jensen² y R. King St-Onge³

RESUMEN

En los últimos años se ha tratado de encontrar nuevas tecnologías para poder determinar la contaminación del ecosistema, ya sea contaminación ambiental, acústica o del suelo, es por esto que el presente estudio pretende dar una alternativa para determinar contaminación del subsuelo con métodos geoelectricos, los que permiten conocer las resistividades del terreno en estudio. Estos se realizaron en una zona con alto potencial de estar contaminada, ya que se han registrado eventos dañinos al medio ambiente provenientes de ENAP Hualpén y sumado a esto se debe considerar el impacto que el hombre ha creado sobre la zona por las distintas actividades que este realiza, también en la zona encontramos la presencia de un acuífero que posee un gran valor medioambiental. Se realizaron 6 ensayos de Dipolo-Dipolo, 3 de estos frente a esta empresa y los otros 3 frente a la costa en la parte posterior a ENAP. Sumado a los ensayos anteriores se realizó 1 ensayo de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) en un punto que presentó datos anómalos, el cual indicó la contaminación del terreno. Estos métodos se utilizaron ya que son métodos rápidos, fáciles de manipular, económicos y abarcan grandes áreas según la geometría que se desee utilizar. Cabe recalcar que estos métodos no son una base sólida para determinar la contaminación del subsuelo si no que son un complemento a los métodos más utilizados como lo son los análisis de laboratorio con muestras obtenidas en terreno o métodos magnetoteléuricos.

PALABRAS CLAVES: Contaminación, Dipolo-Dipolo, Sondeos Eléctricos Verticales.

ABSTRACT

The search for new technologies that allows the characterization of pollution in ecosystems has increased, with important inputs being developed in environmental, acoustic and soil contamination. The present study aims to provide an alternative to determine contamination of the subsoil with geoelectrical methods, which permits to know the resistivities of the terrain under study. These were carried out in an area with a high potential to be contaminated, since events from ENAP Hualpén has been well documented, an addition to the impact created by the humans on the area due to the different activities and also the presence of an aquifer that has a great environmental value, Six Dipole-Dipole tests were carried out, three of them in front of this company and the other three in front of the coast in the back part of ENAP. In addition, a Vertical Electrical Sounding (VES) test was conducted at a point that presented anomalous values, which indicated the contamination of the ground These methods were used because they are quick, easy to manipulate and economical, as well as covering large areas according to the geometry used. It should be emphasized that these methods are not a solid basis for determining the contamination of the subsoil, but they are a complement to the most common methods used like laboratory analysis with samples obtained in the field or magnetotelluric methods.

KEYWORDS: Pollution, Dipole-dipole, Vertical Electrical Surveys

¹ Francisca Aravena Díaz, Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción. CHILE, faravenad@ing.ucsc.cl

² Alejandra Muñoz Jensen, EMGG TerraData Ltda., CHILE, terradata.chile@gmail.cl

³ Robert Wallace King St-Onge, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Concepción, CHILE. rking@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los países el desarrollo industrial, específicamente la producción y refinación de petróleo, viene acompañado de la contaminación en distintas áreas, siendo las más importantes las zonas urbanas y ambientales. Esta contaminación se debe principalmente por la exploración, explotación, derrames, transporte y distribución de la materia prima que se está produciendo. Debido a esto, en los últimos años se ha aumentado el interés por los estudios de impacto ambiental que provocan las industrias, específicamente de hidrocarburo.

En la región del Bío Bío, en la comuna de Hualpén se encuentra una de las empresas refinadoras de crudo más importante a nivel nacional, la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP), la cual a lo largo de los años ha sido cada vez más cuestionada por el nivel de contaminación que provoca en la comuna, ya sea por la liberación de material particulado o por los derrames de crudo que ha tenido.

Uno de los peores derrames que ha tenido el país y esta empresa en los últimos 20 años, ocurrió el 25 de mayo de 2007 en la bahía de San Vicente, provocado por una rotura del ducto submarino denominado línea n1 del terminal B del puerto San Vicente mientras se descargaba petróleo desde la nave “New Constellation”. Este derrame ocurrió durante 47 minutos y tuvo una razón de vertimiento de 9000 litros por minuto y ENAP se percató debido a que terceros se encontraban trabajando en una pesquera del sector (El mostrador, 2017). Para solucionar este problema se utilizó tecnología de biosolventes para la limpieza de la bahía, pero tuvo un 95 % de eficacia, quedando un 5 % de contaminación de este crudo en la bahía (ENAP, 2007). Se cree que, debido a las corrientes marinas, una parte del crudo que permaneció en el mar pudo trasladarse a las costas de Hualpén y contaminar parte de la superficie o subsuelo de esta comuna. Fue tanto el daño causado por esta empresa que el Consejo de Defensa del Estado (CDE) a través de la fiscalía presentó una demanda indemnizatoria en contra de la refinería (El mostrador, 2017).

En el año 2014, seis personas, cinco adultos y un menor de 9 años, sufrieron intoxicación por gases de azufre debido a una falla en la unidad recuperadora de azufre de la refinería ENAP, Bío Bío. Los afectados debieron ser trasladados por personal de ambulancia ya que resultaron con graves complicaciones respiratorias (Emol, 2014).

A estos eventos se suman muchos otros que han tenido un impacto negativo en el medioambiente. Por estos antecedentes se cree que las zonas aledañas de la empresa tienen una alta probabilidad de tener contaminación. Además, debido al propio proceso de refinería, se libera una gran cantidad de material particulado que contiene elementos que son dañinos para los seres vivos. Este material puede caer en la superficie y mezclarse con agua lluvia y según las condiciones del suelo, podría infiltrarse en el terreno llegando incluso a contaminar la napa subterránea.

Según un estudio de Bezama et al (2007) donde se determinó la vulnerabilidad de la región del Bío-Bío, se mostró un mapa, según distintos factores, ya sea vida salvaje, agua subterránea, sitios contaminados por comunidad, etc. En este se muestra que el área de Hualpén y Talcahuano son las comunas que presentan más alta vulnerabilidad a tener contaminación, como lo indica la Figura 1.

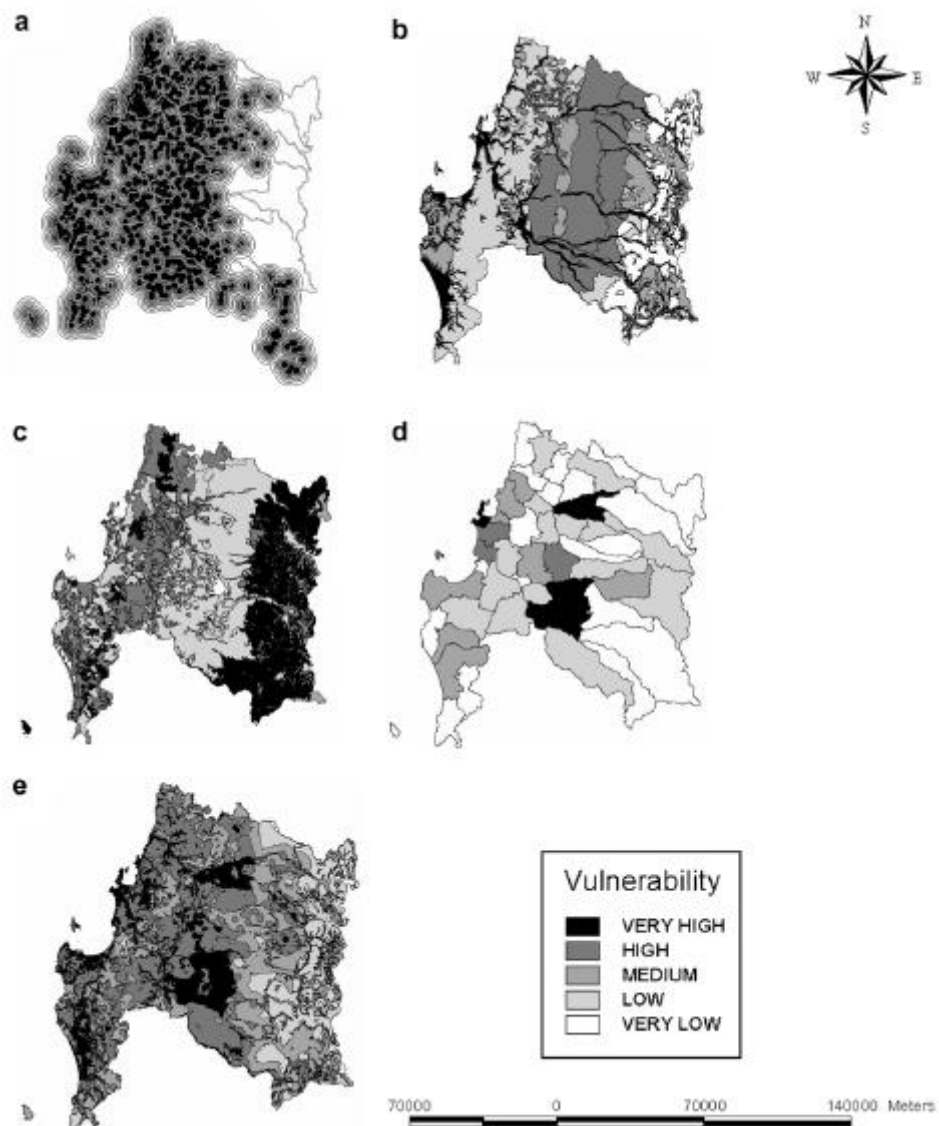


Figura 1: Mapa de vulnerabilidad de la Región del Bío Bío. (a) distancia a áreas populares, (b) vulnerabilidad vida salvaje, (c) vulnerabilidad agua subterránea, (d) número de sitios contaminados por comuna, y (e) Vulnerabilidad total como resultado de una imagen por medio de procesos algebraicos. Extraído de Bezama et al., 2007

El agua dulce es un bien escaso, de hecho, el 97,5 % del agua disponible en el planeta es salada, solo el 2,5% restante es agua dulce la que a medida que pasa el tiempo ha ido disminuyendo en calidad y cantidad debido al uso antrópico (Perspectiva del Medio Ambiente Mundial, 2007). Es conocido que la principal reserva de agua dulce proviene de los glaciares, pero lo que es ignorado por gran parte de la humanidad es que la segunda reserva de agua dulce es la que se encuentra bajo nuestros pies. Se trata del agua subterránea, una reserva que al ser estudiada y bajo la aplicación de ciertos protocolos, como por ejemplo un constante monitoreo del nivel freático por medio de pozos o zanjas, podría llegar a ser una opción a futuro para el consumo humano por lo que se hace necesario su protección ya sea frente a distintos contaminantes o a su extracción indiscriminada.

También hay un aumento en la contaminación del suelo ya sea por pesticidas, basura tirada por los mismos seres humanos o por empresas industriales, según el informe país (2016) desde el año 2015 se presentan cada vez más territorios erosionados y más suelos en proceso de agotamiento debido a la actividad que se realiza sobre estos. Debido a lo anterior es que se necesitan nuevas tecnologías no invasivas, más rápidas y de menor costo para determinar si existe o no contaminación, para luego tomar las medidas de mitigación correspondientes.

El área de este estudio se concentra en las cercanías de la empresa ENAP, ya que existe una probabilidad de que la contaminación de la refinería del petróleo y otro tipo de material particulado podría haber alcanzado el subsuelo y a su vez el agua que se encuentra en él, la cual en algún momento podría ser explotada por las comunidades de la zona.

En el presente trabajo se busca determinar la factibilidad en detectar si existe contaminación del subsuelo en las cercanías de la empresa ENAP, Hualpén, por medio de tomografía eléctrica utilizando la configuración Dipolo-Dipolo. También se usa sondajes eléctricos verticales, ya que este es más sensible a los cambios verticales de los estratos, lo que permitirá determinar con más precisión la presencia de algún contaminante.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Resistividad

La resistividad eléctrica del suelo es la medida de la capacidad que tiene este, de limitar el paso de la corriente eléctrica. Los métodos de resistividad se realizan por distintas mediciones en la superficie y estudian la distribución en profundidad de alguna magnitud eléctrica de los materiales que componen el suelo. Estos métodos emplean una fuente artificial de corriente la cual es introducida en la tierra a través de electrodos (Weinzettel et al, 2009). La medición de la diferencia de potencial eléctrico en la vecindad del flujo de corriente, así como también la corriente inyectada, hacen posible determinar la resistividad aparente del subsuelo (Telford et al., 1990). La resistividad aparente (ρ_a) es una medición individual que se asocia al punto inmediatamente debajo del centro del arreglo empleado y es utilizada para medios heterogéneos (Weinzettel et al. 2009). La relación entre la resistividad aparente y la resistividad “real” es muy compleja, por lo que se requieren procesos de inversión de los valores de resistividad aparente medidos, con uso de software específico (Loke, 2004). Para el método Dipolo-Dipolo se utiliza el software Res2dInv de Geotomo y para la geometría Schlumberger es común utilizar IPI2win de Geoscan.

La resistividad eléctrica del terreno se relaciona con varios parámetros, como el origen de la roca o suelo, la temperatura, su composición, tipo de rocas y suelos, porosidad, forma de los poros y el contenido de agua (Loke, 2004). Esto ayuda también a conocer las propiedades físicas del terreno que está siendo estudiado.

Los métodos más utilizados para encontrar las resistividades de los estratos de suelos y/o rocas son la tomografía eléctrica y los sondeos eléctricos verticales. El primero es un método de resistividad multielectrónico basado en la modelización 2-D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas. El segundo método, los sondeos eléctricos verticales, consisten en inyectar corriente eléctrica al terreno, lo que irá creando un campo eléctrico, luego se medirá su magnitud, ósea el voltaje. Su objetivo es mostrar una distribución vertical de las resistividades aparentes del suelo bajo el punto de sondeo (Daza, 2012). Uno de los arreglos más utilizados para realizar la tomografía eléctrica, es el de Dipolo-Dipolo, y para los sondajes eléctricos verticales es la geometría Schlumberger.

2.1.1 Método Dipolo-Dipolo

Este arreglo es utilizado cuando se desea conocer, a través de mediciones de resistividad, la variación de una formación geológica, como estratos de suelos y/o rocas, ubicación de acuíferos, etc. (Daza, 2012). Las variantes para realizar este ensayo se ven conforme a las condiciones del terreno. El arreglo Dipolo-Dipolo consta de cuatro electrodos agrupados en dos: los de potencial y los de corriente (Figura 2).

La profundidad prospectada se determina una vez realizado el ensayo, cuando se realiza la inversión del terreno en el software (Res2dInv). Esta profundidad se calcula interceptando las rectas que pasan por el centro de cada electrodo en un ángulo de 45° con respecto a la horizontal (Daza, 2012), (Figura 2).

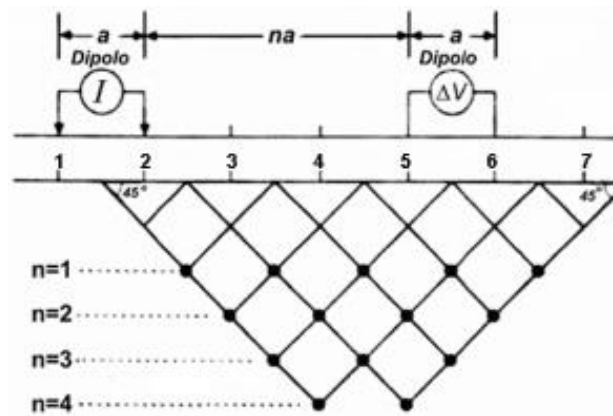


Figura 2: Profundidad alcanzada con Dipolo-Dipolo conforme se alejan los electrodos en pares. (Daza, 2012).

Para determinar la resistividad aparente del suelo estudiado se debe medir la intensidad de la corriente eléctrica inyectada (I) y el potencial ΔV y luego se introducen en la expresión 1.

$$\rho_a = \pi \cdot n(n + 1)(n + 2) \cdot a \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Donde:

- a: Espaciamiento de los electrodos (m)
- n: Factor de espaciamiento
- ΔV : Diferencia entre potencial espontaneo y voltaje (mV)
- I: Intensidad de corriente eléctrica inyectada (mA)
- ρ_a : Resistividad aparente (Ωm)

2.1.2 Método Schlumberger.

El arreglo más utilizado en estos sondeos eléctricos verticales es el Schlumberger, el cual consiste en ubicar los electrodos de corriente en cada extremo del arreglo y los electrodos de voltaje en el centro, equidistantes al punto de interés a medir (Figura 3).

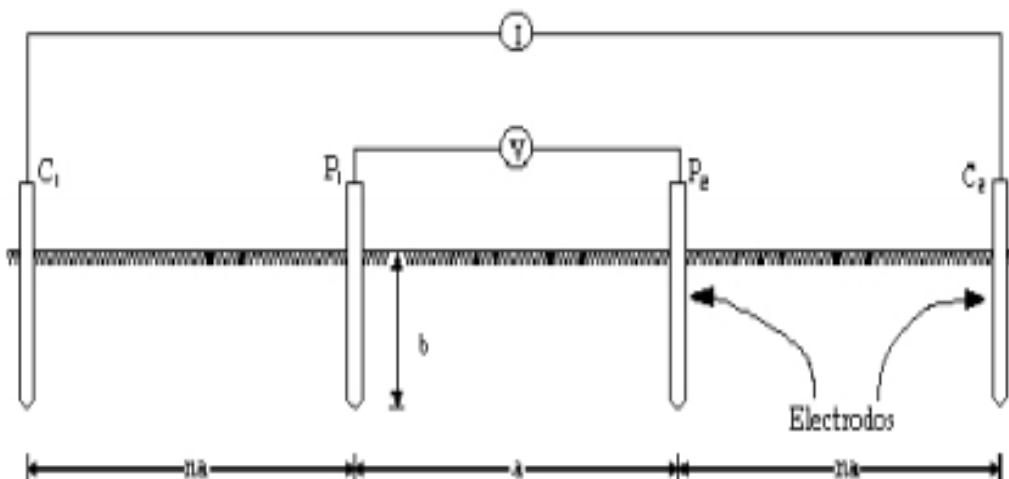


Figura 3: Esquema configuración de Schlumberger. (Weinzettel, 2009)

El método consiste en separar progresivamente los electrodos alrededor de un punto central permanente para así ir alcanzando una mayor profundidad. La resistividad aparente con este método se determina utilizando la ecuación (2).

$$\rho_a = 2 \cdot \pi \cdot (n + 1) \cdot na \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

Donde:

- a: Espaciamiento de los electrodos (m)
- n: Factor de espaciamiento.
- ΔV : Variación de voltaje (mv).
- I: Intensidad de corriente eléctrica inyecta (mA)
- ρ_a : Resistividad aparente (Ωm)

El arreglo Schlumberger tiene un mayor alcance de profundidad y es menos susceptible a irregularidades de la resistividad superficial (Jiracek, 1981). Para realizar el análisis de las resistividades aparentes obtenidas con este arreglo se utiliza un software que muestra una visión 1D de la resistividad del punto que se estudia.

2.2 Zona de estudio

El lugar de estudio se encuentra sobre una zona que podría tener un valor muy importante dentro de uno años, el acuífero Talcahuano, ubicado entre la cuenca Itata y Biobío (Figura 4). En la actualidad no se cuenta con mucha información sobre el acuífero debido a que no se han realizado mayores sondajes de exploración. No obstante, se sabe que la profundidad a la que se encuentra es próxima a los 10 metros y se trata de un acuífero detrítico (limos y arenas) (DGA, 2013).

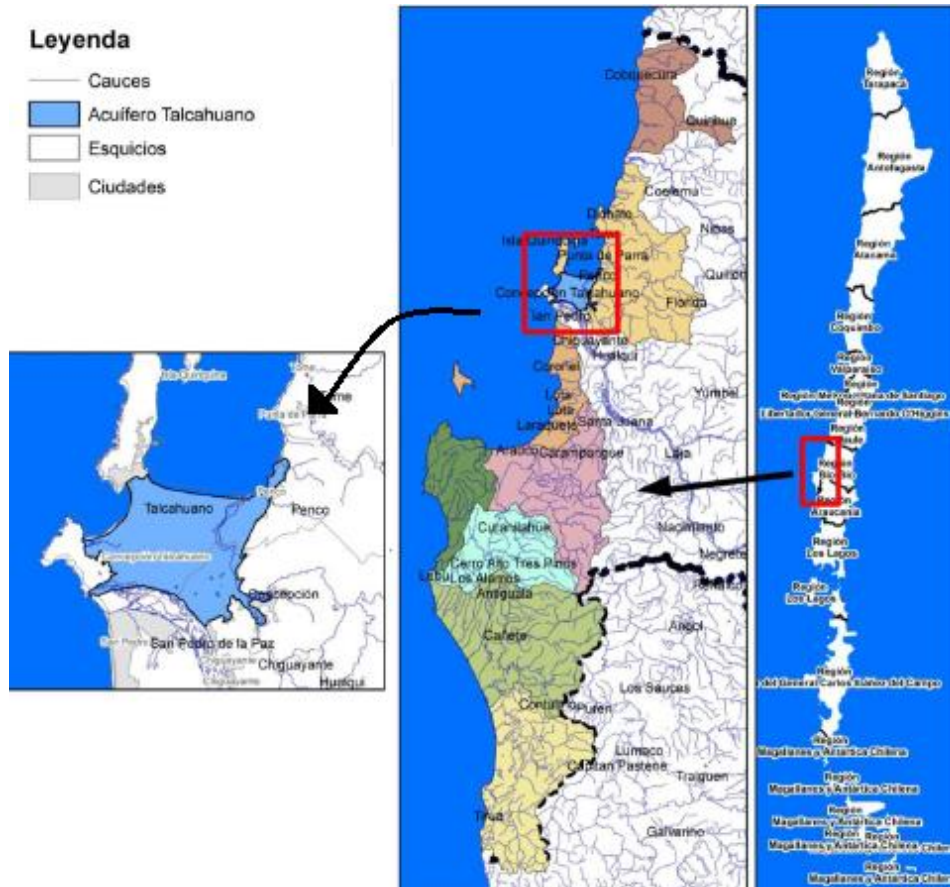


Figura 4: Acuífero de Talcahuano. (Modificado de DGA, 2013).

2.3 Ubicación

La zona de estudio se encuentra en las afueras de la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP). La empresa se encuentra comprendida entre los $36^{\circ}46'53.76''$ - $36^{\circ}46'38.17''$ latitud S y $73^{\circ}7'3.16''$ - $73^{\circ}7'53.56''$ longitud W, en la localidad de Hualpén, una comuna de Concepción, Región del Biobío, Chile, y cubre un área de 2 km² aproximadamente (Figura 5).



Figura 5: Zonas de estudio mapa extraído de Google Earth. (elaboración propia)

2.4 Geología

La geología de la región del Biobío, presenta rocas ígneas, intrusivas, sedimentarias clásticas y depósitos no consolidados. Las unidades presentes en la región se muestran en la Figura 6, según sus edades y además se ve el tipo de contacto entre cada una de estas.

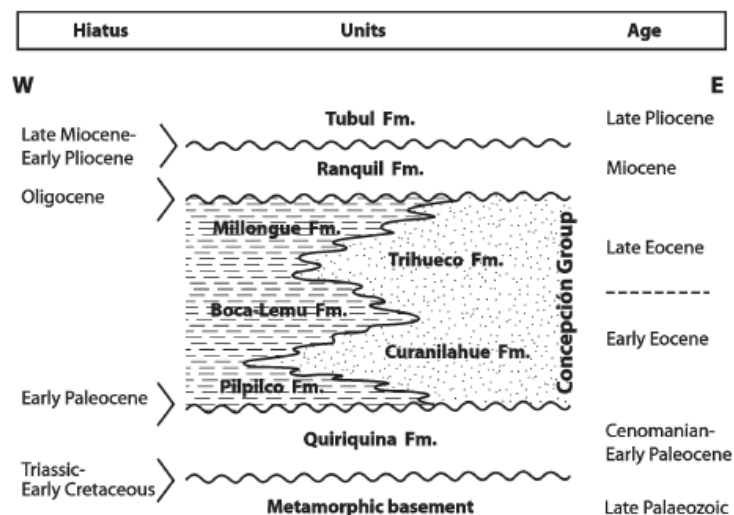


Figura 6. Unidades geológicas presentes en la región del Biobío. (Charrier et al., 2007)

El Basamento Metamórfico o basamento se compone de 2 unidades, las rocas metamórficas y rocas intrusivas. Las rocas metamórficas han sido agrupadas por Veyl (1961) en una gran unidad llamada “Basamento

Metamórfico” que se presenta en el sector occidental de la cordillera de la costa al norte de la región del Bío Bío y con un mayor desarrollo al sur (cordillera de Nahuelbuta y cordillera de la costa en la IX y X región) (Quezada, 1996). Estas rocas tendrían edades del Paleozoico y posiblemente Cámbrico (Galli, 1967). Aguirre et al en 1972 separan este basamento metamórfico en dos series; la primera es la serie Oriental compuesta por filitas, rocas córneas; y la serie Occidental compuesta por metabasitas, metachert y micaesquistos. La segunda unidad, rocas intrusivas correspondientes a un batolito que contiene rocas graníticas con distribución regional en la cordillera de la costa de la VIII región (Quezada, 1995). El Batolito de la Costa engloba a granitos, tonalitas, granodioritas que intruyen a las rocas metamórficas (Hervé et al., 1976). La edad de este batolito según Ruiz (1992) sería Ordovícico-Pérmico.

Sobre el basamento cristalino encontramos la Formación Quiriquina (Paleoceno temprano), la cual comprende una secuencia sedimentaria de origen marino y con alto contenido fosilífero (baculites, trigonia y pelecípodos). Esta formación se encuentra en forma discordante con las rocas del basamento metamórfico.

La Formación Curanilahue (Eoceno temprano) descansa “pseudoconcordante” sobre la Formación Quiriquina, y está compuesta por sedimentos continentales con algunas intercalaciones marinas y con importantes mantos de carbón, ubicados principalmente en el golfo de Arauco (Quezada, 1995). Luego encontramos la Formación Trihueco, del Eoceno tardío, con secuencias constituidas por areniscas arcillosas de grano fino a grueso, además presenta intercalaciones con lutitas carbonosas y mantos de carbón (Quezada, 1995).

La Formación Millongue (Eoceno tardío) conforma una secuencia compuesta por un conglomerado basal, sobre el cual se disponen areniscas verdes de grano grueso a fina y arcillas (Quezada, 1995). Sobre esta se encuentra la Formación Ranquil, de edad Mioceno, y consiste de conglomerados, areniscas y arcillolitas, dispuesta en discordancia angular sobre las diferentes formaciones del Eoceno (Pineda, 1983). Finalmente se encuentra la Formación Tubul, (Plioceno), la cual se emplaza de forma discordante sobre las unidades del Eoceno y Mioceno, aquí se encuentran arenas y areniscas poco cementadas y con abundantes fósiles marinos

La zona de estudio se encuentra ubicada en una cuenca costera y se caracteriza por estar compuesta por unidades antiguas (Paleozoico) las cuales están cubiertas por una serie de formaciones sedimentarias Miocenas las cuales tienen origen principalmente marino, el relleno consta de depósitos fluviales de los cauces actuales de esteros, ríos y depósitos litorales (DGA, 2013), como se puede observar en la Figura 7.

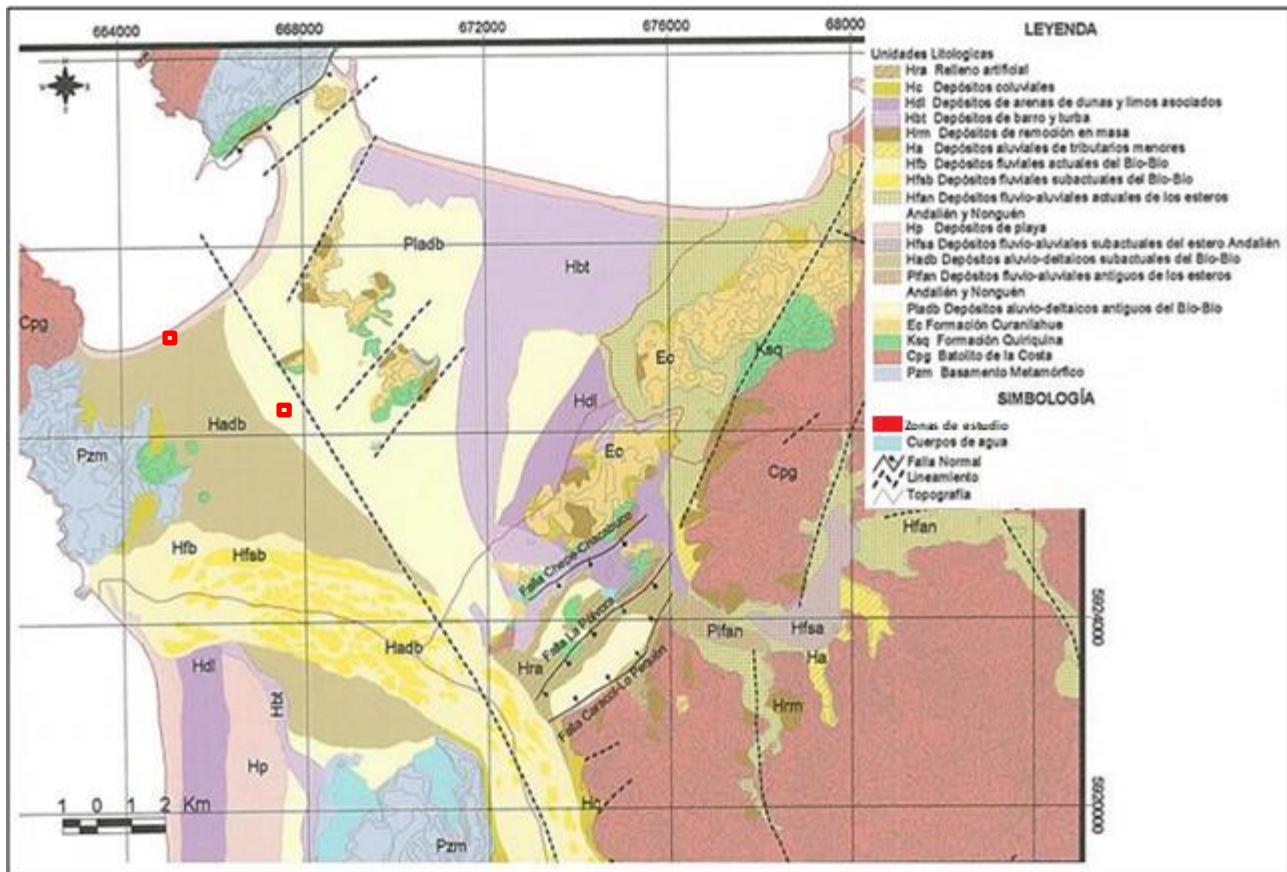


Figura 7: Mapa geológico de la zona estudio, Extraído de Galli, 1967.

Ambos lugares donde se realizaron las mediciones se pueden observar en el mapa de la Figura 7, la presencia de depósitos no consolidados, los que se pueden diferenciar en dos grupos; depósitos aluvio-deltaicos antiguos del Bío Bío y por otro lado los depósitos litorales o depósitos de playa. El primero se constituye de material detrítico transportado por un río y que fue depositado a lo largo de su llanura de inundación, generalmente se encuentran arenas y gravas. Se estima que la edad de estos depósitos corresponde al periodo Pleistoceno-Holoceno (Galli, 1967).

Por otro lado, los depósitos litorales, corresponden a suelos formados por sedimentos no consolidados de baja compactación y que se encuentran saturados de agua. Se tratan principalmente de arenas depositadas en ambientes fluviales, eólicos, litorales y en menor medida aluviales, a diferencia de los anteriores (Falcon et al., 2010) en el subsuelo de la zona de estudio se encuentra el Acuífero Talcahuano, el cual tiene un comportamiento detrítico con comportamiento libre además de tener régimen natural sin afección de bombeo. Este acuífero al norte tiene un límite abierto con la costa (bahía de Talcahuano) donde parece no existir flujo subterráneo de agua dulce hacia el mar; Al oeste también se presenta un límite abierto donde se produce una salida de agua dulce hacia el mar. Por el este, se encuentra limitado por afloramientos del basamento, el cual es impermeable con entrada de aguas subsuperficiales que vienen desde quebradas y esteros y finalmente al sur el acuífero se conecta con el cauce del río Biobío. Todo lo anterior se puede encontrar en el estudio de la DGA en el año 2013

2.5 Resistividades en materiales

La resistividad es una de las propiedades físicas con mayor variabilidad en la prospección geofísica, dado que varía según la presencia de las distintas propiedades de la roca o suelo, por ejemplo, la porosidad, fracturamiento, diaclasa, karst, entre otros (Daza, 2012). Estos afectan considerablemente el comportamiento de un perfil de resistividad ya que favorecen el flujo de fluidos o permiten el relleno de distintos tipos de sedimentos. Es debido a lo anterior que no se debe hablar de un valor fijo para cada roca o suelo, sino de un rango de valores. En la Figura 8 se observa los rangos de valores de resistividades fijas para diferentes tipos de materiales, como rocas y tipos de agua (dulce, salada o salobre). Con estos valores es posible comparar los

datos obtenidos y se observa si hay variación significativa de la resistividad; Si el terreno muestra variación es posible que se deba a que se encuentra alterado con algún agente externo, por lo que es necesario tener en cuenta que para la interpretación de datos obtenidos debe existir una relación coherente entre los antecedentes geológicos y las mediciones geofísicas aplicadas.

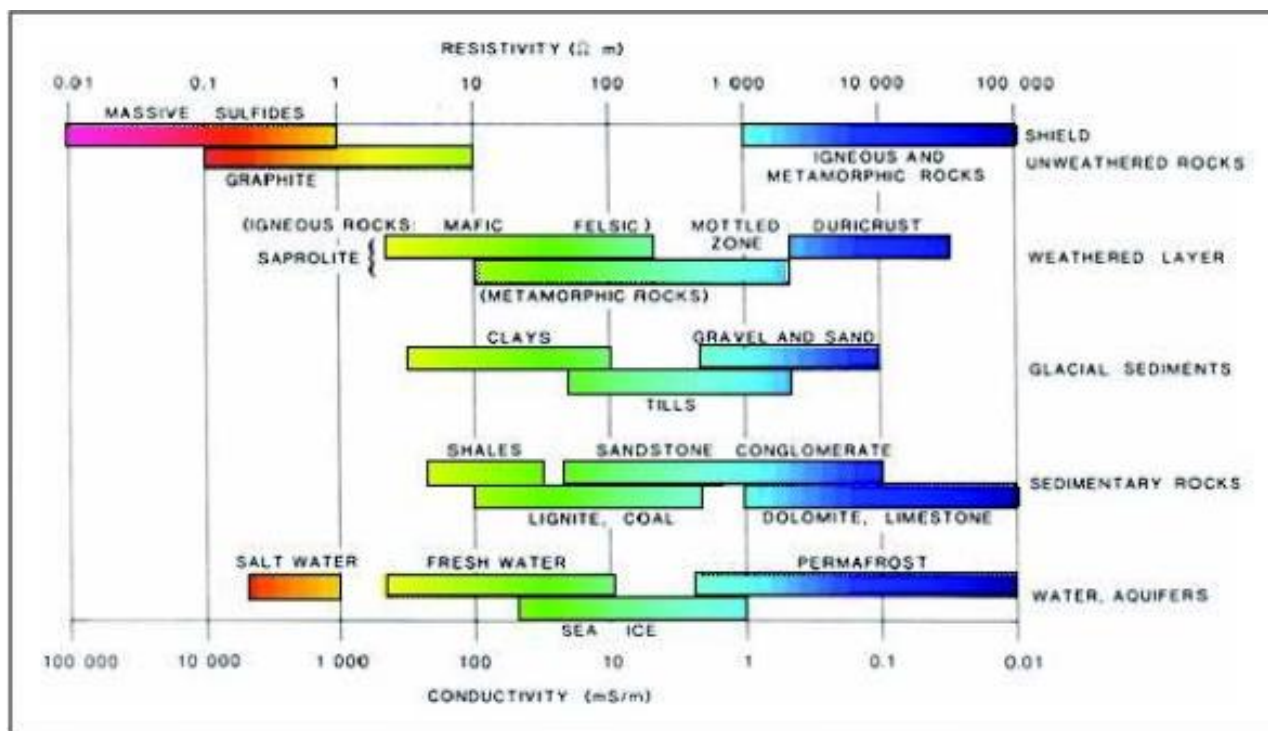


Figura 8: Rango de resistividad de distintos materiales sólidos y líquidos. (modificado de Palacky, 1988).

Debido a que el estudio se realizó a las afueras de la empresa ENAP, se esperaba encontrar presencia de contaminación por hidrocarburos debido a los eventos que se nombraron anteriormente. El comportamiento de los contaminantes orgánicos está en función de sus características químicas y físicas (densidad, polaridad, entre otras). Sin embargo, las características del suelo o roca toman un papel importante en la manera en cómo el hidrocarburo viaja a través de este. La permeabilidad, transmisibilidad, tamaño de grano, profundidad del nivel freático son alguna de estas características.

Según Shevnin (2006) la diferencia entre las áreas contaminadas y circundantes depende de la edad del derrame. Las anomalías que presenten alta resistividad en el subsuelo son aquellas donde el derrame es más reciente. No así, cuando los valores anómalos de baja resistividad corresponderían a zonas contaminadas desde hace mínimo tres meses de antigüedad, considerándose como derrames maduros (Shevnin, 2006).

3. METODOLOGÍA

3.1 Etapa de pre-terreno

Consistió en realizar una recopilación de distintos estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, presente en las cercanías de la empresa ENAP y sus alrededores para comprender las características del terreno y tener una idea de los valores de resistividad que se encontrarían en la zona.

Se realizó una recopilación de diversas fuentes bibliográficas de geofísica sobre el método de tomografía eléctrica, utilizando la geometría Dipolo-Dipolo. Además, se estudió el método de sondajes eléctricos verticales (SEV), en caso de encontrar datos anómalos que no coinciden con la geología del lugar.

3.2 Etapa de Terreno

Se realizaron dos salidas de terrenos, el primero se realizó al frente de ENAP, donde se encuentran viviendas (Figura 9A) y el segundo se realizó en la parte posterior de esta empresa, frente a la costa (camino a Lengua) (Figura 9B). Para ambos sectores se realizaron tomografías eléctricas, para determinar si es posible encontrar algún tipo de contaminación.

Para la zona de estudio 1 (frente de ENAP) se realizó un perfil N-S de 100 metros de longitud y 2 perfiles (paralelos entre sí) de 42 metros con una dirección E-W con la configuración Dipolo-Dipolo, como se ve en la Figura 9A. Además de esto se realizó un perfil SEV en el punto medio del perfil C Dipolo-Dipolo como se ve en la Figura 8A.

Para la zona de estudio 2 (frente a la costa, camino a Lengua) también consiste en un perfil de 100 metros de longitud y 2 perfiles más pequeños de 42 metros con el arreglo Dipolo-Dipolo (Figura 9B).

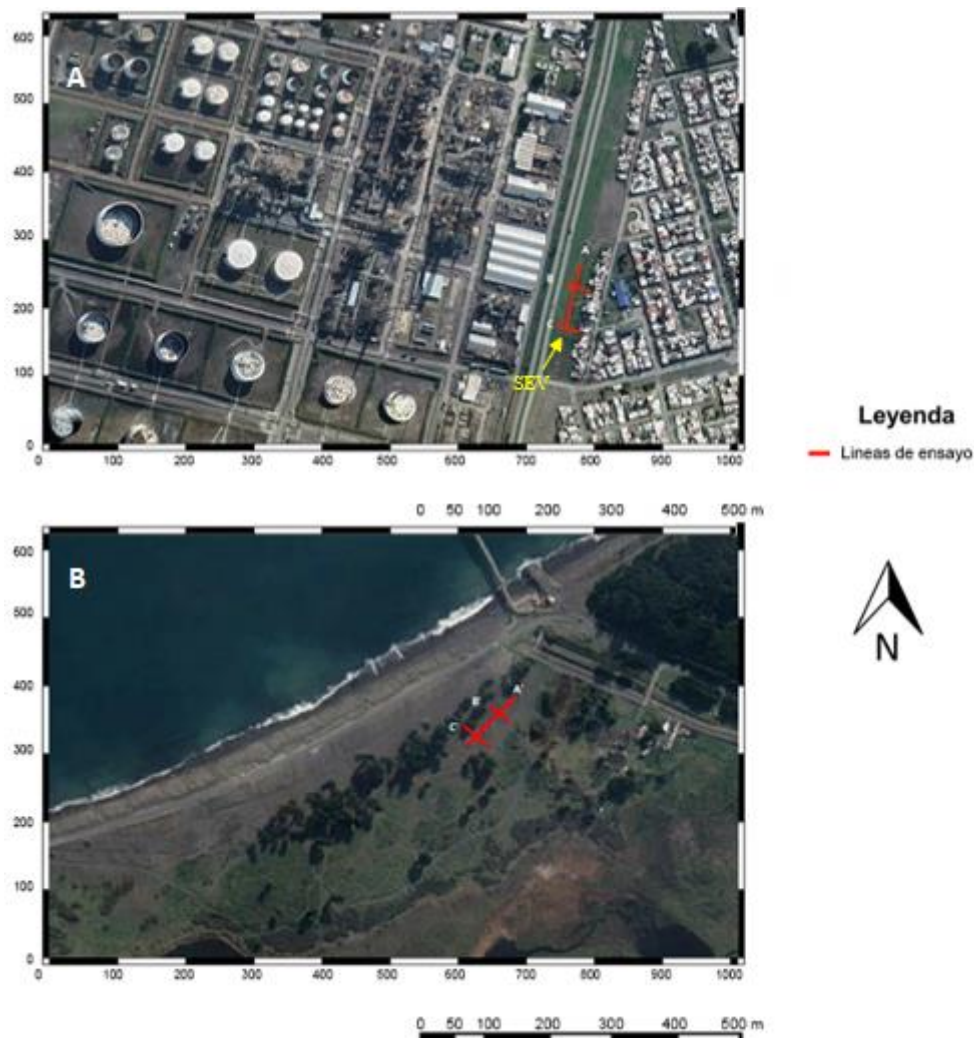


Figura 9: a) Zona de estudio frente a ENAP. b) Zona estudio posterior a ENAP, frente a la costa. Modificado de Google earth. Elaboración propia.

Las salidas se realizaron cuando las condiciones climáticas lo permitieron (sin precipitaciones), ya que si hay presencia de lluvias no se podría realizar, debido a que el agua al ser conductor de electricidad disminuiría las resistividades del suelo que se está estudiando y los valores a registrar no serían representativos de la zona.

En la zona de estudio 1 frente a ENAP, además de la configuración Dipolo-Dipolo, se realizó un ensayo de sondeo eléctrico vertical con la geometría Schlumberger. Y en el área de estudio 2, se realizó solo el arreglo Dipolo-Dipolo.

El arreglo Dipolo-Dipolo va midiendo la resistividad del suelo por niveles, hasta alcanzar la profundidad deseada con los electrodos separados equidistantemente uno del otro. Para el primer nivel, los electrodos de intensidad quedan fijos y los de corriente se van moviendo hasta cubrir toda la longitud que se desea; para el segundo nivel se mueve uno de los electrodos de intensidad avanzando a lo largo del perfil, con la misma separación establecida para cada uno de estos, y luego se mueven los de corriente igual que el nivel 1. Este proceso se realiza hasta que los electrodos de intensidad abarquen toda la longitud del perfil. Luego de obtener la base de datos mediante Dipolo-Dipolo, esta se trabajó con el software RES2DINV de Geotomo, diseñado para interpolar e interpretar los datos de campo de prospección eléctrica, de resistividad eléctrica y de polarización inducida.; Esta inversión se realiza mediante el método de mínimos cuadrados que involucra metros de elementos finitos y de diferencias finitas, este fue creado por Geotomo Software.

La ejecución el arreglo Schlumberger consiste en poner los 4 electrodos en superficie intentando siempre formar una línea recta. Se debe tener claridad en el origen y punto final del perfil para no tener problemas a la hora de interpretar los datos. Los 2 electrodos donde se inyecta voltaje quedan fijos al centro del perfil, mientras que los que miden intensidad se van separando progresivamente para así alcanzar una mayor profundidad. Para interpretar los valores obtenidos con este método se utilizó el programa IPI2win diseñado por Geoscan Ltda.

4. RESULTADOS E INTERPRETACIONES

a. Zona de estudio 1 - frente a ENAP.

La primera salida se realizó para encontrar las resistividades en los perfiles A (100 metros), B (42 metros) y C (42 metros). En la Figura 10, se observa el Perfil A de longitud de 100 metros, donde en la superficie se tienen resistividades entre 390-914 [Ωm], y a más profundidad se observan altas resistividades, las cuales tienen valores desde 2100 [Ωm].

En la Figura 10 se muestran los valores de resistividad que fueron procesados por el Software RES2DInv, en este se ingresan los valores del potencial espontaneo, la intensidad que se inyecta y el voltaje medido, luego se calcula la resistividad aparente con la formula correspondiente y se procede a la inversión del perfil que realiza el Software. En la figura 10 se ve que en la superficie se alcanzan valores 900 [Ωm], lo que, según las tablas de clasificación de materiales según su resistividad, permite decir que en la capa superficial de esta zona se encuentran arenas que al estar sueltas hacen que la corriente se disipe. Además, se observa que a mayor profundidad la resistividad supera 2000 [Ωm], esto quiere decir que a partir de los 12 metros se encuentra un material más compacto que tendría menos conductividad que el material superficial, lo que, según la geología, se puede inferir que a esa profundidad se encuentran materiales como areniscas y gravas. Además, a partir de los 10 metros aproximadamente se ven en algunos sectores con muy baja resistividad que van desde los 13

[Ωm] a los 38,4 [Ωm] estos valores están en el rango de agua fresca, lo que coincidiría con la ubicación del acuífero de Talcahuano.

En este perfil no se presentan datos anómalos que hagan concluir la presencia de contaminantes de algún tipo, por lo que este perfil coincidiría con la geología de la zona.

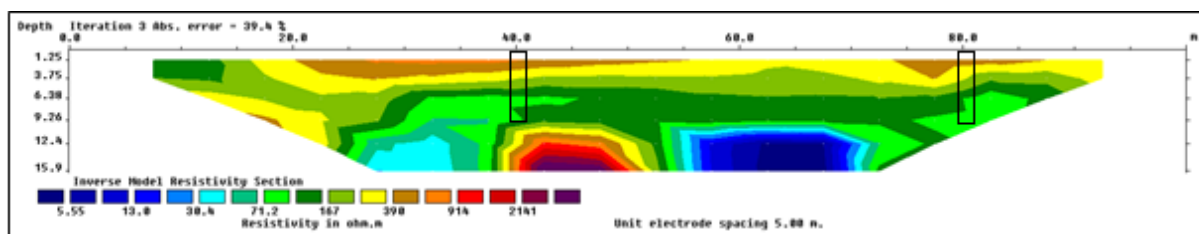


Figura 10: Resistividades perfil A de 100 metros de longitud, rectángulos en la imagen representan la intersección con los perfiles B y C. Creado en software RES2SDINV

En la Figura 11 se observa el perfil B de 42 metros, donde la capa superficial muestra valores de resistividad que van desde 376 [Ωm] a 897 [Ωm], al igual que el anterior donde se ven arenas sueltas. Bajo los 2,5 metros de profundidad se observa una gran porción de suelo con baja resistividad, la cual va desde 66 [Ωm] a 158 [Ωm], lo que coincide con areniscas poco cementadas que serían pertenecientes a la formación Tubul.

El Perfil B, es concordante al Perfil A presentando las mismas características eléctricas, donde en la superficie se observan valores que permiten asociarlos a arenas o material suelto y no se observa material con alta resistividad debido a que este perfil solo alcanza los 9,56 metros de profundidad.

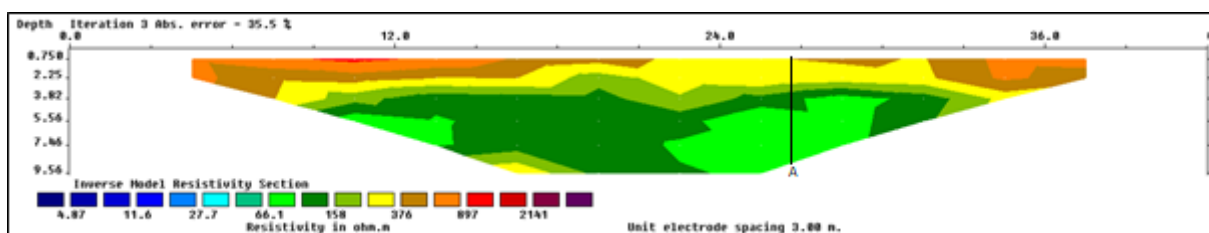


Figura 11: Resistividad perfil B de 42 metros de longitud. creado en software RES2DINV.

El ultimo perfil (Perfil C) realizado frente a ENAP se observa en la Figura 12, donde se aprecian valores de resistividad anómalos en comparación con los otros dos perfiles. En la figura, se observan en la superficie valores que van desde 526 [Ωm], pero que no superan 600 [Ωm] como los perfiles anteriormente mostrados. Además, se aprecia en algunas zonas que al aumentar la profundidad disminuyen los valores de resistividad, lo que si tendría sentido considerando la geología del sector. Debido a que la separación entre los perfiles no supera los 100 metros de distancia, y no se apreció en terreno un cambio de geología considerable para que hubiera estos cambios de resistividad en la superficie, pero si se observó bastantes contaminantes arrojados por el hombre (colillas cigarro, cajas, botellas, etc) es que se infiere que es ahí donde se encontraría una capa superficial de contaminantes.

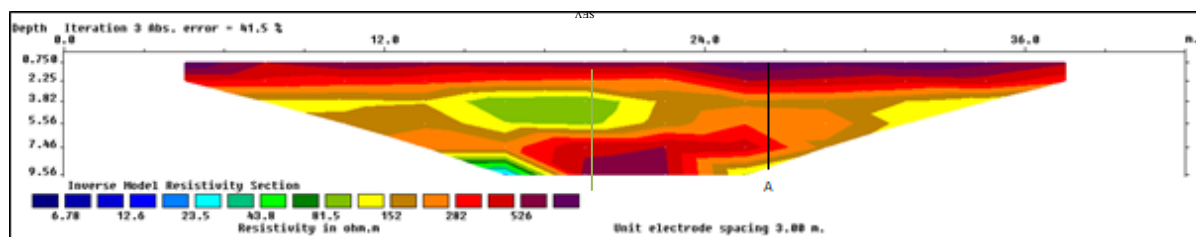


Figura 12: Resistividad perfil C de 42 metros de longitud. creado en software RES2DINV.

Debido a que el Perfil C presentó datos anómalos, en comparación con los otros perfiles que se desarrollaron en la zona, se realizó un sondaje eléctrico vertical para comparar las resistividades obtenidas en ambos métodos, Dipolo-Dipolo y el arreglo SchlumbergeR. Por lo que se realizó el SEV en el punto medio del perfil C ($36^{\circ}46'52.53''S$, $73^{\circ}7'0.61''O$) (Figura 8A).

El perfil SEV (Figura 13) muestra con mayor precisión la estratigrafía vertical. Se aprecia que bajo el punto donde se midió se encontraron 3 capas; la primera muestra una resistividad aparente de 212 [Ωm] lo que en comparación con los perfiles anteriores es baja en relación a la geología presentada, no así la segunda capa, la cual muestra un valor de resistividad similar a los perfiles A y B de un valor de 824 [Ωm] y se acerca a los valores fijados para los materiales sueltos, como la arena. Por último, la tercera capa muestra que a una profundidad de 8,4 metros hay un valor de resistividad muy bajo, lo que permite inferir que se encuentra una zona saturada (acuífero Talcahuano).

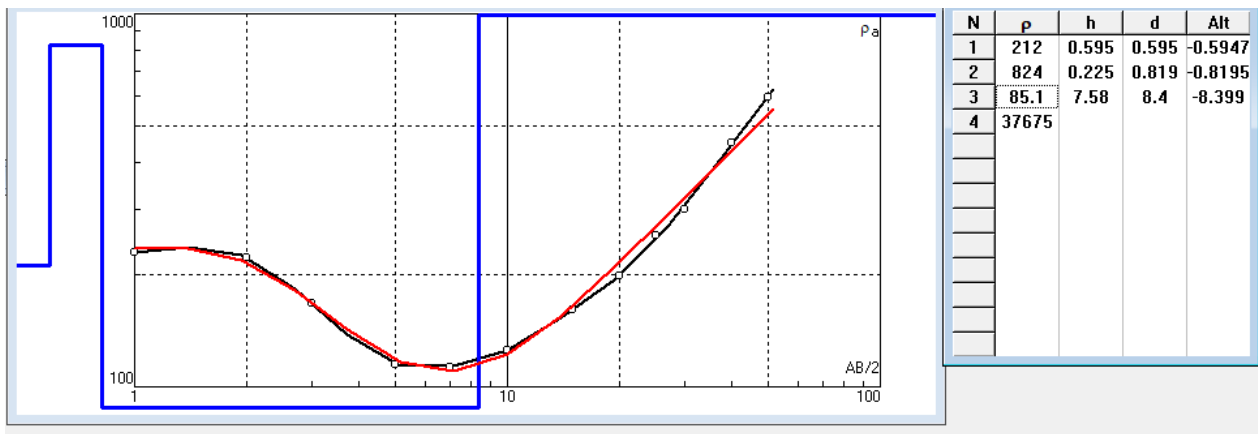


Figura 13: Resistividad punto medio del perfil C-C con SEV. Creado por software IPI2Win

Debido a que el punto donde se realizaron estos dos métodos se encontraba con distintos materiales que el hombre ha ido arrojando además de todo el material de relleno que se encontraba presente en la zona de estudio, se creó una capa de “basura” en la superficie, lo que tuvo un efecto directo en la obtención de valores anómalos encontrados en ese lugar disminuyendo la resistividad en la superficie.

b. Zona de estudio 2 (frente al mar, camino lenga)

En la Figura 14 se observa que en este perfil las resistividades superficiales aumentan considerablemente en comparación con el perfil de 100 metros ubicado en la zona de estudio 1 frente a ENAP. Estas resistividades van desde 811 [Ωm] a 3175 [Ωm], a pesar del aumento de estos valores, aún se encuentra en el intervalo de valores que permiten concluir la presencia de arenas. En la zona intermedia se notan resistividades bajas que coincidirían con la presencia del acuífero de Talcahuano, al igual que la zona de estudio 1 frente a la empresa.

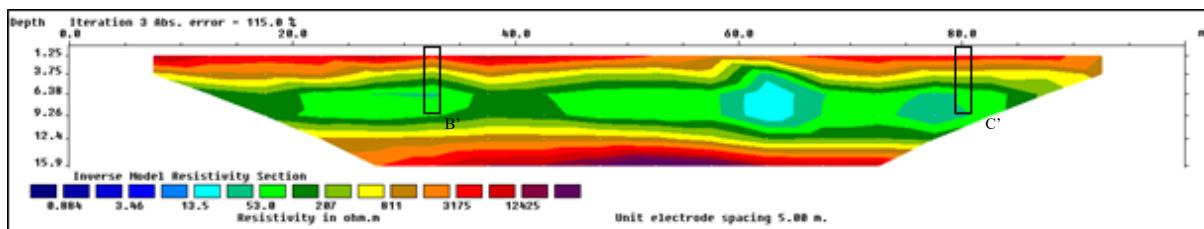


Figura 14. Resistividades perfil A' de 100 metros de longitud. Rectángulos en la imagen representan la intersección con los perfiles B' y C'. Creado en software RES2SDINV

En la Figura 15 se observan valores de resistividad en la superficie que superan los 1000 [Ωm] y a medida que se va aumentando la profundidad estos valores van disminuyendo. Entre los 5,56 m y 9,56 m se tiene un rango de valor entre los 71,1 [Ωm] y 339 [Ωm]. Lo que implica que estaríamos alcanzando suelos más saturados, lo que permite inferir la presencia del acuífero más somero.

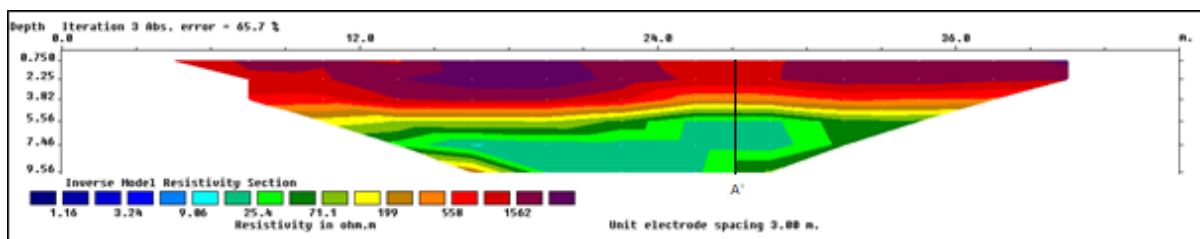


Figura 15: Resistividad perfil B' de 42 metros de longitud. creado en software RES2DINV.

En la Figura 16 se pueden observar valores de resistividad consistentes con el perfil mostrado anteriormente. Donde en la superficie se obtienen valores que superan los 1000 [Ωm]. En la zona media se vuelven a mostrar valores bajos de resistividad (71,1 [Ωm] y 339 [Ωm], indicando, igual que el perfil anterior, que estaríamos en presencia de un suelo con mayor conductividad, lo que nos permite decir que volvemos a encontrar el acuífero más somero que en la zona 1. No se presentan datos anómalos, por lo que se asume la presencia de la misma geología descrita en el Perfil A' y B'; arenas en la superficie, y la zona intermedia con material de baja resistividad

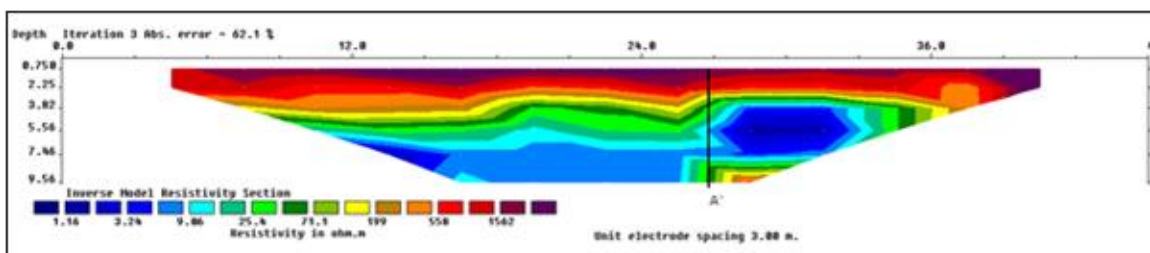


Figura 16: Resistividad perfil C' de 42 metros de longitud. creado en software RES2DINV

Los perfiles A', B', C' no presentan datos anómalos entre sí siendo consistentes en la geología asociada al lugar. En la zona de estudio 2, frente a la costa, se muestran resistividades más altas que los valores obtenidos en la zona de estudio 1 frente a ENAP.; Esto se debe a la ubicación, ya que al estar frente al mar y con menos acción del hombre el material superficial esta menos compacto. Además, se observa que a mayor profundidad los valores de resistividad disminuyen, esto se puede deber a la presencia del estuario de Lengua, por lo que se infiere que el agua está más somera y aumentaría la conductividad del terreno.

5. CONCLUSIONES.

En esta investigación se realizaron dos tipos de ensayos para determinar la resistividad del suelo, la primera fue una tomografía eléctrica con la geometría Dipolo-Dipolo y la segunda fue un sondeo eléctrico vertical con la configuración Schlumberger. Ambas dan una imagen clara de los estratos que presenta la zona de estudio. El método Dipolo-Dipolo permite determinar con mayor claridad los cambios laterales del subsuelo, por el contrario, los SEV son más sensibles a los cambios verticales.

Debido a que el Perfil C de 42 metros ubicado en la zona de estudio 1 frente a ENAP arrojó valores anómalos debido a la cantidad de basura que se encontró en él adema de la cantidad de material de relleno; se puede inferir que estos métodos geofísicos, como los sondeos verticales o tomografías eléctricas, permiten determinar si existe o no contaminación de un lugar si se presenta contaminación puntual, esto quiere decir que el foco de contaminación se encuentra en un lugar fijo y que su concentración sea muy alta. Además, no se puede inferir, con ningún perfil restante, algún tipo de contaminación, ya sea por concentración de metales pesados o por

presencia de hidrocarburos. A pesar de que en un lugar de la zona de estudio no se presentó contaminación provocada por hidrocarburos, esto no quiere decir que no exista, ya que se puede encontrar diluida, en pequeñas concentraciones o simplemente se encuentre a más profundidad. Es por eso que se recomienda siempre acompañar estos ensayos con otros más específicos, como lo son los ensayos de laboratorio o los sondeos.

A pesar de que las áreas estudiadas tenían una gran probabilidad de estar contaminadas según el estudio de Bezama et al. (2007), no se pudo detectar esta contaminación con los métodos Geofísicos.

Los métodos geofísicos, por las características que presentan, permiten tener una visión preliminar y complementar la información obtenida con otras técnicas aplicadas. A pesar de que estos métodos no son suficientes para tener una base sólida de lo que está bajo la superficie, son muy utilizados ya que son métodos no invasivos, económicos, rápidos y fáciles de manipular.

BIBLIOGRAFÍA.

- Bezama, A., Agüero R., F. Márquez., Barrera, S., Salazar, N., Lorber, K.** (2007). Land register of contaminated site in an industrial Chilean region: Identification and evaluation of suspected sites.
- Bobachev, A., Modin, I. & Shevnin, V.** 2001, IPI2Win Software. Geoscan-M, Ltda. Moscow State university. Russia
- Bobachev, A., Modin, I. & Shevnin, V.** 2001, IPI2Win Software. Geoscan-M, Ltda. Moscow State university. Russia
- Centro de análisis de políticas públicas.** (2016). Informe País: Estado del medio ambiente en Chile. Comparación 1999-2015. (2016). Disponible en <http://libros.uchile.cl/648>.
- Charrier, R.; Pinto, L.; Rodríguez, M.P** (2007). Tectono-stratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. The Geological Society of London, Special Publication: 21-116.
- Daza, F.** (2012). Métodos geoelectrónicos aplicados a la exploración de aguas subterráneas y termales (Tesis, Universidad de Concepción).
- Dirección general de aguas.** (2013), Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins y Región del Bío-Bío, SIT N°318, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Aqualogy medioambiente Chile S.A.
- Empresa Nacional del Petróleo.** (2007). Reporte social 2007 Empresas ENAP. 107 p.
- Falcón, M. F., Ramírez, P., Marín, M., & Arenas, M.** (2012). Evaluación preliminar de peligros geológicos: Área de Concepción-Talcahuano-Hualpén-Chiguayante, Región del Biobío. Mapa 12-4: Peligro de inundación por tsunami. Geología para la reconstrucción y la gestión del riesgo, 1. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- Gajardo, A.** (1981). Hoja Concepción-Chillan, escala 1:250.000, región del Biobío. Mapa Geológico preliminar de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas. N.º 4, 32 p.
- Geotomo Software, Res2dinv V. 3.5 – 2D Resistivity and IP Inversion, Malaysia**
- Jiracek G.R.** (1981), Resistivity methods in exploration for hydrothermal resources, University of Utah Research Institute, Earth Science Laboratory Report ESL-59, Salt Lake City, pp. 23-40.
- Loke, MH.** (2004). Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys.
- Palacky, G. J.** (1988). Resistivity characteristics of geologic targets. Electromagnetic methods in applied geophysics. 53-129
- Pineda, V.** (1983). Evolución paleogeográfica de la Península de Arauco durante el Cretácico Superior-Terciario. Tesis de Grado, Universidad de Concepción.
- Quezada, F.** (1995). Geología urbana y ambiental de la ciudad de Concepción. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Concepción
- Sharma, P. V.** (1997). Environmental and engineering geophysics. Cambridge university press.
- Shevnin, V., D.R, A.M, D.F-H, H.Z, y A. Ryjov.** (2006). Estimation of soil petrophysical parameters from resistivity data: Application to oil-contaminated site characterization: Geofísica Internacional, 45, 179-193.
- Telford, WM; LP Geldart & RE Sheriff.** 1990. Applied geophysics. Cambridge University Press. 770 p.
- Veyl, C.** (1961). Contribución al conocimiento de la geología regional de la provincia de concepción. Inst. de Química. Geología. Universidad de Concepción.
- Weinzettel, P., Varni, M., Dietrich, S., & Usunoff, E.** (2009). Evaluación de tres dispositivos de tomografía eléctrica para la identificación de horizontes petrocálcicos en el suelo. Ciencia del suelo, 27(1), 135-146.