



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**  
**DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA DE TALCAHUANO  
ENTRE LOS 36°44` - 36°49`S Y 73°00` - 73°08`W, REGIÓN DEL  
BIOBÍO, CHILE.**

**Memoria para optar al título de Geólogo**



**Gustavo Andrés Figueroa Núñez**

**Profesor Patrocinante:** Msc. Liubow Nikolaivna González Martínez

**Profesores Comisión:** Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

Msc. Abraham Elías González Martínez

**Concepción, 2020.**

# ÍNDICE

	Página
RESUMEN	
1.INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.Objetivos .....	1
1.1.1.Objetivos generales .....	1
1.1.2. Objetivos específicos .....	1
1.2. Ubicación y acceso .....	2
1.3. Metodología de trabajo .....	3
1.4. Clima .....	4
1.5. Flora y fauna .....	6
2.GEOMORFOLOGÍA .....	7
2.1. Geomorfología regional .....	7
2.2. Geomorfología local .....	9
3.GEOLOGÍA .....	11
3.1. Geología regional .....	11
3.2. Geología local .....	12
3.2.1. Granitos Indiferenciados .....	13
3.2.2. Rocas estratificadas .....	13
3.2.2.1. Formación Quiriquina .....	13
3.2.2.2. Formación Curanilahue .....	13
3.2.3. Depósitos no consolidados .....	14
3.2.3.1. Depósitos litorales .....	14
3.2.3.2. Depósitos fluviales .....	15
3.2.3.3. Depósitos de remoción en masa .....	15
4.SUELOS .....	17
4.1. Series de suelos .....	17
4.2. Características hidráulicas de suelos .....	21
4.3. Grupos hidrológicos de suelos .....	23
4.4. Usos de suelos .....	24
5.PROSPECCIÓN GEOFÍSICA .....	26
5.1. Resistividad del suelo .....	26
5.2. Sondeo eléctrico vertical .....	29
5.2.1. Interpretación SEV .....	30
5.3. Estratigrafía del subsuelo del área de estudio y su relación con la interpretación realizada de los sondajes eléctricos verticales .....	38
5.3.1. El suelo de fundación de Concepción (ESTUDIOS GEOTÉCNICOS N°2) .....	39
5.3.2. Suelo de Fundación de las hojas de Talcahuano, Cosmito y Huapencillo .....	41

6. HIDROGEOLOGÍA .....	4 5
6.1. Unidades hidrogeológicas .....	4 5
6.2. Caracterización hidráulica .....	4 6
6.2.1. Prueba de bombeo .....	4 6
6.2.2. Superficie piezométrica .....	4 9
6.3. Balance hidrológico .....	5 0
6.3.1. Evapotranspiración .....	5 2
6.3.1.1. Evapotranspiración real (ETR) .....	5 3
6.3.1.2. Metodología ETR .....	5 3
6.3.2. Escorrentía superficial .....	5 5
6.3.3. Infiltración .....	5 9
7. HIDROGEOQUÍMICA .....	6 1
7.1. Parámetros fisicoquímicos .....	6 1
7.1.1. pH .....	6 1
7.1.2. Conductividad eléctrica .....	6 1
7.1.3. Sólidos disueltos totales .....	6 2
7.1.4. Temperatura .....	6 2
7.2. Contenido en metales pesados .....	6 3
8. VULNERABILIDAD .....	6 6
8.1. Generalidades .....	6 6
8.2. BGR .....	6 6
8.2.1. Evaluación de parámetros .....	6 7
8.2.1.1. Capacidad de campo efectiva (S) .....	6 7
8.2.1.2. Infiltración (R) .....	7 0
8.2.1.3. Tipo Litológico (L) .....	7 0
8.2.1.3.1. Depósitos no consolidados (Ln) .....	7 0
8.2.1.3.2. Rocas consolidadas (Lc) .....	7 2
8.2.1.4. Espesor de la zona no saturada (E) .....	7 2
8.2.2. Determinación de la efectividad de protección generalizada .....	7 3
9. CONCLUSIÓN .....	7 6
10. REFERENCIAS .....	7 9

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1 Ubicación área de estudio en la Provincia de Concepción, Región del Biobío. Modificado de Instituto Geográfico Militar 2019 .....	2
1. 2 Climas de la región del Biobío. (CSBN`S: Templado cálido con lluvias invernales y gran humedad atmosférica. CSB: Templado cálido con lluvias invernales. CFSB: Templado cálido lluvioso con influencia mediterránea. CFSC: Templado frío lluvioso con influencia mediterránea. CSC: Templado frío con lluvias invernales. ETH: Tundra por efecto de altura.) Modificado de Koppen, 1948 .....	5
2. 1 Mapa Geomorfológico Región del Biobío. Modificado de Borgel, 1983 ..	7
2. 2 Mapa de elevación de las comunas de Talcahuano y Hualpén. Modificado de Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, 2017 .....	9
3. 1 Mapa Geológico del área de estudio. Modificado de SERNAGEOMIN, 2003 .....	12
4. 1 Mapa Series de Suelo del área de estudio. Información obtenida de Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, 2017	18
4. 2 Triángulo de texturas correspondientes a las series del área de estudio. Modificado de USDA, 1964 .....	23
4. 3 Mapa usos de suelo del área de estudio. Elaboración propia. Información obtenida de Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, 2017 .....	25
5. 1 Rangos generales de variación de resistividades de distintos materiales geológicos. Modificado de Palacky, 1987 .....	29
5. 2 Curvas de resistividad aparente para dos (a) y tres (b) capas .....	30
5. 3 Mapa ubicación de cada SEV realizado en la zona de estudio. Elaboración propia .....	31
6. 1 Sistema de clasificación de acuíferos propuesto por Struckmeier & Margat, 1995 .....	46
6. 2 Mapa de zonación de la transmisibilidad de la zona de estudio. Elaboración propia, 2019 .....	48
6. 3 Mapa superficie piezométrica área de estudio. Elaboración propia, 2019..	50
8. 1 Triángulo tipo de suelos finos. Manual para la aplicación del concepto de vulnerabilidad de acuíferos. DGA, 2004 .....	67

8.	2	Triangulo de clasificación de arenas. Manual para la aplicación del concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos. DGA, 2004 .....	6 8
8.	3	Mapa vulnerabilidad del área de estudio. Elaboración propia, 2019 .....	7 5

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico	Página
1. 1 Climograma de la zona de estudio para el periodo 2004 - 2014. Estación Meteorológica Carriel Sur, Dirección Meteorológica de Chile - Estación Concepción, Dirección General de Aguas .....	6
6. 1 Representación gráfica de la variación anual de la evapotranspiración potencial y real, en relación a la precipitación. Serie Arenales .....	5 4

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
4. 1 Características hidráulicas de las series de suelo pertenecientes a la zona de estudio. (ARN: Arenales. LHY: Llahuecuy, LHN: Llahuen, NNH: Ninhue, STN: San Esteban, D: Dunas, R: Suelos Recientes, CPE: Curanipe, TAL: Terrazas Aluviales, TMA: Terrazas Marinas, MP: Pantano) .....	2 2
4. 2 Series de suelo y porcentaje de granulometría. Estudio Agrológico VIII región. CIREN, 1999. (ARN: Arenales. LHY: Llahuecuy, LHN: Llahuen, NNH: Ninhue, STN: San Esteban, D: Dunas, R: Suelos Recientes, CPE: Curanipe, TAL: Terrazas Aluviales, TMA: Terrazas Marinas, MP: Pantano).....	2 3
5. 1 Resistividad y conductividad de diversos materiales geológicos. Modificada de Keller & Frischknecht, 1966; Daniels & Alberty, 1966 ...	2 9
6. 1 Profundidad, cota, transmisibilidad y permeabilidad de doce puntos en la zona. DGA, 2013. UTM WGS 84 zona 18 H .....	4 7
6. 2 Clasificación y capacidad de un acuífero estimados a partir de su transmisibilidad. (Modificado de Villanueva & Iglesias, 1984) .....	4 8
6. 3 Puntos de medición del nivel freático durante agosto del año 2013 en el área de estudio .....	4 9
6. 4 Horas de luz mensual para la zona de estudio .....	5 1
6. 5 Precipitación media (mm) mensual de los últimos 12 años en la zona de estudio .....	5 2
6. 6 Temperatura media (°C) mensual para los últimos 12 años en la zona de estudio .....	5 2

6. 7	Reserva máxima (mm) de cada serie. (ARN: Arenales. LHY: Llahuecuy, LHN: Llahuen, NNH: Ninhue, STN: San Esteban, D: Dunas, R: Suelos Recientes, CPE: Curanipe, TAL: Terrazas Aluviales, TMA: Terrazas Marinas, MP: Pantano) .....	5 3
6. 8	Evapotranspiración Serie Arenales en la zona de estudio .....	5 4
6. 9	Evapotranspiración real para cada serie de suelo. (ARN: Arenales. LHY: Llahuecuy, LHN: Llahuen, NNH: Ninhue, STN: San Esteban, D: Dunas, R: Suelos Recientes, CPE: Curanipe, TAL: Terrazas Aluviales, TMA: Terrazas Marinas, MP: Pantano) .....	5 5
6. 1 0	Número de Curvas (NC) de cada grupo hidrogeológico con respecto a cada uso de suelo. Modificado de United States Soil Conservation Service del USDA .....	5 6
6. 1 1	Número de Curvas (NC) y retención máxima (s) en mm de Serie Arenales .....	5 6
6. 1 2	Cálculo escorrentía superficial actual del área de estudio .....	5 8
6. 1 3	Características de cada serie de suelo del área de estudio para el cálculo de infiltración. (ARN: Arenales. LHY: Llahuecuy, LHN: Llahuen, NNH: Ninhue, STN: San Esteban, D: Dunas, R: Suelos Recientes, CPE: Curanipe, TAL: Terrazas Aluviales, TMA: Terrazas Marinas, MP: Pantano) .....	6 0
6. 1 4	Infiltración de cada serie del área de estudio. (ARN: Arenales. LHY: Llahuecuy, LHN: Llahuen, NNH: Ninhue, STN: San Esteban, D: Dunas, R: Suelos Recientes, CPE: Curanipe, TAL: Terrazas Aluviales, TMA: Terrazas Marinas, MP: Pantano) .....	6 0
7. 1	Parámetros fisicoquímicos medidos en el área de estudio. UTM WGS 84 zona 18 H .....	6 1
7. 2	Análisis metales pesados en el área de estudio. Realizado por SGS Chile Ltda .....	6 4
7. 3	Valor Característico de metales pesados según Decreto Supremo N° 46 de 2002 .....	6 5
8. 1	Evaluación de los suelos sobre la base de la capacidad de campo efectiva	6 8
8. 2	Cálculo del puntaje S del área de estudio .....	6 9
8. 3	Puntaje R realcionado a la infiltración .....	7 0
8. 4	Puntaje R de cada serie en la zona con respecto a la infiltración anual de cada una. (ARN: Arenales. LHY: Llahuecuy, LHN: Llahuen, NNH: Ninhue, STN: San Esteban, D: Dunas, R: Suelos Recientes, CPE: Curanipe, TAL: Terrazas Aluviales, TMA: Terrazas Marinas, MP: Pantano) .....	7 0

8. 5	Equivalencias litológicas para descripciones estratigráficas comunes de sondajes y puntajes asociados para la evaluación de Ln .....	7 1
8. 6	Evaluación del Puntaje de Rocas consolidadas (Lc) .....	7 2
8. 7	Espesor zona no saturada de cada serie de suelo en el área de estudio ...	7 3
8. 8	Valor de P1 por serie en el área de estudio .....	7 3
8. 9	Valor de P2 por serie en el área de estudio .....	7 4
8. 1 0	Valor de Pt por serie en el área de estudio .....	7 4
8. 1 1	Efectividad generalizada de protección y vulnerabilidad asociada .....	7 5

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Página
I Prospección Geofísica .....	8 4
II Balance Hidrológico .....	1 0 7



## RESUMEN

El área de estudio está ubicada en las comunas de Talcahuano y Hualpén, Provincia de Concepción, Región del Biobío, Chile. Entre los 36°44' - 36°49' S y los 73°00' - 73°08' W. El relieve del área de estudio se caracteriza por terrazas de abrasión marina y una extensa llanura con presencia de cerros islas. Las formaciones geológicas presentes corresponden a Granitos indiferenciados (Carbonífero - Pérmico), Formación Quiriquina (Maastrichtiano superior - Paleoceno), Formación Curanilahue (Eoceno inferior) y depósitos no consolidados (Holoceno).

En total once series de suelos están presentes en la zona, y cada una de estas se clasifica en grupos hidrogeológicos: Grupo A (serie Arenales, Llahuecuy, Dunas y Suelos Recientes), Grupo B (serie Llahuen, San Esteban, Curanipe, Pantano y Terrazas Aluviales) y Grupo C (serie Ninhue y Terrazas Marinas). El uso de suelo predominante en el área de estudio corresponde a “áreas urbanas e industriales”.

La prospección geofísica mediante el método de Sondaje Eléctrico Vertical se utilizó para observar variaciones de resistividad del subsuelo en función de la profundidad, obteniendo un corte geoelectrico, en donde además se realizó una analogía entre las diferentes resistividades y litologías. Entonces, diferencias de resistividad corresponden a diversas capas con características hidrogeológicas distintas, pudiendo llegar a inferir la presencia de agua a diversas profundidades en la mayoría de estos sondajes y además conocer posibles lugares afectados por intrusión salina (al E de la Bahía de San Vicente y al SSW del área de estudio). Por otro lado, se estimó la profundidad del basamento cristalino, entre 91,75 m y 93,1 m aproximadamente. Lo anterior, permitió clasificar la zona en Unidad Hidrogeológica 1, que corresponde a un acuífugo y Unidad Hidrogeológica 2, en donde se define un acuífero libre. Mediante el conocimiento del nivel estático fue posible confeccionar un mapa de la superficie piezométrica del lugar en donde se detectaron tres direcciones principales del flujo del agua subterránea; en la zona sur del área de estudio con dirección N-S y sentido hacia el sur, en la zona norte con dirección N-S y sentido hacia el norte, y finalmente en la zona oeste con dirección E-W y sentido hacia el este.

Según datos meteorológicos la comuna de Talcahuano y Hualpén poseen 1.132 mm de precipitación promedio anual. Se estimó la evapotranspiración real en 414,46 mm, la escorrentía superficial en 545,04 mm y la infiltración en 125,6 mm.

Los parámetros fisicoquímicos de las muestras tomadas en el lugar están dentro de la Norma Chilena NCh409/1.of.2005. Así mismo, la concentración de metales pesados en el agua subterránea cumple con el Decreto 46/2002, a excepción del Al, Fe y Mn. Esto podría ser explicado como producto de actividad industrial en la zona.

Mediante el método BGR se estimó la vulnerabilidad del acuífero, combinando cuatro factores que determinan la rapidez con la que un contaminante alcanza a infiltrarse en el acuífero (capacidad de campo efectiva, recarga natural, litología y espesor de la zona no saturada). El resultado fue un nivel alto de vulnerabilidad de este acuífero en toda su extensión.



## **1. INTRODUCCIÓN**

Uno de los elementos más importantes para el funcionamiento de la vida en el planeta es el agua. Esta posee un rol protagónico en las actividades humanas a nivel global. En este contexto, el estudio del agua subterránea es fundamental para estimar y no sobreexplotar este recurso y así evitar un desequilibrio tanto en los ecosistemas como en la sociedad.

La ciudad de Talcahuano cuenta con un importante desarrollo urbano e industrial (Arenas y otros, 2009), lo que hace precisar de un mayor conocimiento de la hidrogeología del lugar.

Con información geológica y aplicando métodos geofísicos es posible realizar una caracterización hidrogeológica con el fin de tomar medidas en el aprovechamiento de este recurso. Este estudio permitirá definir de forma preliminar el comportamiento del agua subterránea en la zona y así exponer una base de información.

### **1.1. Objetivos**

#### **1.1.1. Objetivos generales**

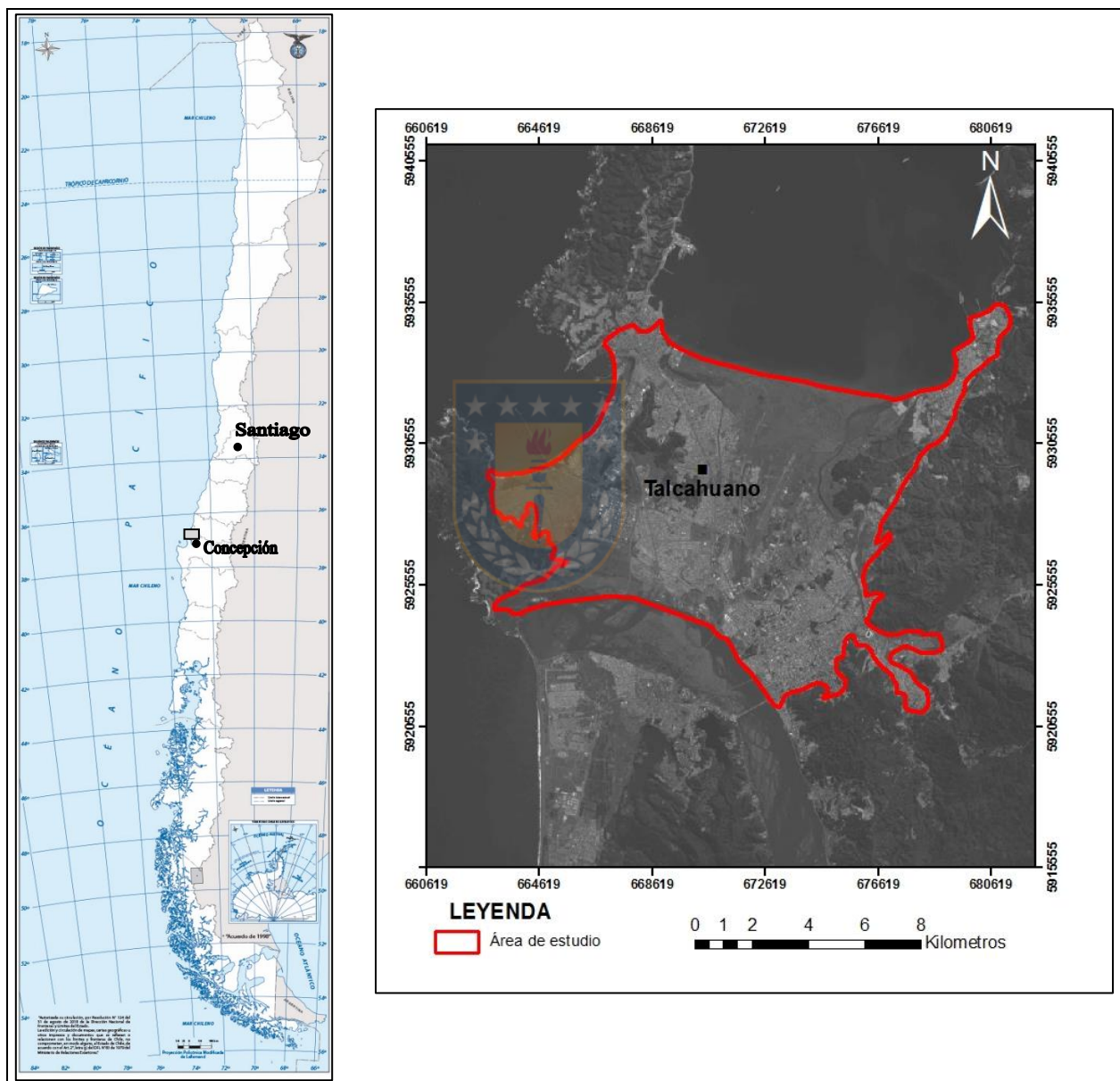
Usar información geológica y aplicar métodos hidrogeológicos para interpretar, evaluar y caracterizar hidrogeológicamente parte de las comunas de Talcahuano y Hualpén.

#### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar el lugar por medio de las propiedades del suelo.
- Definir y caracterizar unidades hidrogeológicas.
- Establecer la superficie piezométrica del área de estudio.
- Determinar el tipo de acuífero.
- Elaborar el balance hidrogeológico del área de estudio y así obtener una base de datos de evapotranspiración, escorrentía superficial e infiltración.
- Caracterizar la zona desde el punto de vista fisicoquímico.
- Interpretar Sondajes Eléctricos Verticales.
- Estimar la vulnerabilidad del acuífero mediante la metodología BGR.
- Realizar mapas ilustrativos de distintas características del área, como conductividad hidráulica, uso de suelo, serie de suelo, entre otros.

## 1.2. Ubicación y acceso

El área de estudio abarca parte de las comunas de Talcahuano y Hualpén, Provincia de Concepción, Región del Biobío, Chile. Posee una superficie aproximada de 121 km<sup>2</sup> entre los 36°44` - 36°49` S y los 73°00` - 73°08` W (Figura 1.1). Desde Concepción se accede a la zona por la Ruta 154 con dirección hacia Talcahuano.



**Figura 1.1:** Ubicación área de estudio en la Provincia de Concepción, Región del Biobío. Modificado de Instituto Geográfico Militar 2019.

### 1.3. Metodología de trabajo

La metodología de trabajo consta de tres etapas. A continuación se describe cada una de ellas:

- **Etapa pre-terreno**

Durante esta etapa se recopila información de la zona, incluyendo antecedentes sobre la geología, así como los diferentes trabajos publicados sobre hidrología e hidrogeología del lugar.

- **Etapa terreno**

Se llevan a cabo principalmente dos actividades:

- Identificación y caracterización de las diferentes unidades litológicas presentes en el área de estudio.
- Toma de datos fisicoquímicos del agua en pozos, a los cuales fue posible acceder en las comunas de Talcahuano y Hualpén.



- **Etapa de gabinete**

Para llevar a efecto el balance hidrogeológico del área de Talcahuano, se utiliza información perteneciente a las estaciones meteorológicas de Carriel Sur de la Dirección Meteorológica de Chile y a la estación “Concepción” de la Dirección General de Aguas (Ministerio de Obras Públicas). Estos datos corresponden a precipitaciones, temperaturas y horas de luz de los últimos 14 años. En paralelo, se obtienen las granulometrías de los suelos presentes en el área de estudio, utilizando el libro “Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Estudio Agrológico, VIII Región y VII Región” (CIREN, 1999). La granulometría de cada suelo es ingresada a la calculadora de propiedades hidráulicas (Saxton y otros, 1986), para así poder determinar las propiedades de estos como lo son punto de marchitez permanente, capacidad de campo, densidad aparente, saturación, conductividad hidráulica saturada y agua disponible.

Posteriormente se realizan los balances hídricos con el modelo de Thornthwaite, mediante los cuales se obtienen la evapotranspiración real, potencial e infiltración (Thornthwaite & Mather, 1955). También se utiliza el modelo de número de curvas americano para calcular la escorrentía superficial actual. (Para llevar a cabo esto se emplea Excel 2010 de Microsoft Office).

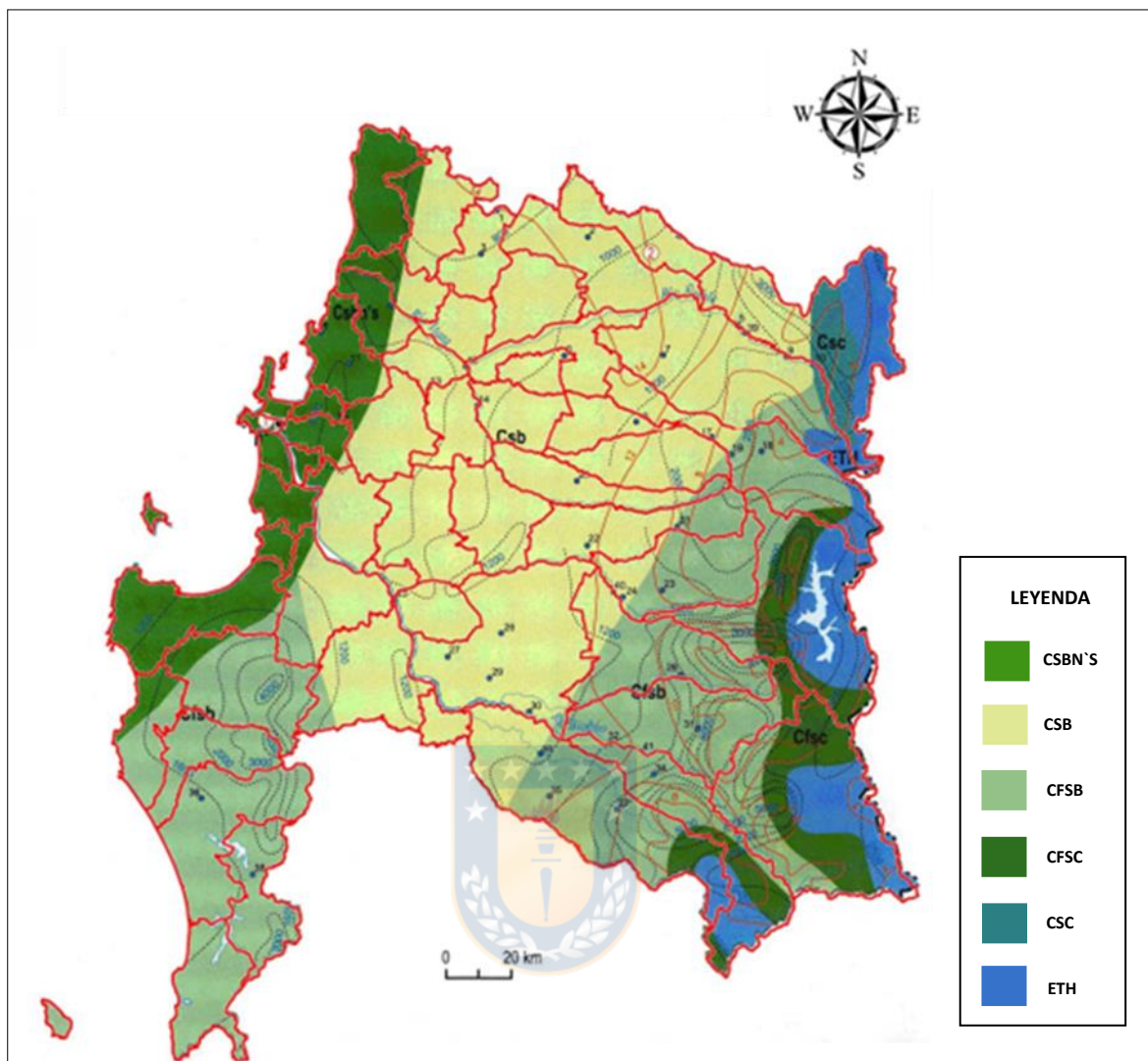
Interpretación de Sondajes Eléctricos Verticales (desde el punto de vista hidrogeológico) correspondientes a la zona de estudio y su relación con “sondajes” realizados anteriormente.

Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero, se realiza utilizando el método BGR, el cual es reconocido por la Dirección General de Aguas (DGA), de acuerdo al Decreto Supremo N° 46 de 2002 (Dirección General de Aguas, 2016).

Finalmente se confeccionan mapas temáticos con información del área de estudio mediante el software ArcGis 10.1.

#### **1.4. Clima**

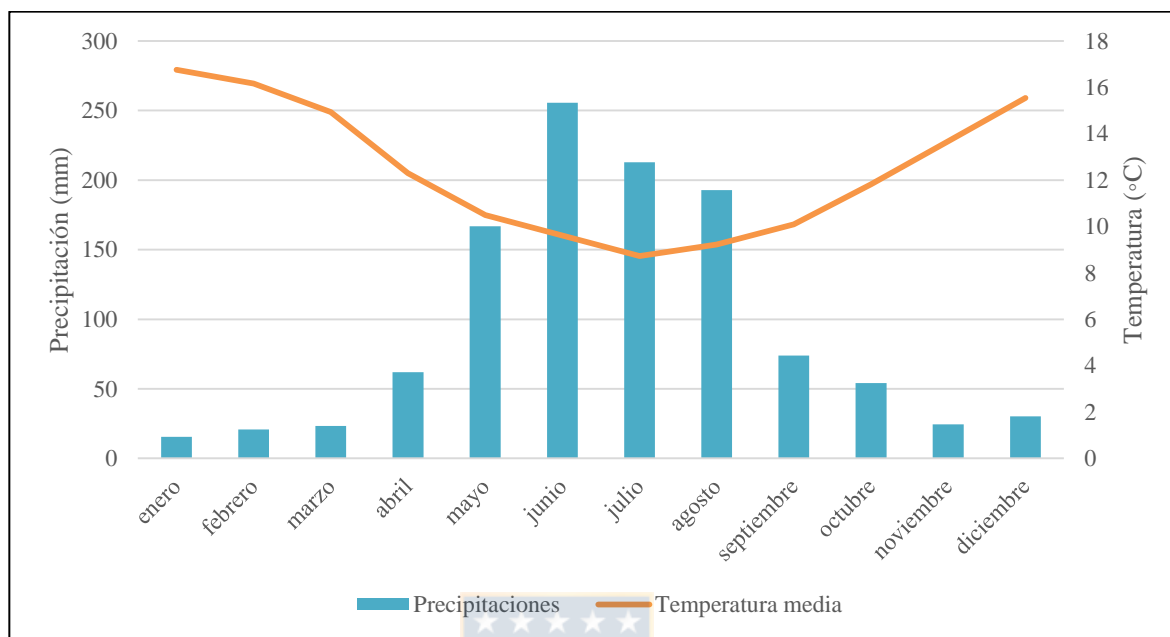
La región del Biobío se encuentra en la transición entre los climas templados secos de la zona central de Chile y los templados lluviosos que se desarrollan inmediatamente al sur del Río Biobío (Koppen, 1948) (Figura 1.2). En la Cordillera de la Costa se presenta un clima templado húmedo, con precipitaciones que fluctúan entre 1.200 mm y 2.000 mm anuales de norte a sur en la región. Hacia los valles este pasa a ser templado costero húmedo donde las precipitaciones alcanzan 1.300 mm anuales con un período seco de cinco meses (de noviembre a marzo), en la parte norte de esta predomina el clima templado mediterráneo abarcando toda la zona intermedia, bordes orientales de la Cordillera de la Costa y los sectores más bajos de la Precordillera. Finalmente en la Cordillera de los Andes por sobre los 1.500 m de altura se desarrolla un clima frío de altura con abundantes precipitaciones (más de 2.000 mm anuales) y bajas temperaturas que permiten la presencia de nieves permanentes en las alturas de la cordillera. Las características climáticas de la región son explicadas en gran medida por el relieve presente. La Cordillera de la Costa actúa como barrera climática que influye en las variaciones de las temperaturas y precipitaciones, el lado occidental recibe vientos del oeste y noroeste contribuyendo a las precipitaciones, creando así un clima húmedo en los sectores altos de esta. Por su parte, el lado oriental tiende a ser más seco. Las influencias marinas penetran débilmente hacia el interior a través de los valles del Itata y Biobío.



**Figura 1.2:** Climas de la región del Biobío. (CSBN'S: Templado cálido con lluvias invernales y gran humedad atmosférica. CSB: Templado cálido con lluvias invernales. CFSB: Templado cálido lluvioso con influencia mediterránea. CFSC: Templado frío lluvioso con influencia mediterránea. CSC: Templado frío con lluvias invernales. ETH: Tundra por efecto de altura.) Modificado de Koppen, 1948.

La zona de estudio se sitúa en la transición climática anteriormente mencionada. Posee una estación seca de aproximadamente 5 meses que se explica por la acción moderadora que ejerce la influencia del mar (en este periodo igual pueden registrarse precipitaciones). Es por esto que las temperaturas registran pequeñas fluctuaciones durante el año, promediando los  $12,7^{\circ}\text{C}$ . Las precipitaciones medias anuales llegan a los 1.132 mm, siendo el mes de junio el más lluvioso, con cerca de 250 mm (Gráfico 1.1); concentrándose entre los meses de mayo y agosto más del 60%

de las precipitaciones. La humedad relativa es elevada, ronda el 66% en verano y supera un 80% en invierno (Anuario Climatológico de la Dirección Meteorológica de Chile, 2018).



**Gráfico 1.1:** Climograma de la zona de estudio para el periodo 2004 - 2014. Estación Meteorológica Carriel Sur, Dirección Meteorológica de Chile - Estación Concepción, Dirección General de Aguas.

## 1.5. Flora y fauna

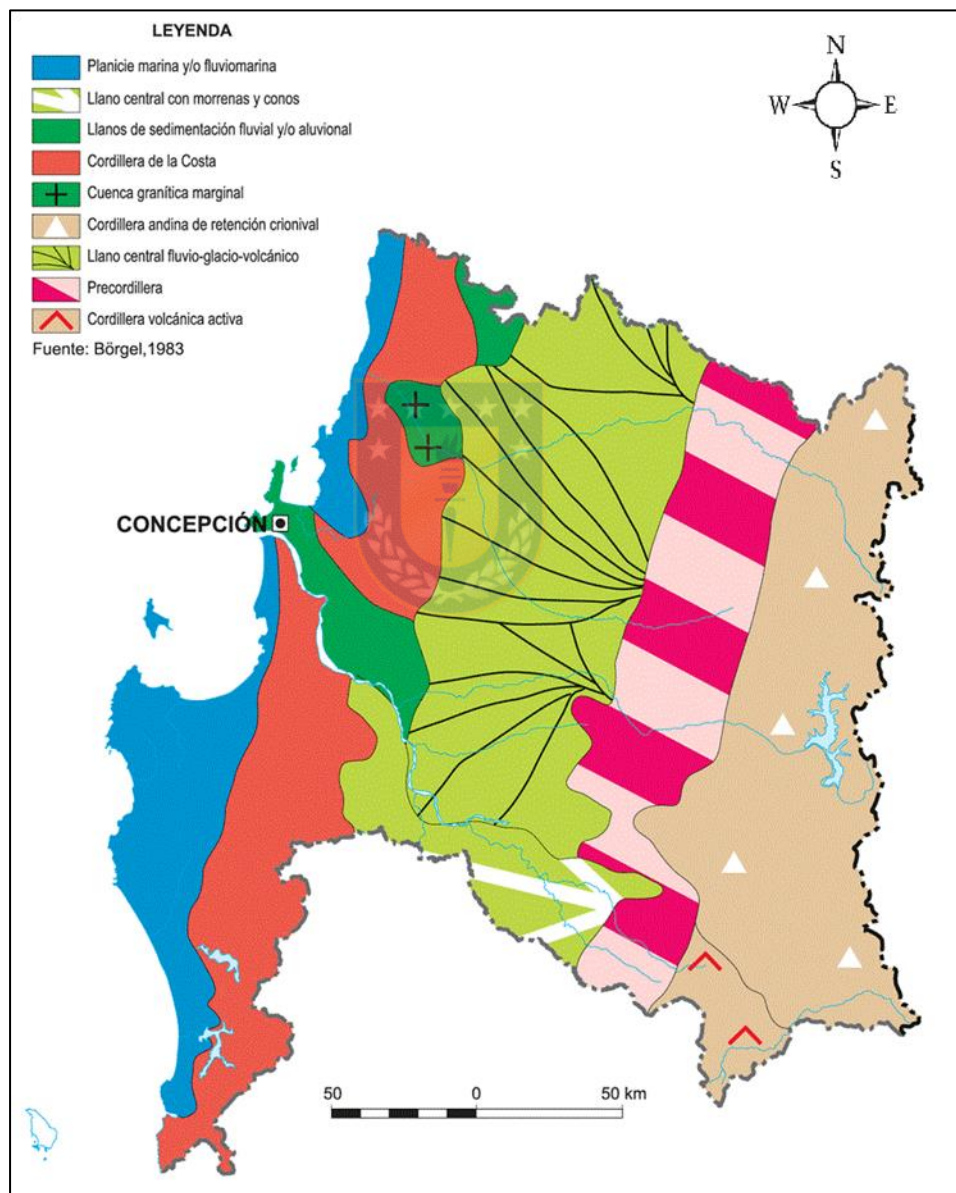
La vegetación en la región es caracterizada por praderas de pastos y arbustos en alternancia con bosques, los que se desarrollan preferentemente a lo largo de los cursos de agua. Las especies más representativas son (desde la costa al interior): chagual, doca, maqui, murtilla y culén, además de diversos tipos de helechos. Entre los arbustos autóctonos hay robles, lingues, laureles, boldos y avellanos.

Por su lado, la fauna posee especies características como el sapo de rayas amarillas, cisne de cuello negro, pudú, puma, monito del monte, guiña y coipo. Estas son difíciles de encontrar dada la alta actividad urbana e industrial del lugar. Entre las aves se observa la gaviota dominicana, gaviota de Franklin, pelícano, chicol, carpintero y jote de cabeza negra (Matus & Novoa, 2006).

## 2. GEOMORFOLOGÍA

### 2.1. Geomorfología regional

En la Región del Biobío se distinguen cinco unidades geomorfológicas típicas de Chile (Börgel, 1983) que de este a oeste son: Cordillera de los Andes, Precordillera, Depresión Central, Cordillera de la Costa y Planicies Litorales (Figura 2.1).



**Figura 2.1:** Mapa Geomorfológico Región del Biobío. Modificado de Börgel, 1983.

### **- Cordillera de los Andes:**

Se despliega como cordones montañosos de 2.000 m s.n.m. en promedio y sus cimas más elevadas superan los 2.500 m s.n.m. perdiendo altura hacia el sur (estos puntos más altos equivalen a cimas de volcanes). Diversos cursos de agua la cortan constituyendo una gran cantidad de valles.

### **- Precordillera:**

Es la unión entre la Cordillera de los Andes y la Depresión Intermedia. Sus alturas pueden variar entre 400 y 600 m s.n.m. Posee un relieve de laderas abruptas y ríos fuertemente encajonados. Su génesis corresponde a una acumulación caótica de materiales glaciovolcánicos y fluviales (Borgüel, 1983).

### **- Depresión Intermedia:**

Se caracteriza por tener una topografía uniforme y se extiende desde los pies de la Precordillera hasta la Cordillera de la Costa. Corresponde a una llanura de unos 150 m s.n.m. de altitud media que hacia el sur del Río Biobío se torna más ondulada. Su ancho disminuye al sur de la región.

### **- Cordillera de la Costa:**

Esta unidad presenta dos sectores cordilleranos, uno al norte y otro sur del Río Biobío. Al norte se caracteriza por poseer alturas bajas de alrededor de los 400 m s.n.m., de forma ondulada y con cuencas de reducido tamaño. Hacia el sur del Río Biobío, se dispone como un macizo rocoso de más de 1.500 m s.n.m. y se le denomina Cordillera de Nahuelbuta, la que representa un elemento físico regional de doble importancia ya que actúa como dispersor de aguas que alimentan pequeños ríos que drenan al Océano Pacífico, y también como biombo climático para el territorio ubicado hacia el este, por lo que se observan grandes diferencias climáticas entre el oriente y occidente de este macizo rocoso. Se identifica por un eje norte-sur, en el que la parte oriental corresponde a la ribera del Río Biobío con pendientes más abruptas que la occidental, ya que esta última termina en las planicies litorales.

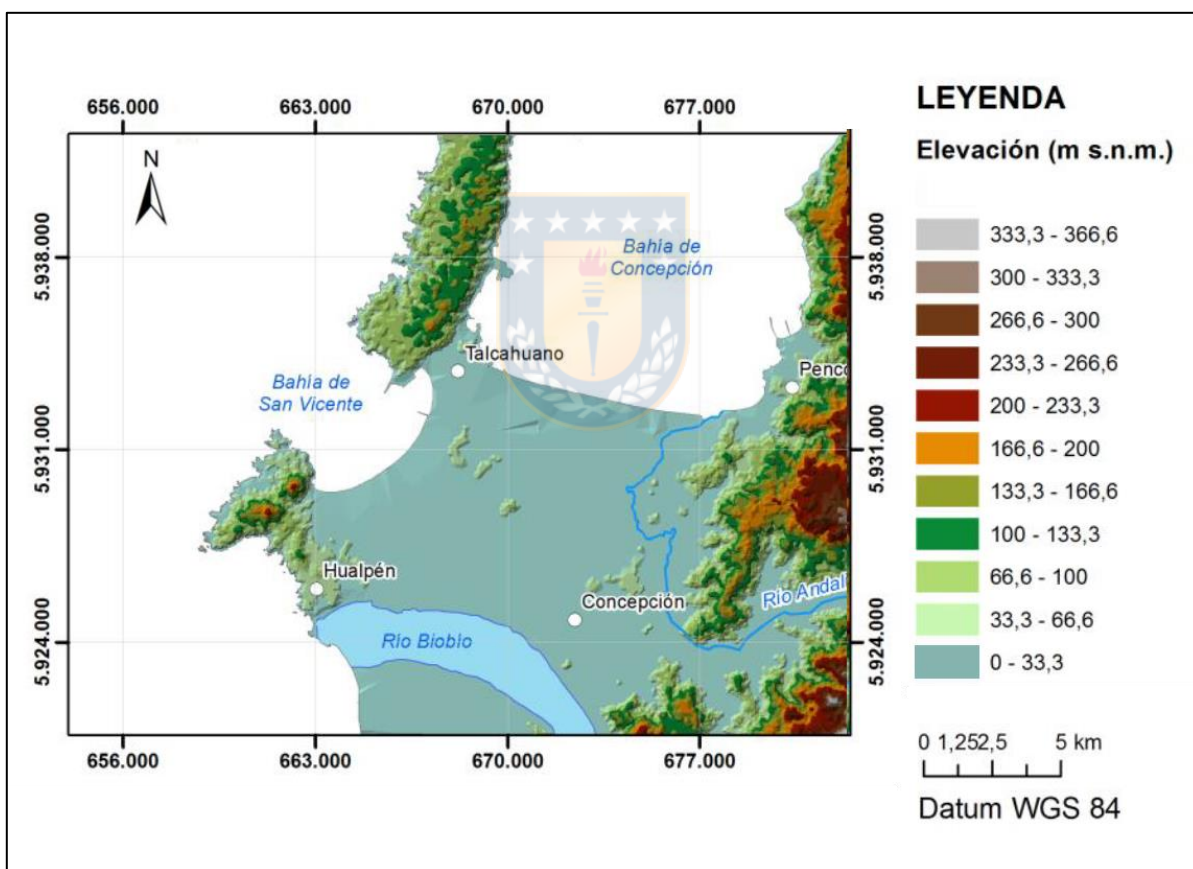


### - Planicie Litoral:

En el norte de la región tienen formas de acantilados alternado con algunas playas, hacia el sur del Río Biobío adquieren un amplio desarrollo en forma de terrazas marinas, las cuales, en la desembocadura del mismo constituyen una llanura inundable.

## 2.2. Geomorfología local

El área de estudio posee un relieve caracterizado por terrazas de abrasión marina y una extensa llanura al lado occidental de la Cordillera de la Costa, todo esto ante la aparición de importantes cerros islas que configuran su topografía (Figura 2.2).



**Figura 2.2:** Mapa de elevación de las comunas de Talcahuano y Hualpén. Información obtenida de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, 2017.

Terrazas de abrasión marina alternadas al W entre las bahías de Concepción y de San Vicente, con altitudes máximas de 240 m, compuestas de roca granítica, esquistos y filitas de la serie

Metamórfica Oriental y rocas sedimentarias fuertemente meteorizadas. Las edades de estas rocas son Paleozoica y Cretácico Superior-Eoceno respectivamente (Gajardo, 1981).

Al E con pendientes inferiores a 1° se encuentra, entre el Río Andalién y el Río Biobío, una extensa llanura fluvio-marina con altitudes menores a 10 m s.n.m. Esta se habría modelado sobre una fosa de origen tectónico y su composición corresponde a arenas de origen volcánico aportadas por erupciones del Volcán Antuco que posteriormente fueron transportadas hasta la costa (Mardones & Jaque, 1991). Sobre esta se han inscrito a lo menos dos paleocanales del Río Biobío. El más antiguo hacia la Bahía de Concepción y otro, más reciente, en la Bahía de San Vicente. Este último infrayace a dos generaciones de dunas las cuales son generadas por efecto del viento que arrancan material desde lugares que han sido afectados por inundaciones de ríos principalmente (Río Andalién y Río Biobío) y los acumulan en diversos sectores. Estas han consolidado la línea de costa funcionando como contención tanto a fenómenos naturales como a crecidas de ríos. La depositación de sedimentos del Río Biobío en un ambiente deltaico es la responsable de la formación de estas salidas del río a la costa en los inicios de una importante transgresión marina al Tardiglaciario (CIER-SERPLAC, 1977). De la llanura emergen cerros islas estructurados en rocas sedimentarias de Eoceno, cuyas altitudes se encuentran entre 60 y 95 m (Gajardo, 1981), estos corresponden a bloques tectónicos basculados, limitados al sur por fallas normales con pendientes abruptas (Quezada *et al.*, 2007).

### 3. GEOLOGÍA

#### 3.1. Geología regional

En la región afloran rocas metamórficas e intrusivas del Paleozoico Superior, rocas intrusivas mesocenoicas y rocas sedimentarias triásicas y del Cretácico al Terciario. Además de una gran cantidad de depósitos cuaternarios.

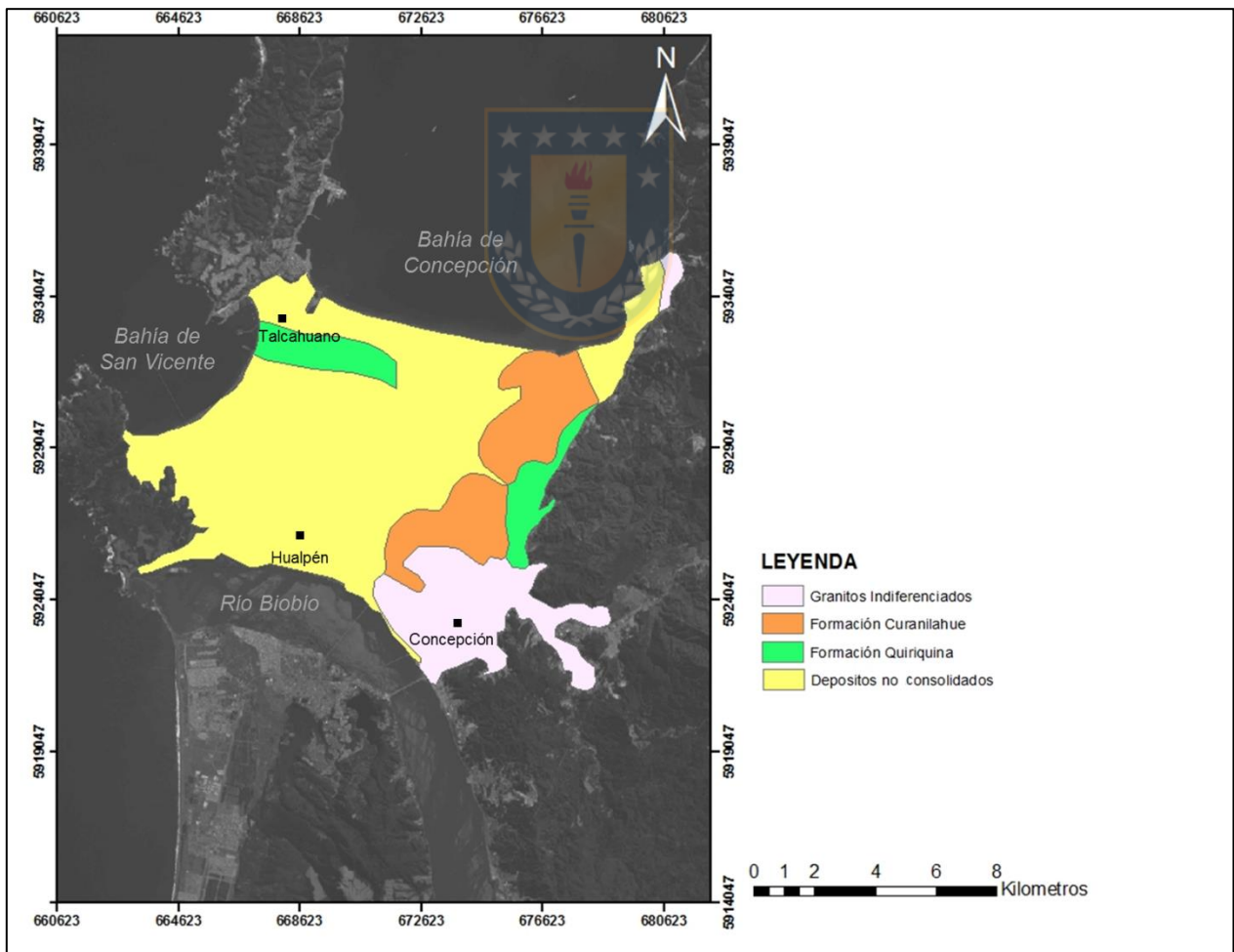
El complejo metamórfico se subdivide en dos, Serie Occidental y Serie Oriental, diferenciándose entre ellas en cuanto a condiciones de metamorfismo, litología, protolito y asociaciones mineralógicas (Aguirre *et al.*, 1972; Hervé, 1977; Hervé *et al.*, 2007). La Serie Occidental se compone de metagrauvas altamente deformadas con intercalaciones de metabasitas y en menor proporción esquistos azules, serpentinitas y metachert. Los protolitos representan rocas detríticas siliciclásticas provenientes de la corteza continental y fragmentos de corteza oceánica superior. Esta serie refleja un metamorfismo de alto P/T, situándose en la facie de esquistos verdes a esquistos azules; facies que se habrían producido por una acreción basal seguida por una exhumación contemporánea al evento anterior (Willner, 2005). La Serie Oriental se caracteriza por un metamorfismo de bajo P/T, componiéndose principalmente por metagrauvas, filitas, pizarras, esquistos y en menor medida rocas calcosilicatadas y gneises migmatítico. El metamorfismo que se observa corresponde a facies de esquistos verdes, anfíbolita y en menor proporción granulito. Estas tienen como protolito en común una secuencia turbidítica de ambiente marino profundo (Cartes, 2004; Hervé *et al.*, 2007). Esta última, presenta sus estructuras sedimentarias bien preservadas, como es el caso de la estratificación (S0), la que se distingue con bastante claridad entre metarenitas con filitas y/o pizarras (Vásquez, 2001). El estilo de deformación de las rocas representa una retro-cuña débilmente deformada producto de un metamorfismo regional relacionado a una acreción frontal (Hervé *et al.*, 2007).

La mayor parte de las rocas intrusivas presentes en la región tienen edad paleozoica, las cuales constituyen el denominado Batolito Costero del Sur (Hervé *et al.*, 1987), y su litología varía de tonalita a granodiorita cuyas edades han sido datadas entre 295 y 305 Ma. (Hervé, 1976; Glodny *et al.*, 2008). Estas a su vez intruyen al Basamento Metamórfico.

En cuanto a las sucesiones sedimentarias, corresponden a diversas secuencias siliciclásticas, marinas y continentales, cuyas edades se extienden desde el Cretácico Superior al Reciente, entre las cuales se encuentran Formación Quiriquina, Formación Cerro Alto, Formación Cosmito, Formación Pilpilco, Formación Curanilahue, Formación Boca Lebu, Formación Trihueco, Formación Millongue, Formación Ranquil, Formación Tubul, Formación Andalién, Formación Huachipato y depósitos no consolidados (Cecioni *et al.*, 1997).

### 3.2. Geología local

En el área de estudio afloran rocas cuyas edades van desde el Cretácico al Holoceno. Estas unidades se dividen en Granitos Indiferenciados, Rocas estratificadas (Formación Quiriquina y Formación Curanilahue) y depósitos no consolidados (Figura 3.1).



**Figura 3.1:** Mapa geológico del área de estudio. Modificado de SERNAGEOMIN, 2003.

### 3.2.1. Granitos Indiferenciados

Abarca toda la Cordillera de la Costa al norte del Río Biobío y su flanco oriental, al sur del mismo río. Data de una edad Carbonífero-Pérmico (Hervé *et al.*, 1988). Se reconoce como un conjunto de rocas intrusivas compuesta por dioritas, monzodioritas, granodioritas y monzogranitos, que se presentan en pequeños afloramientos. Macroscópicamente poseen una textura fanerítica de grano grueso de color gris claro en superficie fresca y pardo amarillento en superficie alterada, con fenocristales de microclina, biotita y muscovita. En general poseen un alto grado de alteración.

### 3.2.2. Rocas estratificadas

#### 3.2.2.1. Formación Quiriquina

Definida en la isla homónima situada en las cercanías de Talcahuano, al norte de la Península de Arauco. Consiste en un conglomerado de espesor variable que infrayace a arcosas y subarcosas en tonos verdosos, fosfática, glauconítica y muy fosilífera; en su mayoría bivalvos, gasterópodos, cefalópodos, peces y polen. En un ambiente de depositación marino somero (Biró-Bagóczy, 1982).

En ciertos tramos la presencia del *Eubaculites carinatus* está asociada a *Menuites fresvillensis* considerado fósil guía de la parte inferior del Maastrichtiano superior, así también, en otras zonas *Kitchinites (K.) darwini darwini* se vincula al *Eubaculites carinatus*, estableciendo una edad probable que va desde la parte media a superior del Maastrichtiano superior. En definitiva, de acuerdo a los antecedentes de biozonaciones, se sugiere una edad Maastrichtiano superior para esta formación (Salazar, 2004). En la zona, se reconocen, *Myliobatis* sp., *Carcharias* sp., *Carcharias samhammeri* y *Striatolamia macrota*. Para esta última especie, Cappetta (1987) designa una edad Thanetiano – Eoceno superior. En base a lo anterior, a la Formación Quiriquina se le asigna una edad Maastrichtiano superior – Paleoceno.

Aflora principalmente en los alrededores de la ciudad de Concepción y Talcahuano con una potencia aproximada de 50 m. Se dispone en inconformidad sobre el Basamento Paleozoico e infrayace a la Formación Curanilahue en paraconformidad.

### **3.2.2.2. Formación Curanilahue**

Definida en el sector de Curanilahue (Muñoz, 1956). Está compuesta por tres miembros, agrupados en 400 m: Miembro Lota, basal, esencialmente continental, constituido por areniscas, conglomerados finos y mantos de carbón (Mendoza, 2001); Miembro Intercalación, corresponde a un ambiente marino y está conformado por areniscas verdes fosilíferas; Miembro Colico, caracterizado por conglomerados, areniscas finas y gruesas, y lutitas con intercalaciones de mantos de carbón, indicando un origen continental. Esta formación sobreyace a la Formación Quiriquina y su edad es Eoceno inferior (Pineda, 1983). Se puede considerar equivalente a la Formación Cosmito, definida en el área de Concepción (Salazar, 2004) y a la Formación Cerro Alto definida por Frutos & otros (1982).

### **3.2.3. Depósitos no consolidados**

Estos corresponden a las unidades sedimentarias más recientes. Se distribuyen principalmente en la parte oeste del área de estudio, abarcando un gran porcentaje de esta.

Son sedimentos sin compactación derivados de rocas sometidas a meteorización, donde los granos que forman los depósitos presentan un comportamiento totalmente independiente entre sí.

Una de las principales características de estos es que son constantemente afectados por procesos dinámicos característicos de zonas costeras y continentales. Esto, sumado al bajo grado de compactación y su depositación horizontal, permite asignar una edad Holocena a estos depósitos.

De acuerdo a su ambiente depositacional se dividen en depósitos litorales, depósitos fluviales y depósitos de remoción en masa.

#### **3.2.3.1. Depósitos litorales**

Estos se encuentran en todas las playas del área de estudio. En su mayoría corresponden a arenas de textura madura y de tamaño medio a grueso, colores que varían desde el castaño a gris oscuro, clastos angulosos a muy redondeados e inmaduros mineralógicamente; compuestos hasta en un 50% de magnetita, basaltos, plagioclasa y olivino (Galli, 1967).

Su origen está relacionado a procesos de meteorización, glaciación, volcanismo, erosión y sedimentación. Estos depósitos se dividen en dos tipos. Por una parte se han reconocido arenas silíceas que corresponden a sedimentos clásticos compuestos principalmente de cuarzo, feldespatos, micas, líticos y arcilla (Mendoza, 2011). Por otra parte, arenas titaníferas provenientes de la meteorización de rocas principalmente metamórficas e ígneas, las cuales han sido transportadas principalmente por cauces fluviales que posteriormente son reconcentrados por el oleaje (Collao *et al.*, 2000).

### **3.2.3.2. Depósitos fluviales**

Constituidos por sedimentos que se acumulan a partir de la actividad de los ríos, particularmente en el área de estudio estos corresponden al Río Andalién y el Río Biobío. En el Río Andalién, la baja madurez textural y mineralógica está determinada por el hecho de que este cauce se origina en la Cordillera de la Costa, desde donde circula, escurriendo sobre las rocas intrusivas y metamórficas del sector. Estos depósitos derivan directamente de la erosión de dichos afloramientos. Las arenas que transporta el Río Biobío son muy similares en composición a las arenas negras de playa encontradas en la zona pero con textura submadura y con una selección diferente, transportando en su mayoría fragmentos de basaltos, magnetitas, plagioclasas y cantidades menores de hematita, vidrio volcánico, mica, olivino, epidota, augita, hipersteno, apatito, hornblenda y cuarzo. El origen de estas arenas es en su mayoría material proveniente de la Cordillera de los Andes y las unidades que contribuyen con esa cantidad de detritos son los basaltos andinos de diversas edades. Posteriormente el río distribuye estos sedimentos a lo largo de su cauce y en las playas en donde desemboca, los cuales son transportados a través de las corrientes costeras, y acumulados por el oleaje en las playas cercanas al río (Galli, 1967).

### **3.2.3.3. Depósitos de remoción en masa**

Estos depósitos están constituidos por partículas muy mal seleccionadas, con matriz en general de arcilla y arena, además de clastos angulosos de diversos tamaños y con alta angularidad. Todas estas características son atribuibles al poco transporte al que han sido sometidas estas masas de tierra.

El origen de estos movimientos se asocia a fracturas, diaclasas y/o meteorización de la roca, generando inestabilidad en ellas, que unido a la acción de la gravedad y las precipitaciones intensas, desencadenan estos procesos. Se distribuyen en su mayoría en diversas quebradas y taludes. Su ocurrencia tiene lugar tanto en zonas de alta pendiente, como en sectores de pendiente moderada, donde se observan deslizamientos superficiales que involucran el movimiento del suelo y de la cubierta vegetal. El material deslizado da origen a flujos que pueden alcanzar distancias del orden de decenas de metros.

Los depósitos de remoción en masa dentro de la zona de estudio se producen en las unidades sedimentarias, debido a la composición de estas y su localización principalmente en laderas, hacen que sean muy comunes estos movimientos de tierra. Por otro lado, los procesos de remoción en masa que afectan a las rocas intrusivas del sector se asocian a una inestabilidad generada por diaclasas y fracturas presentes en estas, lo que permite la infiltración del agua, ejerciendo así presiones positivas en ellas. Todo esto sumado al alto grado de meteorización de estas unidades, llegan a desestabilizar la ladera y desencadenar la remoción.





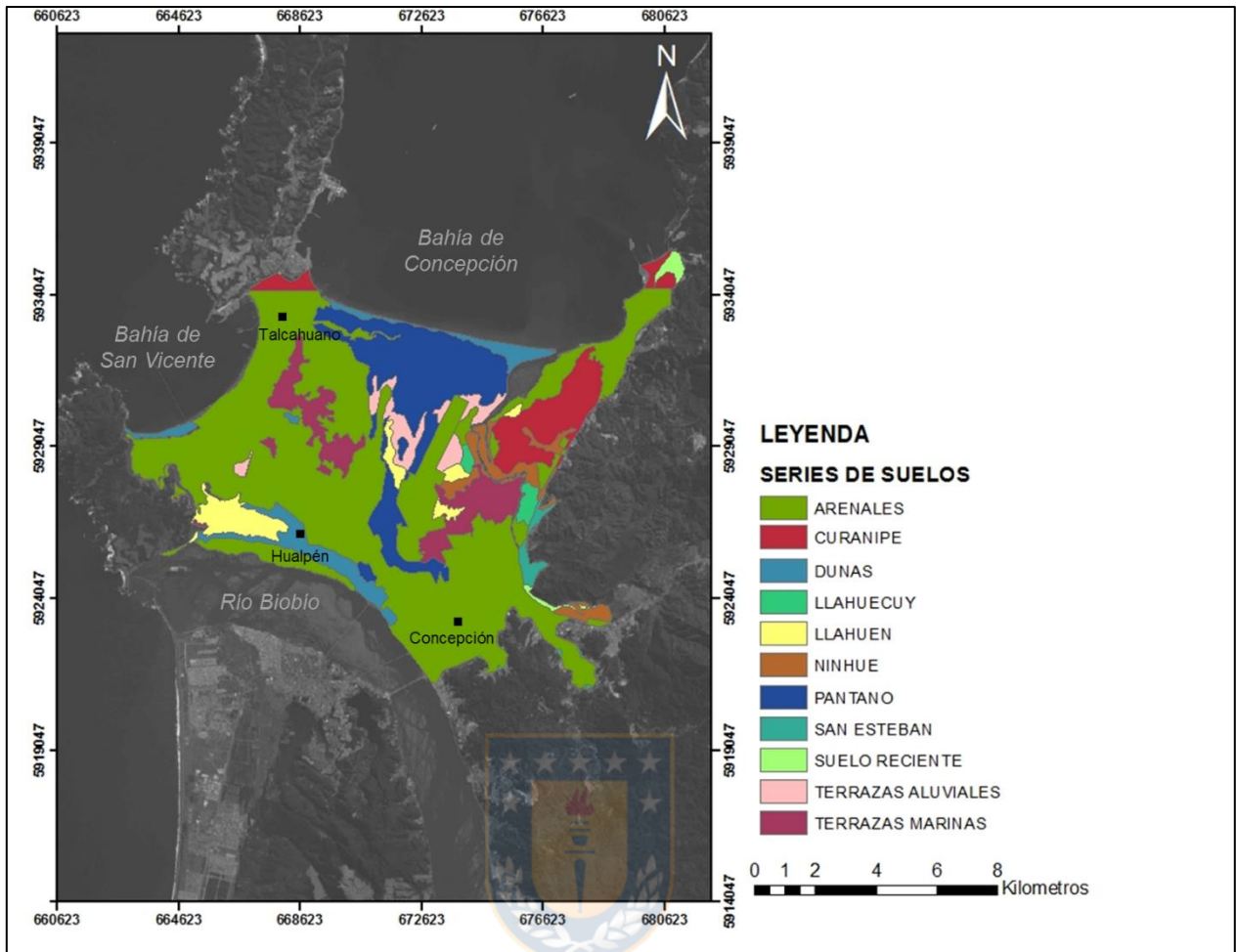
## 4. SUELOS

Los suelos tienen una distribución natural en el paisaje por la geomorfología, la forma e intensidad con que han interactuado factores como el clima, organismos, relieve, roca madre y sobre todo el tiempo. Éstos últimos han definido procesos de formación de los suelos, cuyos efectos finales se aprecian a través de las propiedades que exhiben estos mismos (Martínez *et al.*, 2004).

### 4.1. Series de suelos

Constituyen la categoría jerárquica más detallada en un sistema de clasificación de suelos, donde cada una de estas series es representada por un conjunto diferente de características físicas, químicas y mineralógicas. Cada parte de una misma serie posee propiedades y características similares, en general son homogéneas de génesis específica con reacciones compartidas para el uso y manejo de éste. Estas propiedades varían dentro de un intervalo estrecho definido. El horizonte superficial y rasgos como la pendiente, la pedregosidad, el grado de erosión y la posición topográfica pueden variar en una misma serie, a excepción de que estos rasgos estén asociados a diferencias significativas.

En el área de estudio se definen y agrupan once series de suelo (Arenales, Curanipe, Dunas, Llahuecuy, Llahuen, Ninhue, Pantano, San Esteban, Suelos Reciente, Terrazas Aluviales y Terrazas Marinas), que configuran el mapa de la Figura 4.1. Todas estas son descritas según el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN, 1999).



**Figura 4.1:** Mapa Series de Suelo del área de estudio. Elaboración propia. Información obtenida de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, 2017.

### Serie Arenales (ARN)

Arenosa. Son suelos de origen aluvial, reciente, profundo, de escaso desarrollo. De espesor entre 90 y 150 cm. Su composición granulométrica es 98,5% de arena, 1% de limo y 0,5% de arcilla. Es decir, corresponde casi en su totalidad a arenas. Su drenaje es predominantemente bueno a excesivo, siendo la permeabilidad rápida a muy rápida. Posee un escurrimiento superficial lento; alrededor de un 50% de los suelos de esta serie presentan un nivel freático temporal, desde fines de otoño hasta mediados de primavera, a profundidades variables entre 70 y 120 cm que descienden durante el verano.

### **Serie Curanipe (CPE)**

Franco arcillosa. Son suelos bien desarrollados a partir de meteorización de rocas metamórficas ricas en cuarzo y mica, que se encuentra ocupando una posición de plano remanente en un sistema de terrazas marinas, con una altitud que fluctúa entre los 25 y 250 m s.n.m. Poseen una topografía ondulada, con pendientes combinadas, susceptibles a la erosión de cárcavas. Texturas moderadamente finas a muy finas (32,9% de arena, 22,4% de limo y 44,7% de arcilla) y colores pardo rojizo y rojo oscuro en profundidad. Drenaje interno medio, externo bueno (Zelada & Maquire, 2005). En general tienen permeabilidad moderada en donde el espesor varía entre 65 y 120 cm.

### **Serie Suelos Recientes (R)**

Arenosa. Ocupa una posición baja dentro del paisaje circundante, escasamente elevada sobre el nivel del mar, superficies planas a casi planas con ondulación ligera y una posición geomorfológica de terrazas marinas recientes, constituidas por depósitos de arenas medias, de composición mixta andesítico-basálticas, estratificadas. Estos suelos poseen un color pardo oscuro en superficie. Tienen buen drenaje que puede llegar a ser imperfecto o pobre. Su espesor varía entre 65 y 120 cm, y su composición granulométrica corresponde a 98% de arena, 1% de limo y 1% de arcilla.

### **Serie San Esteban (STN)**

Son suelos evolucionados "in situ" a partir de materiales graníticos ricos en cuarzo, moderadamente profundos a profundos, bien drenados, que ocupan una posición de cerros y lomajes altos dominando el paisaje. Las pendientes en su mayoría son mayores al 10%; estas son muy pronunciadas hacia esteros, quebradas o cauces secos, pudiendo llegar a ser del 50% y más. El drenaje es bueno, la permeabilidad es lenta, especialmente cuando estos están erosionados y el escurrimiento superficial es bueno. El espesor de esta serie varía entre 75 y 135 cm. Su composición granulométrica es 63,7% de arena, 14,3% de limo y 22% de arcilla.

### **Serie Dunas (D)**

Suelos arenosos de topografía ondulada pero que han sido estabilizados y/o mantienen una cubierta herbácea pobre. Su composición granulométrica es 97,8% de arena, 1,4% de limo y 0,8% de arcilla. Es decir, en general corresponden a arenas sueltas de composición andesítico-basálticas de profundidad moderada (entre 65 y 105 cm.). Poseen drenaje bueno y escurrimiento superficial malo.

### **Serie Llahuecuy (LHY)**

Son suelos profundos, con drenaje bueno (en algunos sectores el drenaje es muy bueno), que se presentan en una topografía casi plana en las terrazas aluviales en el sector y poseen color pardo rojizo oscuro. Poseen textura franco arenosa y arenosa fina en profundidad. La permeabilidad es buena y el escurrimiento superficial es malo. El espesor varía entre 130 a más de 150 cm. Su composición granulométrica equivale a 77,6% de arena, 21,2% de limo y 1,2% de arcilla.

### **Serie Llahuen (LHN)**

Suelos profundos, de buen drenaje y que se encuentran sobre un substrato aluvial de gravas con matriz arenosa que se presenta por debajo de los 150 cm. Son derivados de cenizas volcánicas con una mezcla elevada de materiales aluviales, de color pardo oscuro y textura franco limosa. Poseen una permeabilidad moderada y escurrimiento superficial malo. El espesor del suelo corresponde a 135 cm. Su composición granulométrica es 30,9% de arena, 54,8% de limo y 14,3% de arcilla.

### **Serie Ninhue (NNH)**

Serie característica de suelos aluviales, profundos, de drenaje imperfecto, formados bajo condiciones de humedad excesiva a partir de materiales graníticos depositados en llanuras de inundación. Su topografía es plana, aunque en algunos sectores se encuentra ligeramente inclinada. La permeabilidad es lenta y el escurrimiento superficial moderado. El espesor del suelo varía entre 110 a 150 cm. Texturalmente son una mezcla de arena, limo y arcilla (18,9%, 50,7% y 30,4% respectivamente).

### **Serie Pantano (MP)**

Terrenos húmedos, de topografía plana y ligeramente cóncava, nivel freático cercano a la superficie durante todo el año, la vegetación es hidromórfica. Estos terrenos pueden presentar periodos sin agua en los meses de verano. Poseen sucesivas acumulaciones de materia orgánica de muy lenta descomposición. La composición granulométrica corresponde a 25% de arena, 52% de limo y 23% de arcilla. En el suelo de esta serie predomina el desarrollo de la vida silvestre, sin embargo, en los últimos años se han habilitado algunos sectores en el área de estudio para la instalación de industrias, viviendas y centros comerciales (previo relleno y consolidación de este).

### **Serie Terrazas Aluviales (TAL)**

Franco Arenoso (56% de arena, 36% de limo y 8% de arcilla). Suelos estratificados ubicados en terrazas recientes de ríos o esteros. Poseen pendientes inferiores al 2%. En donde la mayoría de estos suelos tiene un drenaje pobre y un escurrimiento superficial moderado. Existen también terrazas aluviales remanentes relacionadas a cursos secundarios de agua.

### **Serie Terrazas Marinas (TMA)**

Suelos producto de la acción erosiva del mar, la cual va desgastando la costa hasta formar una plataforma de abrasión. Mediante transgresiones y alzamientos, la plataforma de abrasión queda expuesta dando origen a una nueva terraza marina (Quezada *et al.*, 2007). Poseen un drenaje moderado y un escurrimiento superficial moderado a rápido. El espesor del suelo varía entre 50 a 120 cm y su composición granulométrica corresponde a 20% de arena, 50% de limo y 30% de arcilla.

## **4.2. Características hidráulicas de suelos**

Las características hidráulicas de cada serie de suelo se determinan sobre la base de los datos granulométricos de cada una de ellas (CIREN, 1999). Es decir, el porcentaje ponderado de arena, limo y arcilla permite calcular los diferentes parámetros hidráulicos:

- Punto de Marchitez (PM): grado de humedad cuando las plantas no pueden absorber más agua. Corresponde al límite inferior del agua disponible (AD). Se expresa en volumen de agua/volumen de suelo.
- Capacidad de Campo (CC): grado de humedad en el suelo al momento en que ha perdido agua gravídica, es decir, cantidad de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje. El término se expresa en volumen de agua/volumen de suelo.
- Agua Disponible (AD): cantidad de agua disponible para el crecimiento de las plantas. Es la diferencia entre CC – PM. Se expresa como volumen de agua/volumen de suelo.
- Grado de Saturación o Grado de Humedad (GS): peso de agua en una muestra respecto al peso seco de la muestra seca.
- Densidad Aparente (DA):  $DA = (1 - GS) * 2,65$  (Factor equivalente a la densidad real promedio de las distintas partículas presentes en el suelo). Corresponde a masa del suelo por unidad de volumen total, se utiliza para determinar la porosidad del suelo. Se expresa en  $gr/cm^3$ .
- Conductividad hidráulica saturada o permeabilidad (CHS): medida de la habilidad de un suelo, en condiciones saturadas, de permitir el paso de agua en su interior bajo un gradiente de potencial hidráulico (Custodio, 1983), el cual se considera vertical para los cálculos realizados (Saxton *et al.*, 1986). Se expresa en cm/h.

Para la zona de estudio, estos valores se representan en la Tabla 4.1, los cuales se obtienen utilizando la “Calculadora de Propiedades Hidráulicas” del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (Saxton *et al.*, 1986).

**Tabla 4.1:** Características hidráulicas de las series de suelo pertenecientes a la zona de estudio. (ARN: Arenales, LHY: Llahuecuy, LHN: Llahuen, NNH: Ninhue, STN: San Esteban, D: Dunas, R: Suelos Recientes, CPE: Curanipe, TAL: Terrazas Aluviales, TMA: Terrazas Marinas, MP: Pantano).

	ARN	LHY	LHN	NNH	STN	D	R	CPE	TAL	TMA	MP
Punto de marchitez ( $cm^3$ agua/ $cm^3$ suelo)	0,03	0,05	0,1	0,17	0,14	0,03	0,03	0,25	0,09	0,17	0,11
Capacidad de campo ( $cm^3$ agua/ $cm^3$ suelo)	0,08	0,14	0,27	0,33	0,23	0,08	0,08	0,37	0,21	0,33	0,29
Densidad aparente ( $gr/cm^3$ )	2,06	1,88	1,45	1,31	1,44	2,06	2,06	1,28	1,55	1,31	1,39
Saturación ( $cm^3$ agua/ $cm^3$ suelo)	0,22	0,29	0,45	0,51	0,46	0,22	0,22	0,52	0,42	0,51	0,48
Conductividad hidráulica saturada (cm/hr)	19,84	7,85	2,18	0,48	0,56	19,84	19,84	0,17	2,65	0,48	1,36
Agua disponible ( $cm^3$ agua/ $cm^3$ suelo)	0,06	0,1	0,17	0,17	0,09	0,06	0,06	0,13	0,12	0,16	0,17

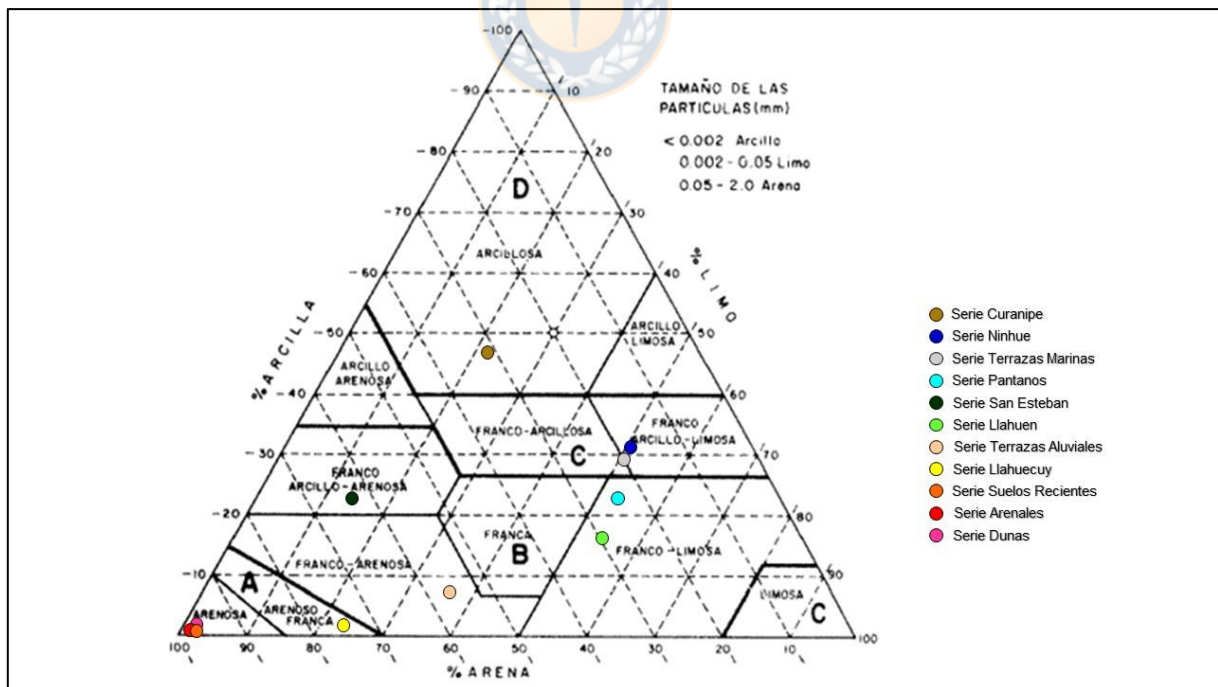
### 4.3. Grupos hidrológicos de suelos

Cada serie se clasifica en grupos hidrológicos, los cuales tienen diferencias de escorrentía superficial en base a la litología, estructuras, texturas, contenidos de humedad, permeabilidad, etc. La pertenencia a cada grupo es determinada en base a la fracción de arena, limo y arcilla que presentan (Tabla 4.2).

**Tabla 4.2:** Series de suelo y porcentaje de granulometría. Estudio Agrológico VIII región. CIREN, 1999. (ARN: Arenales, LHY: Llahuecuy, LHN: Llahue, NNH: Ninhue, STN: San Esteban, D: Dunas, R: Suelos Recientes, CPE: Curanipe, TAL: Terrazas Aluviales, TMA: Terrazas Marinas, MP: Pantano).

	ARN	LHY	LHN	NNH	STN	D	MP	R	CPE	TAL	TMA
2-0,05 cm	98,5	77,6	30,9	18,9	63,7	97,8	25,0	98,0	32,9	56,0	20,0
0,05-0,002	1,0	21,2	54,8	50,7	14,3	1,0	52,0	1,0	22,4	36,0	50,0
<0,002 cm	0,5	1,2	14,3	30,4	22,0	0,8	23,0	1,0	44,7	8,0	30,0

Con las fracciones granulométricas de cada serie, se clasifica cada una en los distintos grupos hidrológicos (USDA, 1964), de los cuales todos los tipos (A, B, C y D) están presentes en el área de estudio (Figura 4.2).



**Figura 4.2:** Triángulo de texturas correspondientes a las series de suelo del área de estudio.

**Grupo A:** Suelos con baja escorrentía y alta infiltración. Tienen una textura arenosa en profundidad a areno-limosa con drenaje perfecto y muy rápida infiltración. Pertenecen a este grupo las series Arenales, Llahuecuy, Dunas y Suelos Recientes.

**Grupo B:** Suelos poco profundos depositados por el viento con escorrentía rápida e infiltración alta. De textura franco-arenosa con drenaje bueno a moderado. Este grupo en el área de estudio está caracterizado por la serie Llahuen, San Esteban, Pantano y Terrazas Aluviales.

**Grupo C:** Suelos con bajo contenido orgánico y alto contenido de arcilla. Suelos expansivos de alta escorrentía y poca infiltración (baja permeabilidad). Textura muy arcillosa altamente plástica con drenaje imperfecto. En este grupo se enmarcan las series Terrazas Marinas y Ninhue.

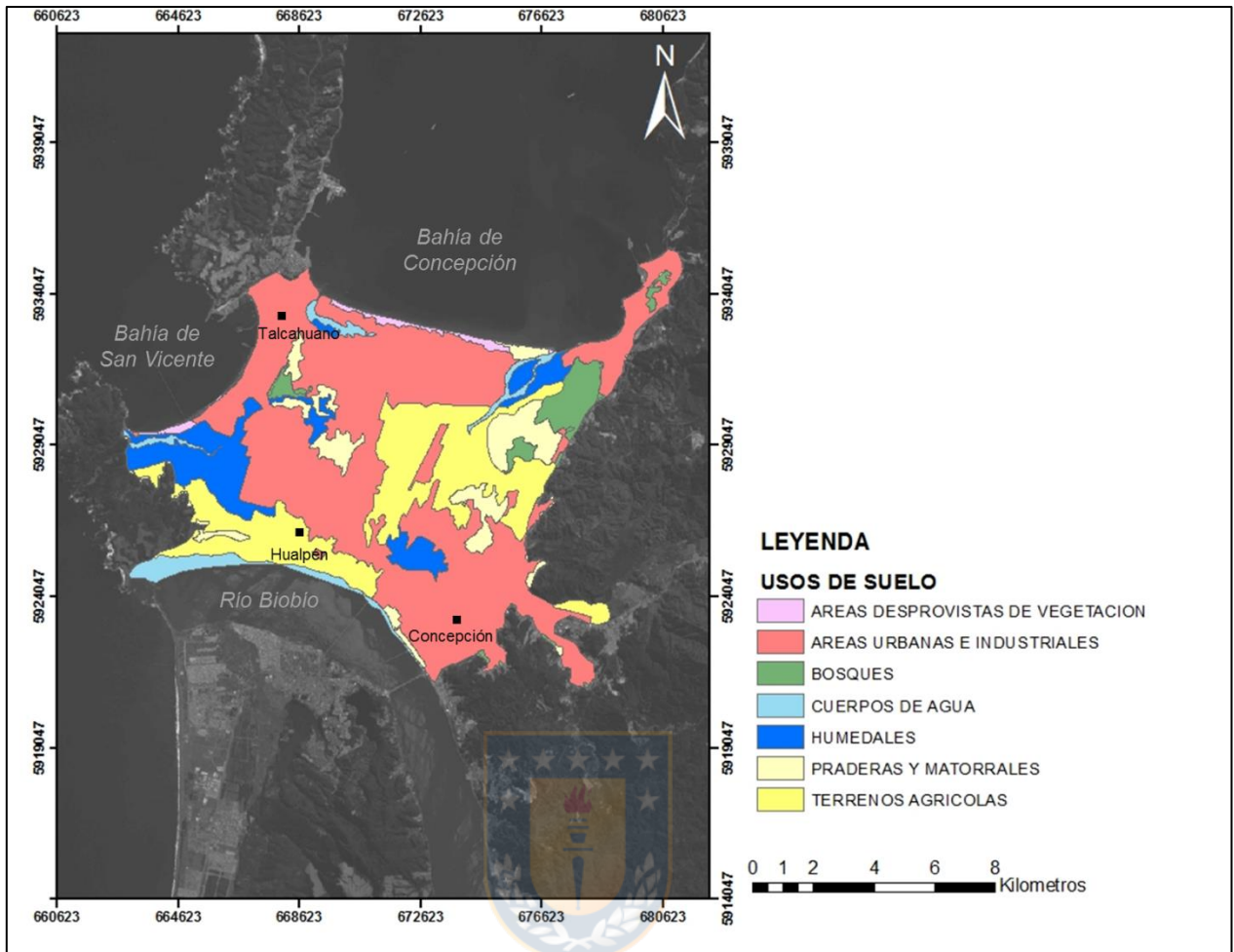
**Grupo D:** Suelos expansivos, alta escorrentía y casi nula infiltración (muy baja permeabilidad). Textura muy arcillosa altamente plástica con drenaje pobre a muy pobre. En este grupo se enmarca la serie Curanipe.

#### 4.4. Usos de suelos

El uso de suelo en particular depende de las propiedades hidrológicas del terreno. Estas tienen una gran influencia sobre la escorrentía superficial y son, entre otras, las tasas de infiltración y escorrentía (Ward y otros, 2004). La infiltración está condicionada por varios factores, como las propiedades del terreno (posición en la pendiente y ondulación) y otros propios del mismo, como textura, estructura, contenido de agua precedente, tamaño y continuidad de poros y cobertura vegetal (Terlien, 1998; Lal & Shukla, 2004). En general, un suelo seco tendrá una tasa de infiltración mayor que uno húmedo; poros que están mejor conectados hacen que esta se incremente. Diversos estudios han demostrado que las tasas de infiltración a menudo decrecen cuando la cobertura vegetal es escasa (Lee, 1980; Cerda, 1998; Mayor *et al.*, 2009, Turnbull *et al.*, 2010). Por su parte los usos asociados con actividades antrópicas, tales como agricultura, pastoreo y manejo forestal pueden afectar negativamente las tasas de infiltración y, de este modo, aumentar la escorrentía superficial, acelerando los procesos de erosión (Turnbull *et al.*, 2010).

En Talcahuano y Hualpén principalmente el uso del suelo pertenece a áreas urbanas e industriales (56%), terrenos agrícolas (21%), humedales (9%), praderas y matorrales (8%), bosques (4%), cuerpos de agua (1%) y áreas desprovistas de vegetación (1%) (Figura 4.3).





**Figura 4.3:** Mapa usos de suelo del área de estudio. Elaboración propia. Información obtenida de la Facultad Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, 2017.

## 5. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

La prospección geofísica es definida como un conjunto de técnicas físicas, matemáticas y geológicas aplicadas a la deducción de las condiciones del subsuelo a través de observación de propiedades físicas relacionadas con la estructura geológica del mismo (Donoso, 2011).

En este sentido, la aplicación de métodos geoelectricos exige el conocimiento previo de las propiedades eléctricas de rocas y minerales que componen el subsuelo, en específico para este caso se requiere del conocimiento de la resistividad de estos para realizar la prospección mediante Sondaje Eléctrico Vertical.

Con el fin de facilitar el estudio geofísico se asume que el subsuelo se compone de varias capas separadas entre sí por superficies con límites perfectamente planos, en donde cada una de ellas posee resistividad constante.

Entonces, es posible realizar una interpretación de la composición del subsuelo del área y compararla con sondajes o excavaciones realizadas en estudios anteriores.

### 5.1. Resistividad del suelo

La resistividad “ $\rho$ ” corresponde a la dificultad con la cual la corriente eléctrica se encuentra a su paso en un material determinado. La resistencia eléctrica “ $R$ ” de un conductor homogéneo está determinada por la resistividad del material que lo constituye, así como también por la geometría del conductor. Si se considera un conductor rectilíneo y homogéneo de sección “ $s$ ” y longitud “ $l$ ”, la resistencia eléctrica se define por la siguiente relación (Orellana, 1982):

$$R = \rho * l/s$$

Es decir, la resistividad se expresa por:

$$\rho = R * s/l$$

En donde la unidad de medida en el sistema internacional es ohm por metro ( $\Omega \cdot m$ ).

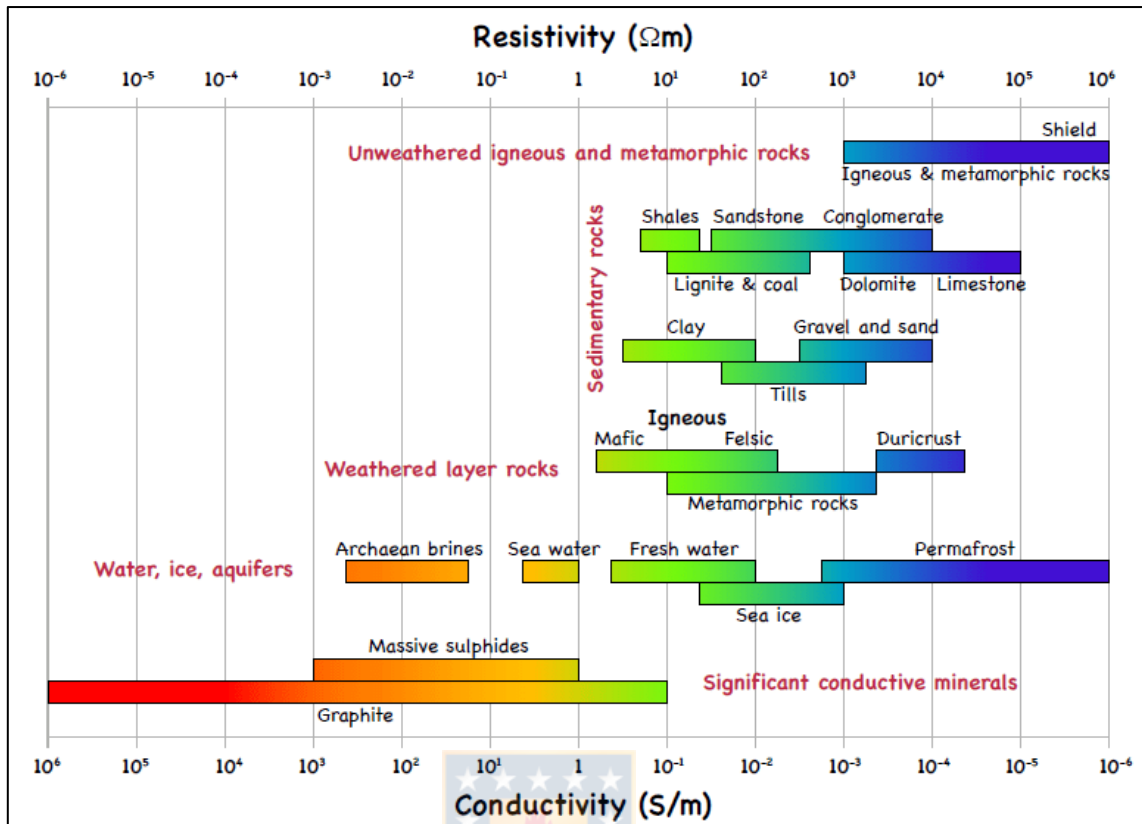
Por otro lado, se define la conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) como la facilidad con que la corriente puede atravesar un determinado material (inverso de la resistividad), su unidad de medida en el sistema internacional es el siemens (S) y se determina por la relación (Orellana, 1982):

$$\sigma = 1 / \rho$$

La resistividad de la mayoría de las rocas y sedimentos secos es elevada, por lo que actúan como semiconductores. Este comportamiento cambia drásticamente cuando las fisuras o los poros están ocupados por agua, generando una disminución de dicha resistividad. Esta resulta ser una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversas litologías, producto de que el comportamiento físico de las rocas dependerá de las propiedades y modo de agregación de sus minerales, de la forma, volumen y relleno de los poros, así como también de factores como temperatura, humedad y presión. Todos los “cuerpos” son eléctricamente conductores, ya que en alguna medida permiten el paso de cargas eléctricas (Orellana, 1982).

El agua pura resulta ser muy poco conductora debido a su reducida disociación. En el agua destilada, la resistividad es del orden de los  $10^5 \Omega \cdot m$  por lo que se considera aislante. Por su parte, las aguas presentes en la naturaleza son consideradas soluciones salinas y tienen por ende una resistividad apreciable que en lagos y arroyos de alta montaña varían entre los  $10^3 - 3 \times 10^3 \Omega \cdot m$ , en aguas subterráneas varía entre  $1 - 20 \Omega \cdot m$  y en aguas marinas posee un valor de  $0,2 \Omega \cdot m$  aproximadamente (Donoso, 2011).

Las propiedades eléctricas de las rocas y minerales varían sustancialmente dependiendo de si se miden in situ o en un laboratorio. Es prácticamente imposible simular condiciones reales en el laboratorio. Se puede intentar simular estas condiciones para obtener la mejor aproximación de los valores de resistividad y conductividad de “materiales geológicos” (Palacky, 1987). Según Palacky, una buena aproximación es la presente en la Figura 5.1. Por otro lado, los diferentes valores y rangos de resistividad y conductividad de rocas, suelos y agua se observan en la Tabla 5.1 (Keller & Frischknecht, 1966; Daniels & Alberty, 1966).



**Figura 5.1:** Rangos generales de variación de resistividades de distintos materiales geológicos. Modificado de Palacky, 1987.

**Tabla 5.1:** Resistividad y conductividad de diversos materiales geológicos. Modificada de Keller & Frischknecht, 1966; Daniels & Alberty, 1966.

Material	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Conductividad (S)
<b>Rocas ígneas y metamórficas</b>		
Granito	$5 \times 10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$
Basalto	$10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 10^{-3}$
Pizarra	$6 \times 10^3 - 4 \times 10^6$	$2 \times 10^{-8} - 1,7 \times 10^{-3}$
Mármol	$10^2 - 2,5 \times 10^8$	$4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Cuarcita	$10^2 - 2 \times 10^8$	$5 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
<b>Rocas sedimentarias</b>		
Arenisca	$4 - 8 \times 10^3$	$2,5 \times 10^{-4} - 0,125$
Esquistos	$2 - 20 \times 10^3$	$5 \times 10^{-4} - 0,05$
Limolita	$4 - 5 \times 10^3$	$2,5 \times 10^{-3} - 0,02$
<b>Suelos</b>		
Arcilla	1 - 100	0,01 - 1
Aluvión	10 - 800	$1,25 \times 10^{-3} - 0,1$
<b>Agua</b>		
Agua fresca	10 - 100	0,01 - 0,1
Agua de mar	0,2	5

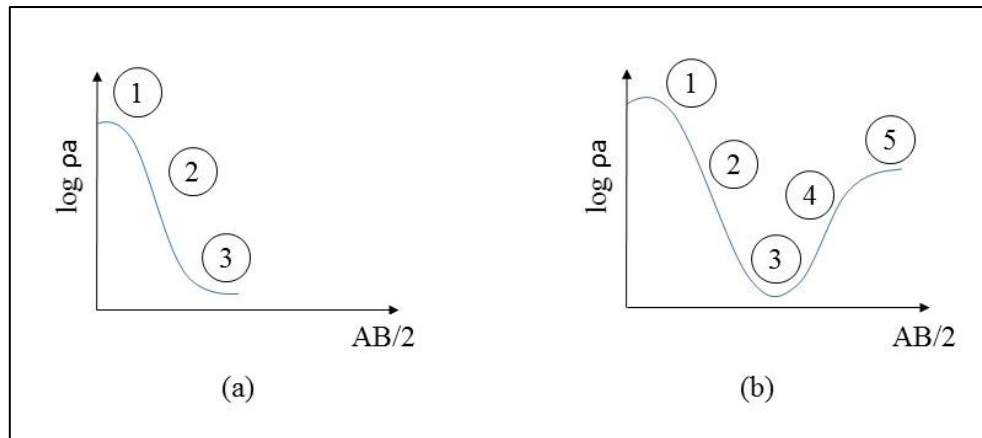
## 5.2. Sondeo eléctrico vertical

Como una base a la caracterización hidrogeológica del área se realiza un estudio de prospección geofísica con el método de Sondaje Eléctrico Vertical (SEV), estos fueron realizados por Aqualogy Medioambiente Chile S.A. en el año 2013. Este método de exploración eléctrica de una dimensión consiste en inyectar una corriente eléctrica, de intensidad conocida, a través de la tierra por medio de dos electrodos y medir la diferencia de potencial eléctrico con otro par de electrodos. La profundidad de investigación es directamente proporcional a la distancia entre los electrodos (AB) que se utilizan para inyectar corriente, por lo tanto, mientras mayor sea la distancia de separación, más profundidad alcanzará el sondaje.

Lo que se busca en general es la obtención de un modelo de variación de resistividad en función de la profundidad, a partir de mediciones realizadas en superficie.

Se parte del supuesto de que el medio en que se realizan las mediciones está compuesto por dos semiespacios separados por una superficie plana horizontal. El superior, de conductividad nula, representa la atmósfera. El segundo representa el terreno y está conformado por capas homogéneas e isotropas, de extensión lateral “infinita” y separadas entre sí por superficies paralelas al plano atmósfera - terreno.

La finalidad es establecer una distribución vertical de resistividad real ( $\rho_e$ ) por debajo del sondeo, tomando como base la curva de resistividad aparente ( $\rho_a$ ). La Figura 5.2 representa la configuración del subsuelo para dos capas. En “a” se observa una culminación (1) y una depresión (3), también denominadas mesetas, que corresponden a resistividades aparentes, y una rama inclinada descendente (2), que une las mesetas. En el caso “b” se tiene dos culminaciones (1 y 5), una depresión (3), y ramas inclinadas descendente (2) y ascendente (4). Las ramas descendentes indican una disminución de la resistividad en profundidad y las ascendentes un aumento.



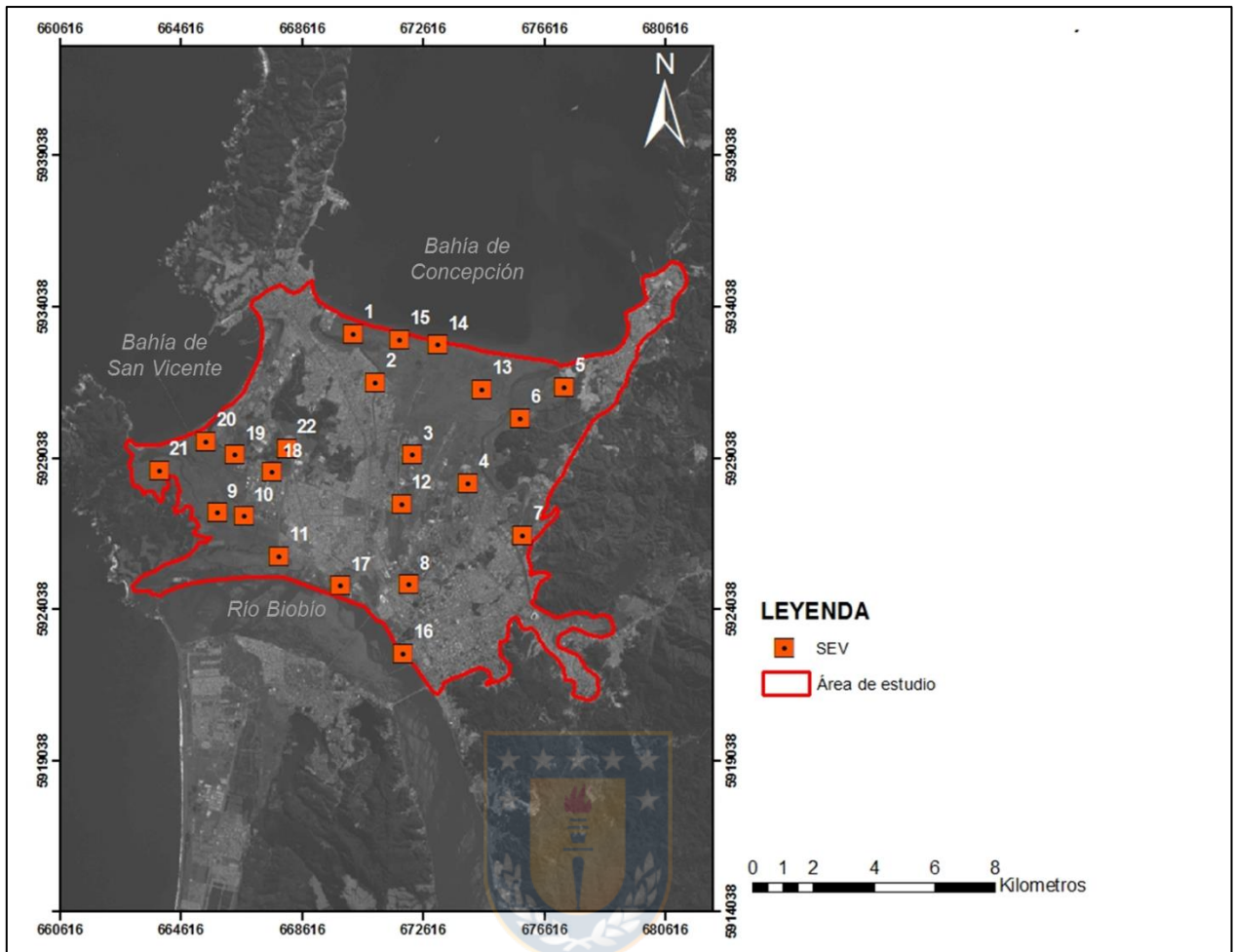
**Figura 5.2:** Curvas de resistividad aparente para dos (a) y tres (b) capas.

Dado que la identificación de las capas se da en función de su resistividad, este supuesto semiespacio inferior es denominado corte geoelectrico.

### 5.2.1. Interpretación SEV

Para identificar las diferentes profundidades de las capas y sus resistividades se comparan las curvas obtenidas en campo con curvas ya confeccionadas, llamadas curvas teóricas, mediante el uso de software que entrega resultados de resistividades reales y profundidades para cada una de las capas identificadas.

En total son 22 SEV (Figura 5.3) con AB comprendidos entre 500 y 1.000 m, en donde cada gráfico muestra diferentes cortes de capas, cuyo eje vertical identifica resistividades aparentes y el eje horizontal profundidades del terreno, dando lugar a gráficos de trazos rectilíneos denominados Curvas de Resistividad Verdadera (Anexo I).



**Figura 5.3:** Mapa ubicación de cada SEV realizado en la zona de estudio. Elaboración propia.

Utilizando los valores de resistividad de diferentes litologías, cada uno de estos SEV son interpretados geológicamente y se describen a continuación:

- **SEV 1**

Ubicación: Este 670.313 m / Sur 5.933.165 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 500 m.

Orientación: ESE-WNW.

Este SEV muestra en contacto con superficie una capa de resistividad del orden de los 363  $\Omega \cdot m$  interpretado como arena media. A los 1,1 m de profundidad sobreviene la presencia de limo y/o arcilla  $\pm$  arena fina con 53  $\Omega \cdot m$  de resistividad. Los siguientes dos tramos poseen un espesor total de 143,2 m con resistividad promedio igual a 1,5  $\Omega \cdot m$ , esto indica una composición limo y/o arcilla  $\pm$  arena fina saturado. Finalmente, a más de 144 m de profundidad la resistividad toma un

valor de  $6.500 \Omega \cdot m$ , interpretándose como basamento cristalino al cual no es posible identificar su espesor.

- **SEV 2**

Ubicación: Este 670.313 m / Sur 5.933.165 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 500 m.

Orientación: N-S.

Posee 40 m de espesor total y tiene en contacto con superficie una capa de  $49 \Omega \cdot m$  de resistividad, este valor es atribuible a limo y/o arcilla  $\pm$  arena fina de 2,6 m de potencia. Bajo esta capa y a 6,2 m de la superficie se tienen sedimentos con resistividad de  $3,3 \Omega \cdot m$ , la disminución de este valor evidencia la presencia de limo y/o arcilla  $\pm$  arena fina saturados. Esto, a diferencia de la capa que las infrayace, de 31 m de espesor y composición granulométrica fina limo y/o arcilla  $\pm$  arena fina afectada por intrusión marina ( $0,48 \Omega \cdot m$ ). A los 40 m de profundidad se encuentra una capa con  $2.049 \Omega \cdot m$  que se interpreta como basamento cristalino.

- **SEV 3**

Ubicación: Este 672.267 m / Sur 5.929.148 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 632 m.

Orientación: E-W.

Las primeras dos capas corresponden a limo y/o arcilla  $\pm$  arena fina, con una resistividad promedio de  $55 \Omega \cdot m$  y 144 m de espesor. Infrayace a esta capa 106 m de sedimentos de similar granulometría a la capa anterior, la diferencia es que estos están saturados; esto se evidencia por la disminución de su resistividad ( $2,9 \Omega \cdot m$ ). A 120 m de profundidad y sin espesor identificable se encuentran arena fina con abundante limo y/o arcilla ( $9,4 \Omega \cdot m$ ).

- **SEV 4**

Ubicación: Este 674.096 m / Sur 5.929.209 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 800 m.

Orientación: SW-NE.

Posee una capa superficial de 1 m de arena gruesa y relleno artificial cuya resistividad es de  $663 \Omega \cdot m$ . Bajo esta hay 1,3 m con  $112 \Omega \cdot m$  de resistividad correspondientes a sedimentos de arena media. Posteriormente 3,8 m, 29 m y 216 m de potencia con  $80 \Omega \cdot m$ ,  $40 \Omega \cdot m$  y  $11 \Omega \cdot m$  de resistividad respectivamente, evidencian un conjunto de sedimentos de tamaño grano fino



(posiblemente arena fina, arcilla y/o limo). Es probable que la variación de resistividad corresponda a un aumento relativo de la conductividad eléctrica ante la presencia de agua a medida que aumenta la profundidad, es decir, a mayor profundidad mayor es la saturación de estas capas (sin dejar de lado la posibilidad de una disminución del tamaño de grano a medida que aumenta la profundidad del sondaje). A los 251 m de profundidad se interpreta como arena media-fina seca ( $162 \Omega \cdot m$ ) con una potencia no identificable.

- **SEV 5**

Ubicación: Este 677.327 m / Sur 5.931.441 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 800 m.

Orientación: SW-NE.

Baja resistividad, del orden de  $17 \Omega \cdot m$  lleva a inferir que la capa superficial corresponde a limo y/o arcilla. La capa anterior posee 2 m de espesor y subyace a 35 m de limo y/o arcilla  $\pm$  arena fina con  $2,4 \Omega \cdot m$  de resistividad debido a un aumento de la conductividad ante la presencia de agua (capa saturada). A los 37 m de profundidad se reconoce una última capa sin espesor identificable que corresponde a limo y/o arcilla con una resistividad de  $19 \Omega \cdot m$ .

- **SEV 6**

Ubicación: Este 675.833 m / Sur 5.930.369 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 632 m.

Orientación: SW-NE.

Indica solo dos capas compuestas por arena. La primera de ellas posee una resistividad de  $154 \Omega \cdot m$  y 8,6 m de espesor. Por otra parte, la más profunda (la cual no es posible identificar su espesor) tiene una resistividad de  $6,1 \Omega \cdot m$ , lo que indica que, a diferencia de la superficial, se encuentre saturada y/o que el tamaño de grano se vea disminuido a medida que se profundiza el sondaje.

- **SEV 7**

Ubicación: Este 675.903 m / Sur 5.926.495 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 500 m.

Orientación: SSW-NNE.

La primera capa que tiene contacto con la superficie posee  $508 \Omega \cdot m$  de resistividad y 1,3 m de espesor que corresponde a sedimentos de arena gruesa con relleno artificial. Bajo estas con  $85,1$

m de espesor y resistividades que oscilan entre 17 y 175  $\Omega \cdot m$  se detecta limo y/o arcilla que pasan a arena media en profundidad, siendo muy probable se encuentre saturada. Finalmente, a más de 86 m de profundidad hay arena media-fina seca con una resistividad de 286  $\Omega \cdot m$ .

- **SEV 8**

Ubicación: Este 672.151 m / Sur 5.924.868 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 632 m.

Orientación: E-W.

En superficie se obtienen valores elevados de resistividad, debido a la presencia de arena gruesa y relleno artificial (1.419  $\Omega \cdot m$ ) que componen la capa superficial de 1,3 m de espesor. Esta subyace a una capa de 10 m y 580  $\Omega \cdot m$  de arena gruesa poco compacta. Ya en la tercera capa, a más de 11 metros de profundidad, 305 m de arena media saturada (57  $\Omega \cdot m$ ). Sin espesor determinado y con 208  $\Omega \cdot m$  de resistividad la cuarta capa posee características de arena media-fina.

- **SEV 9**

Ubicación: Este 665.807 m / Sur 5.927.244 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 632 m.

Orientación: SW-NE.

Al igual que en el SEV anterior, la primera capa evidencia un suelo compuesto por arena gruesa de alta porosidad efectiva (0,46 m de espesor y una resistividad de 1.896  $\Omega \cdot m$ ). Bajo esta, con 166  $\Omega \cdot m$  de resistividad, se encuentran sedimentos correspondientes a arena media-fina de 3,5 m de potencia. A casi 4 m de profundidad hay arena media saturada (27  $\Omega \cdot m$ ). A 10 m de profundidad y con un espesor de 26 m la cuarta capa está formada de arena fina, limo y/o arcilla; ante la presencia de una zona de dispersión salina atribuible a su baja resistividad (0,84  $\Omega \cdot m$ ). Los siguientes 33 m corresponden a sedimentos de tamaño arena que están saturados (3,8  $\Omega \cdot m$ ). Finalmente, a 69 m de profundidad está el basamento cristalino; a dichas profundidades la resistividad es del orden de 4.500  $\Omega \cdot m$ .

- **SEV 10**

Ubicación: Este 666.684 m / Sur 5.927.128 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 632 m.

Orientación: SE-NW.

La primera capa de  $6.558 \Omega \cdot m$  de resistividad corresponde a 0,61 m de grava y arena poco compactos. Los 12 m siguientes poseen una resistividad promedio de  $100 \Omega \cdot m$  atribuible a arena media saturada. Infrayaciendo a esta capa se encuentra arena fina, limo y/o arcilla igualmente saturados ( $3,4 \Omega \cdot m$ ) con 54 m de espesor; es decir, estas dos capas en conjunto (66 m) son conducentes a la formación de un acuífero. A más de 77 m de profundidad el basamento cristalino posee una resistividad de  $7.596 \Omega \cdot m$ .

- **SEV 11**

Ubicación: Este 667.840 m / Sur 5.925.834 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 800 m.

Orientación: S-N.

En contacto con la superficie están 1,2 m de arena media de  $261 \Omega \cdot m$  de resistividad. A mayor profundidad en el terreno, con más de 3 m de espesor, se tiene arena gruesa poco compacta; con una resistividad que asciende a  $761 \Omega \cdot m$ . A los 4 m de profundidad disminuye el tamaño de grano a arena fina ( $104 \Omega \cdot m$ ). Bajo estas capas con 102 m de espesor se identifican arena fina, limo y/o arcilla afectados por intrusión salina, esto se evidencia al observar su baja resistividad del orden de  $0,96 \Omega \cdot m$ . Por último,  $9.061 \Omega \cdot m$  de resistividad indican la presencia del basamento cristalino a 133 m de profundidad.

- **SEV 12**

Ubicación: Este 671.928 m / Sur 5.927.629 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 632 m.

Orientación: SE-NW.

Este SEV fue realizado sobre arena gruesa ( $1.117 \Omega \cdot m$ ) de 1,8 m de espesor y subyacen a material de grano fino (limo y/o arcilla) de 3 m de espesor y una resistividad de  $47 \Omega \cdot m$ . Los siguientes 14 m corresponden a arena media de  $221 \Omega \cdot m$ . Una intrusión marina se evidencia a los 19 m de profundidad, esto queda de manifiesto con una resistividad de  $1,8 \Omega \cdot m$  para esta capa de arena media y 59 m de potencia. A 78 m se identifica el basamento cristalino con  $9.960 \Omega \cdot m$ .

- **SEV 13**

Ubicación: Este 676.413 m / Sur 5.931.538 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 632 m.

Orientación: SE-NW.

Arena media con  $305 \Omega \cdot m$  de resistividad se encuentran en contacto con superficie. A una profundidad de 1,4 m se comienza a notar la saturación de esta misma (esto reflejado en la disminución de resistividad de  $50 \Omega \cdot m$ ). Casi a 4 m de profundidad, extendiéndose por más de 8 m de potencia, infrayace a la capa anterior limo y/o arcilla  $\pm$  arena fina con presencia de agua dulce ( $1,9 \Omega \cdot m$ ). A medida que aumentamos la profundidad el mismo material detrítico de tamaño fino (limo y/o arcilla  $\pm$  arena fina) es afectado por intrusión salina ( $0,84 \Omega \cdot m$ ). Sin un espesor identificado y a más de 60 m de profundidad queda en evidencia el basamento cristalino con  $9.661 \Omega \cdot m$  de resistividad.

- **SEV 14**

Ubicación: Este 672.864 m / Sur 5.932.861 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 500 m.

Orientación: E-W.

Con menos de 1 m de espesor, la primera capa pertenece a arena gruesa con  $418 \Omega \cdot m$  de resistividad. Le siguen 5,4 m de limo y/o arcilla ( $7,5 \Omega \cdot m$ ) que a más de 6 m de la superficie está afectada por intrusión salina que le confiere una resistividad de  $0,84 \Omega \cdot m$ . La última capa del SEV reconocida en este sondaje corresponde al basamento cristalino ( $8.936 \Omega \cdot m$ ).

- **SEV 15**

Ubicación: Este 671.244 m / Sur 5.932.942 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 500 m.

Orientación: E-W.

Con casi 67 m de espesor este sondaje pasa de arena media en superficie ( $319 \Omega \cdot m$ ) a arena media-fina afectada por intrusión salina ( $0,59 \Omega \cdot m$ ). En la parte más profunda de este sondaje se puede distinguir la presencia del basamento cristalino con una resistividad de  $5.548 \Omega \cdot m$ .

- **SEV 16**

Ubicación: Este 671.966 m / Sur 5.922.604 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 500 m.

Orientación: SE-NW.

En este punto se encuentra arena gruesa y relleno artificial con una resistividad de  $435 \Omega \cdot m$  en contacto con la superficie, esta capa posee 2,4 m de espesor. A mayor profundidad y con 12 m de

espesor, una capa de arena media saturada ( $150 \Omega \cdot m$ ). En los siguientes 56 m el tamaño de grano disminuye (de arena gruesa en superficie a arena fina en zonas más profundas) ante la presencia de agua, esto queda de manifiesto por una resistividad de  $15 \Omega \cdot m$ . A los 70 m de profundidad y con  $5.285 \Omega \cdot m$  está el basamento cristalino.

- **SEV 17**

Ubicación: Este 669.827 m / Sur 5.924.874 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 1000 m.

Orientación: SE-NW.

2,6 m con una resistividad de  $287 \Omega \cdot m$  configuran la primera capa en este sondaje que corresponde a arena media seca, a diferencia de la capa inferior que si se encuentra saturada ( $86 \Omega \cdot m$ ) con una potencia de 3 m. Los próximos 9,3 m en este sondaje evidencian arena gruesa ( $463 \Omega \cdot m$ ). Desde aproximadamente los 15 m de profundidad se identifica arena media-fina saturada de agua con resistividades que varía entre  $7,7 \Omega \cdot m$  y  $39 \Omega \cdot m$ .

- **SEV 18**

Ubicación: Este 667.646 m / Sur 5.928.575 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 800 m.

Orientación: SE-NW.

Los 0,59 m más superficiales de este sondaje poseen una resistividad de  $386 \Omega \cdot m$  que indican la presencia de arena media. Desde esta profundidad y por más de 21 m la resistividad, que varía en un rango de 6,3 a  $104 \Omega \cdot m$ , indica la existencia de arena media-fina saturada.

- **SEV 19**

Ubicación: Este 666.357 m / Sur 5.929.172 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 800 m.

Orientación: SE-NW.

Al igual que en el sondaje anterior. La capa superficial (1 m) evidencia arena media ( $345 \Omega \cdot m$ ) que sobreyacen a arena fina saturada. Esta última capa es observable hasta los 24 m de profundidad con resistividades que rondan entre los 1,6 y  $14 \Omega \cdot m$ .

- **SEV 20**

Ubicación: Sur 665.524 m / Este 5.929.556 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 800 m.

Orientación: SE-NW.

144 m de material detrítico en donde su tamaño de grano disminuye pasando de arena media en superficie hasta arena fina en profundidad, esta última es muy probable que se encuentre saturada. Observándose así una capa conducente a la formación de acuífero con resistividades de decenas de  $\Omega\cdot m$ . Bajo esta capa y sin un espesor identificable los 6.765  $\Omega\cdot m$  evidencia la presencia del basamento cristalino.

- **SEV 21**

Ubicación: Sur 663.833 m / Este 5.928.646 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 500 m.

Orientación: E-W.

En contacto con superficie 1,2 m de arena fina con una resistividad de 145  $\Omega\cdot m$ . Esta sobryace a 80 m de arena fina saturada (1,6  $\Omega\cdot m$ ). Bajo esta capa con 6.450  $\Omega\cdot m$  de resistividad se reconoce el basamento cristalino.



- **SEV 22**

Ubicación: Este 668.126 m / Sur 5.929.341 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

AB: 500 m.

Orientación: SSE-NNW.

En contacto con la superficie se encuentra 1,1 m de arena gruesa y relleno artificial (728  $\Omega\cdot m$ ). Posteriormente hay 5,1 m de arena media (70  $\Omega\cdot m$ ), esta se encuentra saturada al igual que los siguientes 75,8 m de arena fina, limo y/o arcilla con resistividades que van desde 2,9 a 27  $\Omega\cdot m$ .

### **5.3. Estratigrafía del subsuelo del área de estudio y su relación con la interpretación realizada de los sondajes eléctricos verticales**

Dos estudios son los únicos documentados en la biblioteca del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) con los cuales es posible comparar la estructura del subsuelo con la interpretación realizada en los sondajes eléctricos verticales. Estos se describen a continuación:

### 5.3.1. El suelo de fundación de Concepción (ESTUDIOS GEOTECNICOS N°2)

Tres SEV (16, 8 y 7) se encuentran dentro del área de “excavaciones” realizadas por Carlos Galli Olivier y Richard W. Lemke en el año 1967:

#### SEV 16

*“2,4 m de arena gruesa y relleno artificial - 12 m de arena media (saturadas) - 56 m de arena fina, limo y/o arcilla (saturadas) - basamento cristalino (sin espesor definido)”.*

En las proximidades de este SEV se localizan 6 “excavaciones” descritas a continuación:

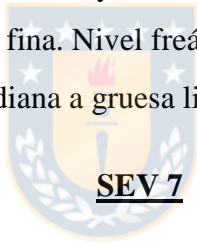
- Excavación 23: 0,6 m relleno artificial - 3,0 m limo arcilloso castaño - 2,0 m muestra no recuperada - 26,0 m arena fina a gruesa gris. Nivel freático 2,4 m.
- Excavación 24: 3,6 m arena media a gruesa gris castaña - 9,4 m arena media gris - 11,0 m arena media limosa arcillosa gris castaña - 2,3 m arcilla castaña muy plástica probablemente roca meteorizada. Nivel freático 5,0 m.
- Excavación 25: 1,5 m relleno artificial - 2,3 m arena fina negra - 3,8 m arena media negra - 0,1 m limo y arcilla - 7,6 m arena media negra - 3,3 m arcilla negra alta - 9,8 m limo arcilloso negro - 1,6 m arena media y fina. Nivel freático 5,7 m.
- Excavación 28: 1,4 m relleno artificial - 2,3 m arena limosa gris - 1,4 m limo gris plasticidad media - 1,0 m arena limosa gris - 1,1 m limo gris - 1,8 m arena limosa gris. Nivel freático 1,2 m.
- Excavación 29: 1,2 m relleno artificial - 7,8 m arena media negra - 5,6 m arena muy fina limosa negra con materia orgánica - 4,6 m limo arcilloso orgánico negro - 5,9 m arena muy fina limosa negra con materia orgánica - 5,0 m arena gruesa y media negra, cuarzosa. Nivel freático 2,4 m.
- Excavación 37: 2,0 m relleno artificial - 0,8 m relleno artificial (fango) - 7,4 m arena media y gruesa negra, cuarzosa - 7,4 m limo arcilloso con materia orgánica y arena fina negra con palos y hojas - 3,0 m arcilla oscura, plasticidad alta y media - 2,8 m arena fina limosa - 0,1 m arcilla negra - 1,8 m arena gruesa negra. Nivel freático 2,6 m.

**SEV 8**

*“1,3 m arena gruesa y relleno artificial - 10 m arena gruesa - 11,0 m arena media saturada - arena media/fina (sin espesor definido)”.*

A este SEV se relacionan 4 “excavaciones”:

- Excavación 3: 0,2 m arena con restos vegetales - 0,6 m arena fina con finos - 0,2 m arena media y gruesa.
- Excavación 6: 0,6 m relleno artificial - 0,4 m arcilla negra - 0,3 m arcilla negra - 0,5 m arcilla arenosa negra - 2,7 m arcilla - 0,5 m arena fina arcillosa - 0,4 m arena media. Nivel freático 0,4 m.
- Excavación 7: 0,7 m arena fina con restos vegetales - 2,1 m arena fina limosa sin cohesión - 0,3 m limo gris - 1,3 m limo gris con arena muy fina - 2,3 m arena fina a gruesa con madera - 0,3 m arena limosa fina - 0,3 m arena fina y media - 1,0 m limo con arena fina y media - 0,5 m arena media y gruesa - 1,2 m arena fina. Nivel freático 0,3 m.
- Excavación 11: 0,6 m de arena mediana a gruesa limosa - 29,6 m arena fina a gruesa gris.

**SEV 7**

*“1,3 m de arena gruesa y relleno artificial - 85,1 m de limo y/o arcilla en techo y arena media en profundidad - arena media/fina (sin espesor definido)”.*

A este SEV se relacionan 3 “excavaciones”:

- Excavación 1: 0,3 m limo arcillo-arenoso castaño - 0,3 m arena media limosa gris - 4,7 m arena mediana a gruesa gris - 1,3 m arcilla arenosa - 2,6 m arena mediana a gruesa gris. Nivel freático 2,4 m.
- Excavación 2: 2,4 m arena fina y mediana negra - 0,8 m arena gruesa arcillosa negra - 11,2 m arena fina y mediana negra - 0,4 m arcilla negra - 0,7 m arena fina limosa gris verdosa - 2,3 m arcilla amarilla con grava - 2,0 m arcilla amarilla (roca meteorizada) - 1,8 m roca agrietada extra dura arcilla pura. Nivel freático 0,8 m.
- Excavación 5: 1,0 m relleno artificial (arena) - 9,0 m arena fina a mediana gris con capas finas intercaladas de arcilla. Nivel freático 3,0 m.



### 5.3.2. Suelo de Fundación de las hojas de Talcahuano, Cosmito y Hualpencillo.

Seis SEV (12, 3, 4, 8, 22 y 1) se encuentran dentro del área de estudio de sondajes realizados por Carlos Galli Olivier en el año 1966:

#### SEV 12

*“1,8 m de arena gruesa y relleno artificial - 3 m de limo y/o arcilla - 14 m de arena media - 19 m de arena media con intrusión marina - basamento cristalino (sin espesor definido)”.*

- Sondaje C1

Este 670.640 m/ Sur 5.927.411 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

Profundidad nivel freático: 1 m.

0 - 0,8 m: arena, granos gruesos a angulosos.

0,8 - 35,8 m: arena gruesa gris oscura (húmeda) con grava fina, hacia abajo arena media.

- Sondaje C2

Este 670.711 m/Sur 5.928.091 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

Profundidad nivel freático: 1,25 m.

0 - 29,5 m: arena (desde los 1,5 m húmeda) con limo y arcilla.

29,5 - 30 m: arcilla.

- Sondaje C8 “Carriel Sur al sur”

Profundidad nivel freático: 1,47 m.

0 - 0,6 m: arena gruesa a media con gránulos de cuarzo.

0,6 - 6 m: arena media a gruesa.

6 - 6,6 m: arcilla arenosa.

6,6 - 10 m: arena media.

### **SEV 3**

*“144 m de limo y/o arcilla ± arena fina - 106 m de limo y/o arcilla ± arena fina saturado - arena fina, limo y/o arcilla (sin espesor definido)”.*

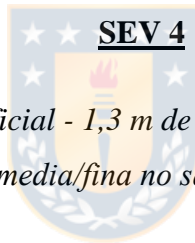
- Sondaje C6 “Carriel Norte”

Profundidad nivel freático: 1,22 m.

0 - 2 m: arena media a fina.

2 - 3,6 m: arcilla limosa con arena de grano medio, bastante plástica.

3,6 - 30 m: arena fina a media posiblemente con limo en ciertos niveles.



### **SEV 4**

*“1 m de arena gruesa y relleno artificial - 1,3 m de arena media - 248,8 m arena fina, limo y/o arcilla saturada - arena media/fina no saturada (sin espesor definido)”.*

- Sondaje C7 “Carriel Sur”

Profundidad nivel freático: no se observa.

0 - 0,6 m: arena media a gruesa

0,6 - 8,3 m: arena gris oscura mojada.

- Sondaje C8 “Carriel Sur al sur”

Nivel freático: 1,47 m.

0 - 0,6 m: arena gruesa a media con gránulos de cuarzo.

0,6 - 6 m: arena media a gruesa.

6 - 6,6 m: arcilla arenosa.

6,6 - 10 m: arena media.

### **SEV 8**

*“1,3 m arena gruesa y relleno artificial - 10 m arena gruesa - 11,0 m arena media saturada - arena media/fina (sin espesor definido)”*.

- Sondaje C11

Este 671.231 m/Sur 5.924.917 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

Profundidad nivel freático: 11,3 m.

0 - 22,6 m: arena fina a gruesa en diversos niveles con limo.

### **SEV 22**

*“1,1 m de arena gruesa y relleno artificial - 5,1 m de arena media saturada - 75,8 m de arena fina, limo y/o arcilla saturadas (sin espesor definido)”*.

- Sondaje C15

Este 668.537 m/Sur 5.930.485 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

Profundidad nivel freático: 2,05 m.

0 - 1 m: arena media a gruesa.

1 - 20 m: arena media a gruesa. Hacia abajo con fósiles.

20 - 23 m: arcilla limosa verde, fosilífera.

### **SEV 1**

*“1,1 m de arena media - 2,1 m limo y/o arcilla ± arena fina - 143,2 m de limo y/o arcilla ± arena fina saturada - basamento cristalino (sin espesor definido)”*.

- Sondaje C36

Este 668.806 m/Sur 5.933.495 m (Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H).

Profundidad nivel freático: 0,89 m.

0 - 0,6 m: arcilla arenosa oscura de pantano.

0,6 - 3,6 m: arena gruesa, con rodados bien redondeados de hasta 2 cm polimícticos con mucho cuarzo y materiales oscuros de arena gris de llanura.

3,6 - 7 m: arcilla gris mojada arenosa tal vez poca sedimentación.



## **6. HIDROGEOLOGÍA**

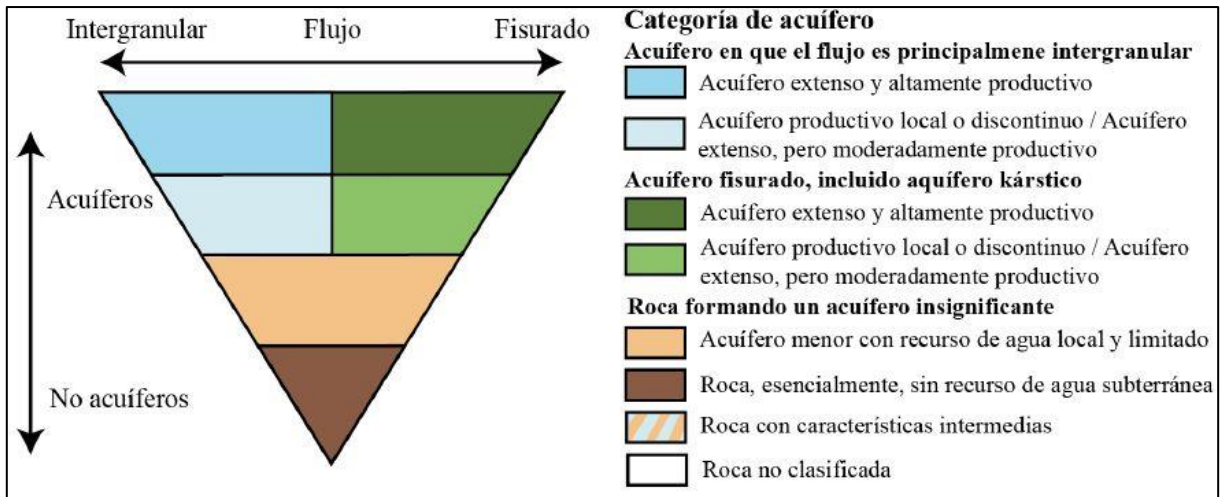
### **6.1. Unidades hidrogeológicas**

El término “Unidad Hidrogeológica” es comúnmente utilizado para dividir el subsuelo en unidades relacionadas con la hidrogeología de este. Se ha observado que el flujo de agua subterránea a menudo no está relacionado con los límites de las unidades litológicas, una unidad hidrogeológica puede estar compuesta por una o varias de estas, las cuales han sido agrupadas en categorías que dependen de la permeabilidad de las rocas, de la ocurrencia de aguas subterráneas y de la capacidad de almacenamiento que poseen.

El área de estudio está representada por dos unidades hidrogeológicas principales:

#### **Unidad hidrogeológica 1**

Corresponde a una unidad de rocas metamórficas que abarca facies de esquistos verdes a granulito y se compone principalmente por metapelitas y metapsamitas, y en menor proporción rocas calcosilicatadas y gneises migmatíticos. Estas rocas poseen en general, un potencial hidrogeológico casi nulo. Su porosidad total es en su mayoría inferior al 3%, y poseen muy baja permeabilidad. Sin embargo, el fracturamiento y meteorización en superficie pueden aumentar su potencial para almacenar y transmitir el agua (Hauser, 1995). El basamento metamórfico en profundidad se asume como consolidado, sin meteorización y con escaso fallamiento, por lo tanto constituye un acuífugo. Dentro de la clasificación propuesta por Struckmeier & Margart (1995) pertenece a una roca con potencial hidrogeológico muy bajo, esencialmente sin recurso de agua subterránea, representada por un color marrón en el triángulo invertido de la Figura 6.1.



**Figura 6.1:** Sistema de clasificación de acuíferos propuesta por Struckmeier & Margat, 1995.

## Unidad hidrogeológica 2

Unidad hidrogeológica conducente a la formación de un acuífero compuesto de sedimentos no consolidados (procedentes de la erosión de rocas graníticas de la Cordillera de la Costa y de rocas sedimentarias), además de la Formación Curanilahue y la Formación Quiriquina. Esta unidad alcanza en el área de estudio una potencia media de 92,4 m, según la interpretación de los sondajes eléctricos verticales. La base o sello de esta unidad es la Unidad Hidrogeológica 1 que constituye al basamento metamórfico, mientras que su techo corresponde al nivel freático.

El acuífero definido en esta unidad corresponde a un acuífero poroso libre, donde el agua contenida se encuentra sometida a presión atmosférica. Este acuífero es productivo localmente, con un flujo principalmente intergranular e indicado de color celeste tenue en el sistema de clasificación de Struckmeier & Margat (1995) (Figura 6.1).

## 6.2. Caracterización hidráulica

### 6.2.1. Prueba de bombeo

Una prueba de bombeo se realiza para evaluar las características hidráulicas de un acuífero, conocer el funcionamiento de este y determinar la correcta construcción de un pozo; estimulándolo por medio de bombeo y observando su respuesta, mediante el descenso del nivel en el pozo de extracción y/o en uno de observación (Villanueva & Iglesias, 1984).

En el año 2013 la Dirección General de Aguas realizó ensayos de bombeo en las comunas de Talcahuano y Hualpén. De estos, solo se tuvo acceso a los resultados y no a las pruebas de bombeo en sí, las cuales proporcionan valores de transmisibilidad y permeabilidad.

La transmisibilidad se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unidad y de altura igual al manto permeable saturado bajo un gradiente unidad. De acuerdo con su definición, la transmisibilidad de un acuífero depende directamente de la permeabilidad (o coeficiente de permeabilidad) y de la altura o espesor del acuífero perforado (Custodio & Llamas, 1983). La transmisibilidad calculada mediante ensayos de bombeo (Tabla 6.1) corresponde a una medida que caracteriza un sistema acuífero a una determinada ubicación y su variación de un punto a otro se debe a variaciones en uno o en los dos factores anteriormente mencionados.

**Tabla 6.1:** Profundidad, cota, transmisibilidad y permeabilidad de doce puntos en la zona. DGA, 2013. UTM WGS 84 zona 18 H.

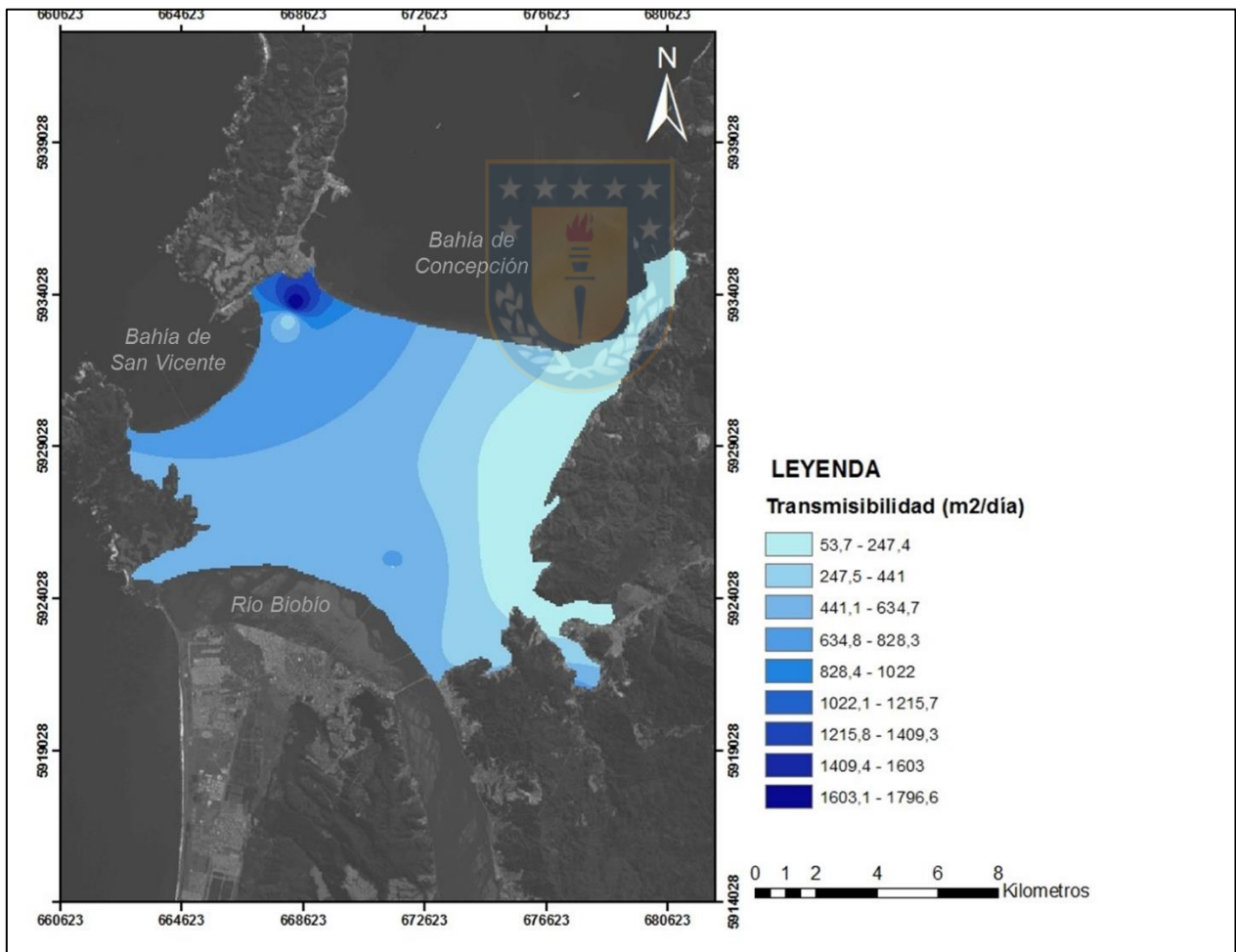
Punto	Coordenada Este (m)	Coordenada Norte (m)	Profundidad (m)	Cota (m s.n.m.)	Transmisibilidad (m <sup>2</sup> /d)	Permeabilidad (m/d)
1	668.349	5.933.720	21	12	1.800	181,82
2	668.141	5.933.187	15	22	261,29	62,21
3	679.948	5.932.505	14	71	64,8	37,24
4	669.925	5.932.125	46	17	635,29	25,33
5	676.440	5.928.463	40	21	77,14	6,59
6	676.461	5.926.344	29	24	49,61	7,45
7	676.126	5.925.165	24	21	80,6	20,05
8	671.563	5.925.057	32	15	28,8	8
9	671.464	5.925.073	25	16	1.227,27	99,78
10	677.236	5.924.084	80,6	73	210,28	6,28
11	677.270	5.924.105	30,6	73	100	83,33
12	676.959	5.920.058	30	74	1.022,73	92,14

De acuerdo a la clasificación de Villanueva e Iglesias (Tabla 6.2) los puntos 3, 5, 6, 7, 8 y 11 poseen una transmisibilidad baja con un caudal extraíble de 1 - 10 l/s. Los puntos 2 y 10 una transmisibilidad media a alta con un caudal extraíble de 10 - 50 l/s. El punto 4 posee una transmisibilidad alta con un caudal extraíble de 50 - 100 l/s. En último lugar los puntos 1, 9 y 12 presentan una transmisibilidad muy alta con un caudal extraíble de 100 l/s. Los datos permiten crear un mapa de zonificación de transmisibilidad en el área de estudio (Figura 6.2), en donde se observa que el lado W sobrepasa los valores de 441 m<sup>2</sup>/d. Por su parte el lado E llega a presentar valores de 53,7 m<sup>2</sup>/d. Los valores más altos de transmisibilidad se encuentran en el sector NW de

la zona de estudio. Esta anomalía positiva está relacionada a la existencia de mayores espesores en el acuífero o variaciones en la permeabilidad; así mismo la disminución de la transmisibilidad hacia el lado E estaría relacionada a los efectos contrarios.

**Tabla 6.2:** Clasificación y capacidad de un acuífero estimados a partir de su transmisibilidad. (Modificado de Villanueva & Iglesias, 1984).

T (m <sup>2</sup> /d)	Clasificación estimativa	Posibilidades del acuífero	
		Caudal extraíble (l/s)	Depresión Teórica (m)
T < 100	Muy baja	1	10
10 < T < 100	Baja	1 a 10	10
100 < T < 500	Media a alta	10 a 50	10
500 < T < 1.000	Alta	50 a 100	10
T > 1.000	Muy Alta	100	10



**Figura 6.2:** Mapa de zonación de la transmisibilidad de la zona de estudio. Elaboración propia, 2019.



### 6.2.2. Superficie piezométrica

La superficie piezométrica se define como el lugar geométrico de los puntos que señalan la altura piezométrica de cada una de las posiciones del acuífero, referidas a una determinada profundidad (Custodio & Llamas, 1983). Esta altura se representa mediante líneas de igual altura piezométrica las cuales se denominan isopiezas o hidroisohipsas.

A través de la medición del nivel estático en diversos puntos en el área (Tabla 6.3), es posible confeccionar un mapa de superficie piezométrica y determinar el sentido del flujo del acuífero.

**Tabla 6.3:** Puntos de medición del nivel freático durante agosto del año 2013 en el área de estudio.

Punto	Coordenada Este (m)	Coordenada Norte (m)	Nivel Estático (m)
0	673.032	5.928.212	12,9
1	672.790	5.927.733	10
2	673.155	5.927.981	10,7
3	671.585	5.923.440	1,55
4	671.161	5.924.299	4
5	670.010	5.927.090	13
6	669.746	5.931.665	1
7	668.193	5.928.439	13,9
8	667.861	5.930.085	6
9	667.679	5.931.773	5
10	680.248	5.924.618	21,5
11	668.141	5.933.187	20,2
12	669.925	5.932.125	14,5
13	676.440	5.928.463	14,5
14	676.461	5.926.344	18,8
15	676.126	5.925.165	17,1
16	671.563	5.925.057	14
17	671.564	5.925.057	13,7
18	671.586	5.923.437	3,7
19	666.856	5.928.756	1,67

La superficie freática es igual a la superficie piezométrica, debido a que nos encontramos ante la presencia de un acuífero libre, esta posee en general una forma Hiperbólica Radial Divergente con zonas más locales del tipo Parabólica Cilíndrica en la Bahía de Concepción y en las cercanías de la ribera norte del Río Biobío. La dirección del flujo se determina trazando líneas

perpendiculares a las isopiezas, llamadas líneas de corriente. Estas indican la existencia de tres direcciones de flujo subterráneo. La primera drena sus aguas en sentido norte a sur hacia el Río Biobío, la segunda dirige las aguas de este a oeste en la Bahía de San Vicente y la tercera de sur a norte en el sector de la Bahía de Concepción (Figura 6.3).

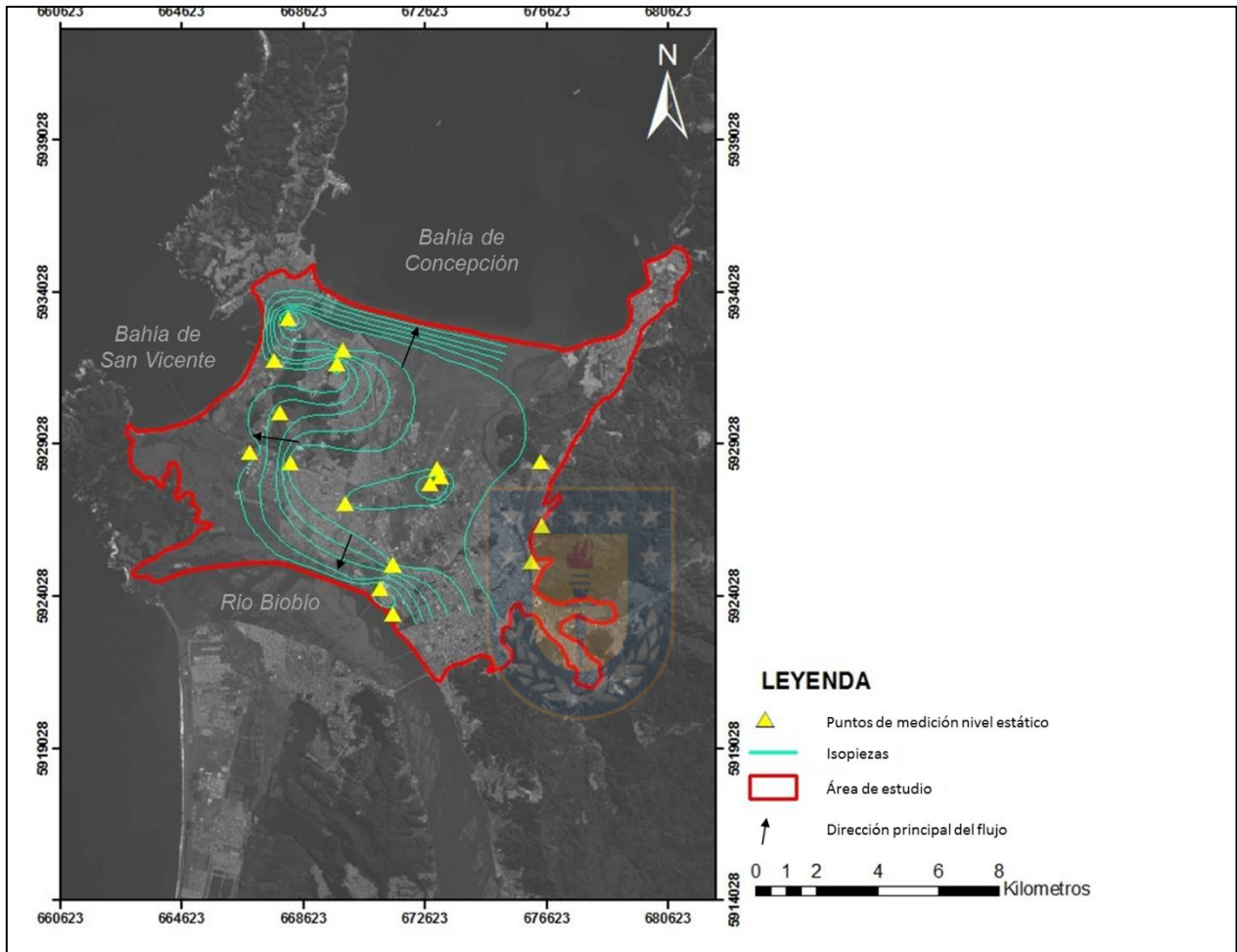


Figura 6.3: Mapa Superficie piezométrica área de estudio. Elaboración propia.

### 6.3. Balance hidrológico

La Tierra, específicamente la hidrósfera, se caracteriza por un ciclo hidrológico que consiste en la transferencia o movimiento de masas de agua en cualquiera de sus tres estados (sólido, líquido o gaseoso) entre la atmósfera y la superficie terrestre. De acá se desprende el concepto de balance hidrológico que establece un equilibrio entre los componentes que salen y entran de un sistema,

que es en este caso, la hidrósfera (equilibrio entre el agua que ingresa a través de las precipitaciones y la que se pierde por evapotranspiración, escorrentía superficial y/o recarga).

Es necesario tener en cuenta que una vez producida la precipitación, no toda alcanza a llegar a la superficie terrestre; parte se evapora en su trayecto hacia el suelo y además puede ser retenida por la vegetación, superficie de construcciones y/o edificios, carreteras, etc. Retornando así a la atmósfera en forma de vapor. La precipitación que si llega a la superficie se divide en agua retenida en charcas o pequeños surcos (almacenamiento superficial), agua que circula sobre la superficie (escorrentía superficial) y agua que penetra bajo la superficie del terreno (infiltración).

En el balance hidrológico se utiliza de manera general la siguiente equivalencia (Custodio & Llamas, 1983):

$$P = ETR + ES + I$$

Donde “P” equivale a la precipitación anual (mm), “ETR” a evapotranspiración real anual (mm), “ES” a escorrentía superficial actual anual (mm) e “I” a infiltración anual (mm).

Para realizar los cálculos de cada parámetro y así llegar al balance hidrológico del área, se tomaron datos de horas de luz mensual (Tabla 6.4), y además precipitación media (Tabla 6.5) y temperatura media (Tabla 6.6) para cada mes entre los años 2004 y 2015. Todo esto desde el Anuario Climatológico de la Dirección Meteorológica de Chile para la estación más cercana a la zona de estudio que corresponde a la estación Concepción Carriel Sur (36°46’ Latitud S – 73°03’ Longitud W) y la estación meteorológica Concepción DGA (36°49’ Latitud S – 73°06’ Longitud W) correspondiente a la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas.

**Tabla 6.4:** Horas de luz mensual para la zona de estudio.

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
14,1	13,25	12,15	11	10,1	9,65	9,85	10,65	11,75	12,9	13,9	14,35

**Tabla 6.5:** Precipitación media (mm) mensual de los últimos 12 años en la zona de estudio.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio Mensual
Enero	0	0,6	39,1	35,6	5,5	5,7	19	37,8	28,7	3,1	12,1	0	15,6
Febrero	7,6	0	0,5	44,2	4,3	3,1	47	16	82,4	28,1	13,2	3,8	20,85
Marzo	57,7	21,8	10,1	19,4	6,2	9,5	6,6	43	10,9	4,1	86,1	4,7	23,34
Abril	147,2	14,2	139,3	143,2	52,9	19,8	10	93,9	9,9	18,7	63,6	31,7	62,03
Mayo	73,3	361,7	116,6	63	329,5	179,5	52,1	40,4	165,2	269,8	184,8	166,9	166,9
Junio	270,6	507,2	364,5	106,8	110,6	286,6	261,7	203,1	249,8	127,7	322,2	255,5	255,53
Julio	193,8	183,5	340,1	216,3	351,9	128,2	283	167,3	62	102,9	310,5	212,7	212,68
Agosto	169,2	187	239,9	126	259	266,8	176,2	271	154,4	140,8	129,2	192,7	192,68
Septiembre	92,3	71,1	55,9	86,2	70,1	61	22,6	92,8	24,4	80,4	156,3	73,9	73,92
Octubre	125	35,4	107,6	39,1	20,7	86,5	49,4	44,8	42	29,1	16,4	54,2	54,18
Noviembre	50,3	49	7,6	8,3	5	54,7	27	35,6	30,3	0,8	0,9	24,5	24,5
Diciembre	18,7	68,5	55,2	32,2	1,9	2,3	18,6	0	104,2	0	30	30	30,13
Anual	1.205,70	1.500	1.476,40	920,3	1.217,60	1.103,70	973,2	1.045,70	964,2	805,5	1.325,30	1.050,60	1.132,30

**Tabla 6.6:** Temperatura media (°C) mensual para los últimos 12 años en la zona de estudio.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio Mensual
Enero	16,7	16,2	16,5	16,2	17	16,6	16,4	16,6	17,5	16,8	17,6	16,9	16,75
Febrero	15,8	16,7	16,8	15,5	17,1	16	15,3	15,5	16,5	16,8	15,9	16	16,16
Marzo	15,2	15	13,8	15	15	15,1	15,5	14,1	15,8	14,2	14,3	16,2	14,93
Abril	13,1	11,4	11,6	11,9	11,6	13,5	11,5	12,2	12	13,1	12	13,7	12,3
Mayo	10,1	10,1	10,3	9,4	10,1	11	9,4	10,1	11,6	11,2	11,4	11,2	10,49
Junio	9,7	9,6	11,1	7,5	9,3	8,9	10	10,1	10,5	9,2	9,8	9,6	9,61
Julio	9,6	9,4	9,7	7,7	10	8,2	8,1	7,9	7,4	8,7	9,3	8,7	8,73
Agosto	9,5	9,6	10,3	6,5	8,9	10,2	9,1	9,2	9	8,8	10,3	9,2	9,22
Septiembre	10,2	9,9	10,2	9,2	10,6	9,3	9,3	10,3	10,7	10,2	11,1	10,1	10,09
Octubre	11,7	11,5	11,6	11,5	11,9	11,5	12,3	11,3	11,7	11,7	13,2	11,8	11,81
Noviembre	13,7	14,2	13,6	13,1	14,7	12	13,5	13,8	14,1	13,9	13,8	13,7	13,67
Diciembre	16	15,4	15,4	14,9	16,7	15,1	14,5	15,6	15,7	15,8	15,8	15,5	15,54

### 6.3.1. Evapotranspiración

La evaporación es el proceso físico en que el agua líquida de las precipitaciones pasa a estado gaseoso y retoma directamente a la atmósfera en forma de vapor. Por otro lado, la transpiración es el proceso de escape del agua absorbida por las raíces de las plantas a través de los estomas de sus hojas. Como estos dos procesos son difíciles de medir por separado se integra el concepto de evapotranspiración.

### 6.3.1.1. Evapotranspiración real (ETR)

Es la suma de la cantidad de vapor de agua evaporado por el suelo y transpirada por las plantas durante un periodo determinado bajo condiciones meteorológicas y de humedad de suelo existentes.

### 6.3.1.2. Metodología ETR

Para estimar este parámetro se utiliza el método empírico de la fórmula de Thornyhaite & Mather (1995). Para esto se necesitan datos de temperatura media mensual para un periodo de tiempo, número de horas de luz mensual, precipitación media mensual y reserva máxima de cada serie de suelo. Este último valor corresponde a la cantidad de agua por unidad de superficie (mm) que el suelo es capaz de almacenar en su perfil, es decir, la cantidad de agua que supere la reserva máxima, escurrirá en superficie o en profundidad.

Para obtener la reserva máxima de una serie de suelo se calcula la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez de cada una, multiplicada por la densidad aparente y por el volumen de la zona radicular (Tabla 6.7).

**Tabla 6.7:** Reserva máxima (mm) de cada serie. (ARN: Arenales, LHY: Llahuecuy, LHN: Llahuen, NNH: Ninhue, STN: San Esteban, D: Dunas, R: Suelos Recientes, CPE: Curanipe, TAL: Terrazas Aluviales, TMA: Terrazas Marinas, MP: Pantano).

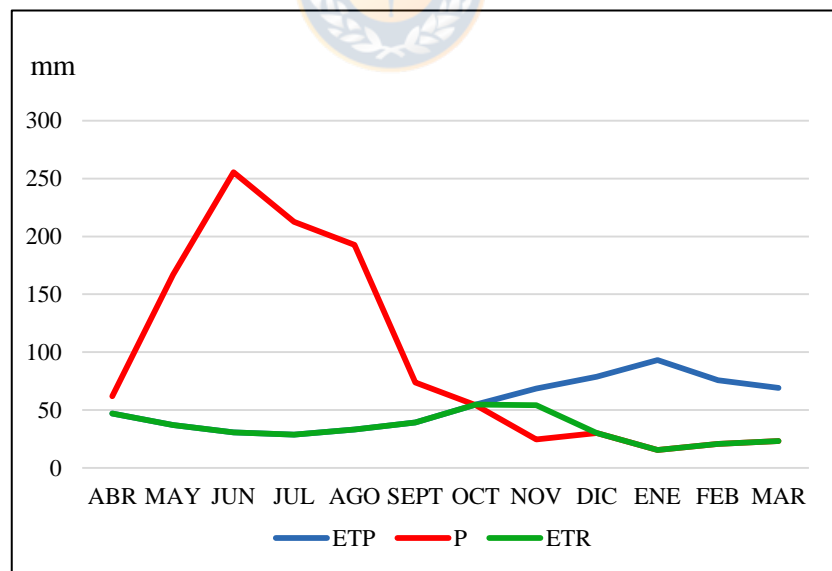
	ARN	LHY	LHN	NNH	STN	D	MP	R	CPE	TAL	TMA
Densidad aparente del terreno (gr/cm <sup>3</sup> )	2,06	1,88	1,45	1,31	1,44	2,06	1,39	2,06	1,28	1,55	1,31
Capacidad de campo (%)	8	14	27	33	23	8	29	8	37	21	33
Punto de Marchitez (%)	3	5	10	17	14	3	11	3	25	9	17
Profundidad radicular media (m)	0,24	0,3	0,26	0,27	0,13	0,2	0,12	0,14	0,28	0,22	0,19
Volumen de la zona radicular por Ha (m <sup>3</sup> /Ha)	2.446	2.964	2.590	2.713	1.341	1.968	1.157	1.367	2.753	2.229	1.947
Agua utilizable por las plantas (%)	6	10	17	17	9	6	17	6	13	12	16
Volumen utilizable por Ha (m <sup>3</sup> /Ha)	302	557	638	604	174	243	278	169	458	415	408
Reserva máxima (mm)	30,2	55,7	63,8	60,4	17,4	24,3	27,4	16,8	45,8	41,5	40,8

Una vez calculada la reserva máxima es posible determinar la ETR de cada serie de suelo según el método de Thornyhaite, en donde además se puede llevar a cabo un análisis de precipitaciones de cada una de ellas. Donde la temperatura es en °C, factor de corrección “a” es 1,249 e i (índice de calor) corresponde a  $t/5 * 1,514$ . Por ejemplo, la Serie Arenales posee una ETR de 414,5 mm (Tabla 6.8). Se observa que entre los meses de abril y septiembre las

precipitaciones superan la evapotranspiración generándose excedentes. De otro modo, en los meses de octubre a marzo las precipitaciones son menores que la evapotranspiración, por lo cual se comienza a utilizar de la reserva. Sin embargo, esta no es significativa para cubrir la demanda entre los meses de noviembre a marzo; durante este periodo se registra en la zona un déficit de agua (Gráfico 6.4).

**Tabla 6.8:** Evapotranspiración Serie Arenales en la zona de estudio.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	Reserva Máx.		30,2
											FEB	MAR	TOTAL
Temperatura	12,2	10,5	9,6	8,727	9,218	10	11,8	13,67	14,53	16,75	16,158	14,93	
i	3,86	3,07	2,68	2,32	2,52	2,86	3,67	4,58	5,03	6,24	5,91	5,24	47,99
ETP sin corr.	51,3	42,6	38,1	33,8	36,2	40,0	49,2	59,2	63,9	76,3	72,9	66,1	629,5
n° días mes	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28,25	31	
n° horas luz	11	10,1	9,65	9,85	10,65	11,75	12,9	13,9	14,35	14,2	13,25	12,15	
ETP corr.	47,1	37,0	30,6	28,6	33,2	39,2	54,7	68,5	78,9	93,3	75,8	69,1	656,1
Precipitación	62,0	166,9	255,5	212,7	192,7	73,9	54,2	24,5	30,2	15,6	20,9	23,3	1132,3
ETR	47,1	37,0	30,6	28,6	33,2	39,2	54,7	54,2	30,2	15,6	20,9	23,3	414,5
Déficit	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,4	48,8	77,7	55,0	45,8	241,6
Reserva	15,0	30,2	30,2	30,2	30,2	30,2	29,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedentes	0,0	114,7	224,9	184,0	159,5	34,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	717,8



**Gráfico 6.4:** Representación gráfica de la variación anual de la evapotranspiración potencial y real, en relación a la precipitación. Serie Arenales.

Finalmente con los valores de ETR de cada serie de suelo (Tabla 6.9) se obtiene la ETR promedio para la zona de 414,46 mm. El cálculo detallado serie por serie se puede ver de la Tabla 1 a la 11 en el Anexo II.

**Tabla 6.9:** Evapotranspiración real para cada serie de suelo. (ARN: Arenales, LHY: Llahuecuy, LHN: Llahuen, NNH: Ninhue, STN: San Esteban, D: Dunas, R: Suelos Recientes, CPE: Curanipe, TAL: Terrazas Aluviales, TMA: Terrazas Marinas, MP: Pantano).

	ARN	LHY	LHN	NNH	STN	D	MP	R	CPE	TAL	TMA
ETR (mm)	414,5	440	448,1	444,7	401,8	408,6	411,7	401,1	430,1	425,7	425,1

### 6.3.2. Escorrentía superficial

Se define como escorrentía superficial a la parte de la precipitación que alcanza la superficie del terreno pero que no es infiltrada ni evapotranspirada, por lo que circula por la superficie hacia zonas de menor elevación topográfica.

Para poder obtener la escorrentía superficial del área de estudio se aplicó el método de número de curvas (NC), elaborado por el Soil Conservation Service del USDA (Mockus, 1964). Este método se basa en la estimación directa de la escorrentía superficial a partir de las características del suelo, uso del mismo y su tipo de cubierta vegetal. Esto, involucrando los siguientes parámetros: precipitación, retención potencial máxima de cada cobertura, escorrentía directa y lluvia caída antes de que se inicia la escorrentía e infiltración (Chow y otros, 1994).

Cada serie se clasificó en base a grupos hidrológicos (Capítulo 4). Posteriormente con la información del área ocupada por los diferentes tipos de cobertura (usos de suelo) se le asignó un número de curva considerando el grupo hidrogeológico en condiciones normales de humedad. Cabe destacar que el número de curvas será mayor para un mismo tipo de cobertura mientras más impermeable sea el suelo en donde reside, y por otro lado, mientras más cercano a 100 sea, mayor cantidad de agua que llega al suelo se convertirá en escorrentía superficial (Tabla 6.10).

**Tabla 6.10:** Número de Curvas (NC) de cada grupo hidrogeológico. Modificado de Soil Conservation Service del USDA.

Usos de suelo	Grupo Hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Cuerpos de Agua	100	100	100	100
Áreas urbanas e industriales	72	84	87	89
Humedales	98	98	98	98
Terrenos Agrícolas	72	81	88	91
Bosques	45	66	71	83
Praderas y matorrales	38	57	70	77
Áreas desprovistas de vegetación	70	80	87	90

El NC para cada serie se calcula como la suma de los productos del porcentaje del área destinada a un tipo de cobertura por su respectivo NC, esto dividido por 100 nos da el número de curvas ponderado para cada tipo de suelo.

Posteriormente con el valor del NC se determina su capacidad de retención máxima (s) según:

$$s = 25400/NC - 254 \text{ (mm)}$$

Por ejemplo, en la Tabla 6.11 se determina el número de curvas y la retención máxima para la Serie Arenales. Dando 74,64 y 90,9 mm respectivamente. El detalle del cálculo del número de curvas y retención máxima de cada serie de suelo del área de estudio se encuentra desde la Tabla 12 a la 21 del Anexo II.

**Tabla 6.11:** Número de Curvas (NC) y retención máxima (s) en mm de Serie Arenales.

ARENALES - GRUPO HIDROLÓGICO A				
Uso	% Área	NC por uso	% Área * NC	% Área * NC/100
Cuerpos de agua	1,28	100	128,00	1,28
Áreas urbanas e industriales	7,50	72	540,00	5,40
Humedales	12,40	98	1215,20	12,15
Terrenos agrícolas	73,30	72	5277,60	52,78
Bosques	0,04	45	1,80	0,02
Praderas y matorrales	5,30	38	201,40	2,01
Áreas des. de vegetación	0,00	70	0,00	0,00
			NC	73,64
			s	90,92



Así, con la retención máxima y la precipitación media se determina la escorrentía potencial directa (Pe).

$$Pe = (P - 0,2 \times s)^2 / P + 0,8 \times s$$

Finalmente, la escorrentía superficial actual (Q) es calculada a partir de la escorrentía potencial directa y el porcentaje de superficie (Pa%) que ocupa cada tipo de cobertura en el total del área de estudio.

$$Q = Pe \times (Pa/100)$$

La sumatoria de la escorrentía superficial actual (Q) de cada tipo de cobertura será la estimada para la zona. Estos cálculos se resumen en la Tabla 6.12, en donde se obtuvo un número de curvas de 77,34, retención máxima 74,43 mm y escorrentía superficial actual de 545,04 mm.



**Tabla 6.12:** Cálculo de la escorrenτία superficial actual del área de estudio.

USO	GRUPO HIDROLÓGICO																Pe	Q (mm)				
	A				B				C				D									
	%	NC	PROD	%	NC	PROD	%	NC	PROD	%	NC	PROD	%	NC	PROD	AREA TOTAL			SUMA PROD	NC X USO	RESULTADO	
Cuerpos de agua	0,7	100	67,93	0,6	100	64,16	0	100	1,172	0	100	0	0	100	0	1,33	133,26	100,00	1,33	427,33	5,69	
Áreas urbanas e industriales	41	72	2947	12	84	989,7	1,7	87	149,7	1,4	89	122,7	1,4	89	122,7	55,81	4208,97	75,42	42,09	799,15	446,01	
Humedales	2	98	200	6	98	590	0,9	98	90,31	0	98	0,953	0	98	0,953	8,99	881,23	98,00	8,81	113,66	10,22	
Terrenos agrícolas	9,1	72	654,8	7,9	81	642,4	3,4	88	302,4	0,1	91	11,45	0,1	91	11,45	20,59	1611,07	78,25	16,11	343,61	70,74	
Bosques	0,5	45	24,03	0	66	3,295	0,5	71	34,16	3,2	83	262,6	3,2	83	262,6	4,23	324,06	76,63	3,24	20,57	0,87	
Praderas y matorrales	2,1	38	81,32	0,5	57	28,19	3,2	70	226,9	2	77	157,2	2	77	157,2	7,92	493,55	62,34	4,94	4,67	0,37	
Áreas des. de vegetación	0,9	70	62,34	0,2	80	19,29	0	87	0	0	90	0	0	90	0	1,13	81,63	72,13	0,82	983,94	11,13	
																		NC	77,34			545,04
																		s	74,43			

### 6.3.3. Infiltración

Volumen de agua que proviene de las precipitaciones (puede ser de ríos o recarga artificial) en un determinado periodo de tiempo, atraviesa la superficie del terreno y ocupa total o parcialmente los poros del suelo. Es necesario recalcar que no toda la infiltración alcanza la zona saturada, pues en mayor o menor proporción una parte de ella se sitúa en la zona superior del suelo y vuelve a la atmosfera mediante el fenómeno de evapotranspiración.

Analíticamente, con los datos anuales de precipitación, evapotranspiración real y escorrentía superficial, es posible estimar la infiltración natural anual (Custodio & Llamas, 1983), que para el área de estudio corresponde a:

$$I = 1.132 \text{ mm} - 545,04 \text{ mm} - 417,46 \text{ mm}$$

$$I = 169,5 \text{ mm}$$

Por otro lado también se puede estimar esta infiltración con la ejecución de la planilla EASYBAL 3.0 (Vazquez-Suñé & Castro, 2002) a partir de la precipitación, sin tener en cuenta los posibles retornos de riego.

Este método consiste en una planilla de cálculo que estima infiltración aplicando el método de Thornthwaite. Se calcula la ETP y la ETR considerando la precipitación (mm) y temperatura (°C) mensual en un periodo de once años, más las características del suelo en cuanto a su disponibilidad de agua, es decir; capacidad de campo, punto de marchitez, humedad inicial, reserva útil, espesor radicular y laminación (Tabla 6.13). El valor de laminación es equivalente a la retención máxima obtenida por cada serie de suelo en el cálculo de la escorrentía superficial. Esta información es ingresada en la planilla EASYBAL 3.0 la cual nos indica datos estimados de infiltración a partir de datos de ETR estimando el déficit hídrico o el exceso que representara la infiltración de cada serie (valores de infiltración mensual de los 11 años de cada una disponible de la Tabla 22 a la 32 en Anexo II).

**Tabla 6.13:** Características de cada serie de suelo del área de estudio para el cálculo de infiltración. (ARN: Arenales, LHY: Llahuecuy, LHN: Llahuen, NNH: Ninhue, STN: San Esteban, D: Dunas, R: Suelos Recientes, CPE: Curanipe, TAL: Terrazas Aluviales, TMA: Terrazas Marinas, MP: Pantano).

	ARN	LHY	LHN	NNH	STN	D	MP	R	CPE	TAL	TMA
Capacidad de Campo (cm <sup>3</sup> agua/cm <sup>3</sup> suelo)	0,08	0,14	0,27	0,33	0,23	0,08	0,29	0,08	0,37	0,21	0,33
Humedad inicial (cm <sup>3</sup> agua/cm <sup>3</sup> suelo)	19,84	7,85	2,18	0,48	0,56	19,80	1,36	19,00	0,17	2,65	0,48
Espesor suelo (m)	0,31	0,39	0,33	0,35	0,13	0,24	0,12	0,14	0,23	0,28	0,19
Punto de Marchitez Permanente	0,03	0,05	0,10	0,17	0,14	0,03	0,11	0,03	0,25	0,09	0,17
Laminación (mm)	90,90	99,48	52,87	43,15	73,97	117,94	37,00	105,23	54,14	50,13	61,43
Reserva Útil (mm)	12,00	26,64	44,03	43,36	12,42	9,84	21,60	6,80	33,00	26,40	28,80
Reserva Inicial (mm)	45,00	71,04	90,65	92,14	44,16	37,39	44,40	25,84	74,25	72,60	61,20

La ponderación de los valores de infiltración de cada serie nos arroja 125,6 mm para el área (Tabla 6.14).

**Tabla 6.14:** Infiltración de cada serie del área de estudio. (ARN: Arenales, LHY: Llahuecuy, LHN: Llahuen, STN: San Esteban, NNH: Ninhue, D: Dunas, R: Suelos Recientes, CPE: Curanipe, TAL: Terrazas Aluviales, TMA: Terrazas Marinas, MP: Pantano).

	ARN	LHY	LHN	NNH	STN	D	MP	R	CPE	TAL	TMA	
Infiltración (mm)	191,7	154,5	41,1	1,6	116,2	312,6	1,1	282,6	58,5	44,9	61,8	
% del área	49,9	0,8	3,67	2,8	0,8	4,65	19,6	0,7	6,68	2,87	7	
Producto	95,66	1,236	1,508	0,045	0,93	14,54	0,216	1,978	3,908	1,289	4,326	125,6 mm

En resumen, de los 1.132 mm de precipitación media anual se estima una evapotranspiración real de 414,46 mm, una escorrentía superficial de 545,04 mm y una infiltración de 125,6 mm.

## 7. HIDROGEOQUÍMICA

### 7.1. Parámetros fisicoquímicos

Características del agua subterránea que son medidas in situ con el fin de mantener estas propiedades previo a la extracción. Los parámetros medidos en el área de estudio son pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y temperatura (Tabla 7.1).

**Tabla 7.1:** Parámetros fisicoquímicos medidos en el área de estudio. UTM WGS 84 zona 18 H.

Punto	Ubicación Este (m)/Norte (m)	pH	Conductividad $\mu\text{S/cm}$	Sólidos Disueltos mg/ml	Temperatura (°C)
1	668.806/5.928.175	7,32	612	521	17,4
2	670.624/5.930.013	7,61	352	434	17,6
3	671.598/5.927.391	7,4	521	566	15
4	672.113/5.929.013	7,3	478	765	17,3
5	672.524/5.926.287	7,3	511	455	12,4

#### 7.1.1. pH

Parámetro que mide el potencial de hidrógeno. En otras palabras, el carácter ácido o básico de una muestra, en este caso del agua subterránea. De este valor depende la cantidad y forma química de diversas sustancias disueltas en ella. Se mide en escala de 0 a 14, en donde se definen como ácidas sustancias con pH menor a 7, pues existen más iones hidrógenos en disolución. Al contrario, las sustancias con pH mayor a 7 son consideradas alcalinas. Así mismo, una sustancia con un pH 7 es considerada neutra, por ejemplo el agua pura (Sánchez, 2011). En el área de estudio el pH varía entre 7,3 y 7,61, con un promedio de 7,39 (Tabla 7.1). El agua subterránea posee un rango de pH entre 6,5 a 8, como consecuencia de la presencia de  $\text{CO}_2$  y  $\text{HCO}^{-3}$  (Custodio & Llamas, 1996).

#### 7.1.2. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad de un cuerpo, en este caso una solución, de conducir una corriente eléctrica. Esta medida depende de la presencia de iones, su concentración total, movilidad; valencia, concentración relativa y temperatura de medición. La

unidad de medida es el  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En la zona de estudio la conductividad eléctrica toma valores desde 352  $\mu\text{S}/\text{cm}$  hasta 612  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con un promedio de 494  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Tabla 7.1). Los valores normales en agua dulce oscilan entre 100 y 2.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en salmueras pueden alcanzar valores de 100.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (FCIHS, 2009).

### **7.1.3. Sólidos disueltos totales**

Mide el peso de todas las sustancias disueltas en el agua, sean volátiles o no (mg/l). En general, si una muestra contiene menos de 500 mg/l de sólidos disueltos totales es apta para uso doméstico y/o uso industrial. Las mediciones in situ indican un rango de sólidos disueltos totales entre 434 mg/l y 765 mg/l (Tabla 7.1). Según Custodio & Llamas (1996), en aguas dulces el valor fluctúan entre 50 ppm y 1.500 ppm.

### **7.1.4 Temperatura**

La distribución espacial de temperatura en un acuífero depende de la conductividad térmica e hidráulica del medio, de la relación longitud/profundidad de la cuenca; de la configuración del nivel freático y la distribución de esta misma en el ambiente, respecto de las zonas de recarga y descarga, entre otros factores (Sánchez, 2011). Los valores de temperatura medidos en el área de estudio fluctúan entre 12,4 °C y 17,6 °C (Tabla 7.1). Las fluctuaciones de este valor podría explicarse a la temperatura ambiental, ya que en contacto con la superficie (hasta 20 m aproximadamente) el acuífero es propenso a las variaciones estacionales de temperatura del aire, mientras que a mayor profundidad, se tiene un efecto amortiguador de la variación de la temperatura del agua subterránea (Werner, 1996).

La cantidad de puntos en el área es muy pobre. Esto nos entrega información muy escasa y no permite definir sectores con diferencias muy marcadas.

Considerando la Norma Chilena Oficial NCh 409/1.of.2005 (Instituto Nacional de Normalización, 2005):

a) pH: debe variar entre 6,5 y 8,5, por lo que todos los puntos de medición se encuentran dentro del rango aceptable.

- b) Conductividad eléctrica: el rango en que debe encontrarse es entre 100 y 2.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Todos los puntos están dentro de este rango.
- c) Sólidos disueltos: el valor debe ser menor a 1.500 mg/l, por lo cual todos los pozos están dentro de los parámetros normales.
- d) Temperatura: varía debido a las diferentes horas en que se tome el dato, el tipo de agua, superficial o subterránea, o debido a otros factores.

En síntesis, todas las muestras cumplen con los requisitos exigidos por la Norma Chilena Oficial NCh 409, por lo que se recomienda realizar análisis químico para una posible potabilización y tratamiento.

## **7.2. Contenido en metales pesados**

Se toman dos muestras de agua subterránea (A y B) obtenidas por SGS Chile Ltda. durante la primera semana del mes de febrero del año 2018 en la comuna de Hualpén (A: Este 667801 m / Sur 5927768 m y B: Este 667205 m / Sur 5928020 m, Coordenadas UTM WGS 84 zona 18 H), en las cuales se mide la presencia de 18 elementos: Al, As, B, Cd, Zn, Cl, Cr, Cu, F, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se,  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{S}^{-2}$  (Tabla 7.2). Además se controla “in situ” datos de pH, conductividad eléctrica y temperatura.

**Tabla 7.2:** Análisis metales pesados en el área de estudio. Realizado por SGS Chile Ltda.

Metal Pesado	Límite de detección (mg/l)	Concentración A (mg/l)	Concentración B (mg/l)
Aluminio	0,09	12,17	1,41
Arsénico	0,001	0,005	<0,001
Boro	0,05	<0,05	<0,005
Cadmio	0,005	<0,005	<0,005
Zinc	0,02	0,12	<0,02
Cloruro	5	28	24
Cobre	0,02	0,09	<0,02
Cromo	0,03	<0,03	<0,03
Fluoruro	0,2	0,2	<0,2
Hierro	0,01	36,13	1,4
Manganeso	0,02	2,94	0,05
Mercurio	0,0005	<0,0005	<0,0005
Molibdeno	0,02	<0,02	<0,02
Níquel	0,05	<0,05	<0,05
Plomo	0,03	<0,03	<0,03
Selenio	0,001	<0,001	<0,001
Sulfato	10	89	55
Sulfuro	0,2	<0,2	<0,2

Para la muestra “A” se mide un pH de 7,09, una temperatura de 18,7 °C y una conductividad eléctrica de 541,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Por su parte, en la muestra “B” se obtiene un pH de 7,65, 20,2 °C de temperatura y 307,7  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de conductividad eléctrica.

Dada la ausencia de una normativa asociada a la calidad de las aguas subterráneas en el país, se utilizó como referencia los parámetros del Decreto Supremo N° 46 de 2002, “Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas”.

El análisis de la concentración de cada elemento que supera el valor característico de dicha normativa en el agua subterránea de la zona es el siguiente:

- **Aluminio:** Ambas muestras superan el valor característico de 1 mg/l (Tabla 7.3). Este elemento puede asociarse en gran medida como resultado de la industria química y de la construcción. Su abundancia podría explicarse a la presencia de silicatos, lo cual podría enmascarar focos potenciales de contaminación (Llamas, 1991).



**Tabla 7.3:** Valor característico de metales pesados según Decreto Supremo N° 46 de 2002.

Metal pesado	Valor característico (mg/l)
Aluminio	1
Arsénico	0,05
Boro	0,75
Cadmio	0,01
Zinc	1
Cloruro	400
Cobre	1
Cromo Hexavalente	0,05
Fluoruro	1,5
Hierro	1
Manganeso	0,03
Mercurio	0,001
Molibdeno	0,07
Níquel	0,1
Plomo	0,2
Selenio	0,01
Sulfato	300
Sulfuro total	3

- **Manganeso:** En ambas muestras la medición supera con creces el valor característico (0,03 mg/l) (Tabla 7.3). Este metal se encuentra en rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, debido a que es capaz de sustituir fácilmente elementos como el magnesio, hierro y calcio (Salomons & Forstner, 1984). El magnesio es de gran uso industrial sobretodo en la industria del petróleo. Además puede tener orígenes por urbanización del sector, calefacción en la industria y obras de edificación.

- **Hierro:** El hierro se presenta de manera natural en aguas subterráneas, las concentraciones de este metal pueden aumentar por disolución de rocas ferrosas. Ambas muestras exhiben niveles de hierro por encima del valor característico, que corresponde a 1 mg/l (Tabla 7.3).

## 8. VULNERABILIDAD

### 8.1. Generalidades

Se define como vulnerabilidad de un acuífero al nivel de penetración de un contaminante que alcanza una posición específica dentro del mismo, después de introducirlo sobre la zona no saturada. En el mismo sentido, el riesgo de contaminación está definido por las características del acuífero, las cuales son estáticas, y por las actividades potencialmente contaminantes, que se comportan de manera dinámica, según Ground Water Vulnerability Assesment (Vrba & Zaporozec, 1994).

Es importante señalar que la utilización de un método u otro para la medición de la vulnerabilidad de un acuífero queda determinada por la disponibilidad de información a la cual se tiene acceso. Es por esto que la Dirección General de Aguas la determina según lo indicado en el “Manual para la aplicación del concepto de vulnerabilidad de acuíferos establecido en la norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas. Decreto Supremo 46 de 2002” (Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, Dirección General de Aguas, 2004). El método optado (BGR) es el desarrollado por el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales en conjunto con los Servicios Geológicos Federales de Alemania.

### 8.2. BGR

El método BGR se desarrolló originalmente para evaluar lo que ocurría ante un eventual ingreso de agua como parte de recarga por lluvia, por lo que solo es una estimación de lo que ocurre con ingresos intencionados. Es por esto que se utiliza con modificaciones propuestas por la DGA y considerando la recarga natural como la lluvia y la recarga artificial como la descarga contaminante.

La combinación de cuatro parámetros determina la rapidez con la que una determinada sustancia alcanza el acuífero, se asume que esta es infiltrada en la superficie del terreno o cercano a ella. A dichos parámetros se les asocia un puntaje, los cuales ponderados y sumados entre sí, dan como resultado un valor que se traduce en una medida de vulnerabilidad. Estos corresponden a:

- **Capacidad de campo efectiva:** capacidad de campo efectiva unitaria multiplicada por el espesor de suelo correspondiente. Se mide en mm.

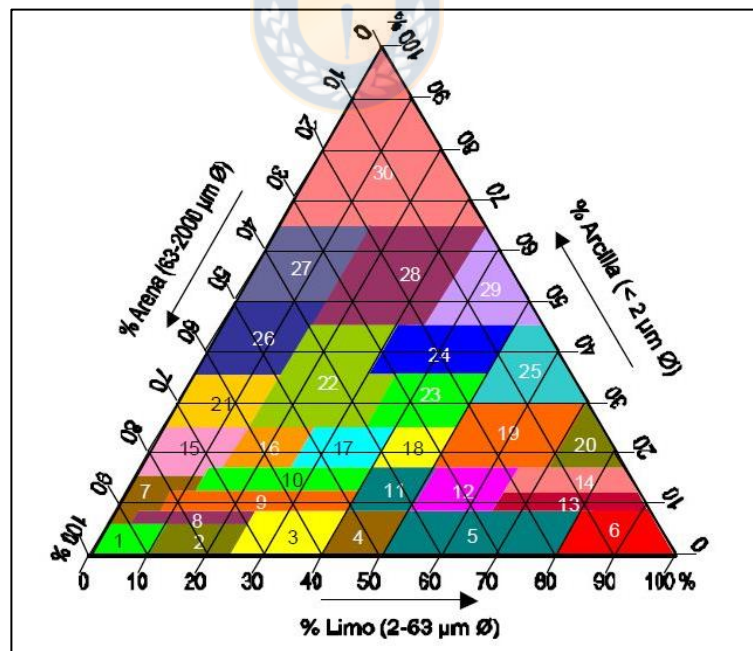
- **Recarga natural:** valor que equivale a la infiltración.
- **Litología:** tipo de sedimentos o rocas presentes en la zona no saturada. Se asume que esta será atravesada por el contaminante.
- **Espesor zona no saturada:** potencia de la zona no saturada atravesada por el contaminante antes de alcanzar el acuífero.

## 8.2.1. Evaluación de parámetros

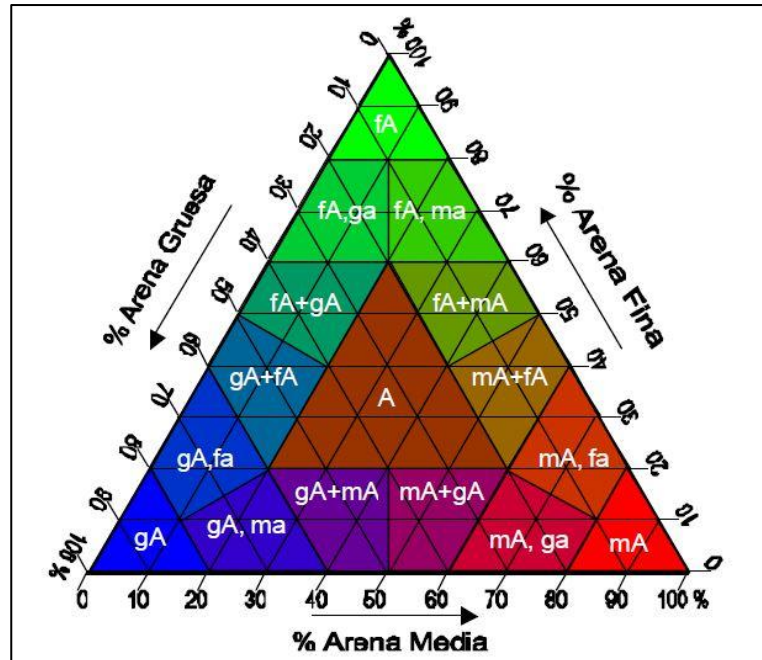
### 8.2.1.1. Capacidad de campo efectiva (S)

Se refiere al producto de la capacidad de campo efectiva unitaria “CCEU” (humedad de volumen de suelo disponible para la vegetación) por el espesor de este mismo.

En la determinación de la CCEU en primer lugar se clasifica cada serie de suelo del área de estudio de acuerdo a su composición granulométrica hasta profundidades de un metro (Figura 8.1 y 8.2) y según su densidad aparente en Densidad Efectiva de Depositación Dd1 ( $<0,7 \text{ g/cm}^3$ ), Dd2 ( $0,7-0,1 \text{ g/cm}^3$ ), Dd3 ( $1,0 - 1,3 \text{ g/cm}^3$ ), Dd4 ( $1,3 - 1,6 \text{ g/cm}^3$ ) y Dd5 ( $>1,6 \text{ g/cm}^3$ )



**Figura 8.1:** Triángulo tipo de suelos finos. Manual para la aplicación del concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos. DGA, 2004.



**Figura 8.2:** Triángulo de clasificación de arenas. Manual para la aplicación del concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos. DGA, 2004.

La CCEU se multiplica por la razón entre el peso de suelo fino en la muestra y el peso total de la muestra. Finalmente el producto de la CCEU por el espesor de cada horizonte de suelo arroja el valor de la capacidad de campo efectiva total. Con este último valor se obtiene el puntaje S (Tabla 8.1). Todos los cálculos realizados para obtener dicho puntaje se resumen en la Tabla 8.2.

**Tabla 8.1:** Evaluación de los suelos sobre la base de la capacidad de campo efectiva.

$\Sigma$ CCE (mm) hasta 1 m de profundidad	Puntaje S
$\geq 250$	750
200 - 249	500
140 - 199	250
90 - 139	125
50 - 89	50
$\leq 49$	10

**Tabla 8.2:** Cálculo del puntaje S del área de estudio.

Serie de suelo	Arenales			Curampe			Dunas			Llahuecuy			Llahuen			Ninhue			Pantano		San Esteban		Suebs Recientes		Terraas Ahviales		Terraas Marinas							
	17-36	36-56	56-80	17-52	52-85	85-100	17-100	100-170	170-250	18-45	45-87	87-100	19-45	45-75	75-95	95-120	17-53	53-65	65-95	0-100	100-200	200-300	26-62	62-113	0-100	100-200	200-300							
Profundidad (cm)	0-17	36-56	80-100	0-17	52-85	120	0-17	100	17-45	45-87	100	0-19	45-75	75-95	95-120	17-53	53-65	65-95	0-100	100-200	200-300	26-62	62-113	0-100	100-200	200-300								
Arena (%)	95,6	100	99,6	99,4	99,3	46	29,9	28,4	27,2	96,5	98	81,1	79,9	78,6	76,4	42,9	27,8	24,3	34,7	29,3	21,7	21,1	18,1	14,8	21	57,1	51,9	47,6						
Limo (%)	4,4	0	0,4	0,6	0,7	25,4	20,9	22,1	21,2	2	1,8	1,8	1,9	20,7	22,9	47,3	56,2	61	44,9	40,5	50,5	50,2	51,1	50,9	50	23,8	17,9	16,8						
Arcilla (%)	0	0	0	0	0	28,4	49,1	49,3	51,6	1	0,2	1,1	1,1	0,7	1,8	9,8	16	14,7	10,2	11,2	27,8	28,7	30,8	34,3	18	19,1	30,2	35,5						
Clasf. según Granulometría	gA+ mA	gA, mA	gA, mA	gA, mA	gA, mA	22	28	28	28	gA, mA	2	2	2	2	2	11	19	12	18	23	23	23	19	25	23	16	22	22	gA, ma	9				
Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,53	1,53	1,51	1,52	1,62	1,49	1,33	1,34	1,6	1,41	1,56	1,17	1,2	1,25	1,32	1,45	1,47	1,43	1,42	1,4	1,43	1,4	1,41	1,38	1,54	1,31	1,23	1,17	1,51	1,51	1,54	1,49		
Clasf. Densidad (Arcilla+Limo)/(Arcilla+Limo+Arcilla)	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd5	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd3	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd3	Dd3	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4	Dd4
CCEU (mm/dm)	5	4,5	4,5	4,5	4,5	10,5	11	11	11	4,5	4,5	16	16	16	16	17	14,5	19,5	18	11	11	11	14,5	18	11	12,5	13,5	13,5	4,5	4,5	15,5	11	11	
Espesor (dm)	1,7	1,9	2	2,4	2	1,7	3,5	3,3	1,5	1,7	8,3	1,8	2,7	4,2	1,3	1,9	2,6	3	2	0,5	1,7	3,6	1,2	3,5	10	2,6	3,6	3,8	10	10	10	10	10	
CCE	0,4	0,0	0,0	0,1	0,1	9,6	27,0	26,0	12,0	0,2	0,7	5,4	8,7	14,4	5,1	18,4	27,2	44,3	22,1	3,5	14,6	31,2	14,3	53,7	84,0	0,0	13,9	23,4	26,9	0,9	0,9	6,2	62,0	88,0
Σ CCE	0,5					74,6				0,9	33,6		115,5									113,8				84	64,2			0,9	62	88	88	
Puntaje S	10					50				10	10		125									125				50	50			10	50	50	50	

### 8.2.1.2. Infiltración (R)

Utilizando la Tabla 8.3, la cual asigna un puntaje R para diferentes rangos de infiltración, se puede obtener un valor específico para cada una de las series con estimaciones realizadas en el capítulo 6 (Tabla 8.4).

**Tabla 8.3:** Puntaje R relacionado a la infiltración.

Infiltración (mm/año)	Puntaje R
≤ 99	1,75
100 - 199	1,5
200 - 299	1,25
300 - 399	1
≥ 400	0,75

**Tabla 8.4:** Puntaje R de cada serie en la zona con respecto a la infiltración anual de cada una. (ARN: Arenales, LHY: Llahuecuy, LHN: Llahuen, NNH: Ninhue, STN: San Esteban, D: Dunas, R: Suelos Recientes, CPE: Curanipe, TAL: Terrazas Aluviales, TMA: Terrazas Marinas, MP: Pantano)

Serie de Suelo	ARN	LHY	LHN	NNH	STN	D	MP	R	CPE	TAL	TMA
Infiltración (mm)	209,85	154,5	41,1	1,6	116,2	312,6	1,1	282,6	58,5	44,9	61,8
Puntaje R	1,25	1,5	1,75	1,75	1,5	1	1,75	1,25	1,75	1,75	1,75

### 8.2.1.3. Tipo litológico (L)

El nivel de protección que presenta el acuífero ante un contaminante expuesto en superficie se calcula para cada litología separadamente. Además, debido a sus propiedades hidrogeológicas diferentes, se evalúan también de esta forma los depósitos no consolidados. Como en cada serie de suelo está presente más de un tipo litológico se considera el tipo litológico de una serie como el que ocupa mayor superficie en cada una.

#### 8.2.1.3.1. Depósitos no consolidados (Ln)

Para poder estimar el tiempo de residencia (de un posible contaminante) se establece una relación de esta propiedad con la capacidad de intercambio catiónico “CIC” del suelo. A este se le asigna un puntaje Ln en base a su CIC con cada uno de los diferentes tipos de depósitos no consolidados (Hölting *et al.*, 1995).

Las descripciones litológicas realizadas en el capítulo 3 permiten aplicar la clasificación estimativa que se encuentra adaptada para los sedimentos no consolidados y para algunas de las equivalencias encontradas comúnmente en las descripciones estratigráficas de sondajes o muestras de mano sus con puntajes Ln asociados (Tabla 8.5).

**Tabla 8.5:** Equivalencias litológicas para descripciones estratigráficas comunes de sondajes y puntajes asociados para la evaluación de Ln.

Depósitos no consolidados	Equivalencias	Puntaje Ln
Arcilla		500
Arcilla poco limosa	arcilla - limo, arcilla fangosa	400
Ceniza fina		400
Turba		300
Sapropel		300
Limo	limo - arcilla, limo arcilloso, limo cementado	300
Arcilla arenosa	arcilla - arena, limo arenoso, limo - arena	270
Arcilla con grava	arcilla con bolones o ripio, limo/arcilla arenoso con grava o bolones o ripio, limo - arena - arcilla	200
Ignimbrita semiconsolidada	pumicita, liparita, cinerita	200
Ceniza gruesa		200
Arena arcillosa	arena - arcilla, arena - arcilla (>20%), arcilla - limo	140
	arena limosa, arena cementada, arena - arcilla - limo	
Grava arcillosa arenosa	ripio o grava o bolones - arcilla (>20%), bolones o grava - limo arcilla	75
Grava arenosa arcillosa	grava - arena - arcilla (<20%), bolones o ripio o grava arenosa poca arcilla	50
	arena arcillosa (<20%), ripio - arcilla - arena, - grava, arena con grava poco limo	
Tefra de lapilli	manto de lapilli, gravilla volcanica, pomez	50
Arena	arena con grava fina, arena con piedrecilla o gravilla, arena - arcilla - blones o grava	25
Grava arenosa	ripio - arena, bolones o ripio arenoso, gravilla	10
Grava	bolones o ripio, bloques, grava, bolones - ripio	5

Las series Arenales, Dunas, Llahuen, Ninhue, Pantanos y Terrazas Aluviales están constituidas en general por distintos tipos de arena con poco material grueso y arcilloso, por ende se les asigna un puntaje de 25. Por su lado la serie Suelos Recientes posee mayor cantidad de gravas por lo que se le asigna un puntaje de 50.

### 8.2.1.3.2. Rocas consolidadas (Lc)

Las rocas, independientemente de su permeabilidad primaria (que en su mayoría es baja) poseen fracturamiento, meteorización y/o karstificación que corresponden a su permeabilidad secundaria.

El puntaje Lc está entonces definido por el producto de:

- Factor TR, definido por el tipo de roca.
- Factor F, expresado por la presencia de fracturas, cavidades kársticas, etc.

Estos puntajes quedan definidos en la Tabla 8.6.

**Tabla 8.6:** Evaluación del puntaje de rocas consolidadas (Lc).

Tipo de roca	TR
Arcillolita, pizarra, marga, limolita.	20
Arenisca fuertemente cementada poco porosa, cuarcita, roca volcánica, roca plutónica, roca metamórfica	15
Arenisca porosa, toba, brecha volcánica (en general rocas volcánicas porosas)	10
Conglomerado, brecha, caliza, caliza tobacea, dolomita, yeso	5
Fracturamiento y otras estructuras geológicas	F
No fracturada	25
Levemente fracturada	4
Moderadamente fracturada, levemente karstica	1
Moderadamente cárstica	0,5
Fuertemente fracturada, fracturada o fuertemente cárstica	0,3
No conocida	1

En general (según lo descrito en los capítulos de Geología y Suelos) las series de Curanipe, Llahuecuy, San Esteban y Terrazas Marinas se asemejan a areniscas porosas (puntaje TR = 10) que poseen un fracturamiento moderado (puntaje F = 1).

### 8.2.1.4. Espesor de la zona no saturada (E)

Para la determinación del espesor de la zona no saturada se utiliza el nivel estático de cada serie, y como dentro de estas se observan diferencias en este valor se utiliza la medición que indica el nivel más alto del agua subterránea en cada una (Tabla 8.7).



**Tabla 8.7:** Espesor zona no saturada de cada serie en el área de estudio.

Serie de Suelos	E (m)
Arenales	13
Curanipe	13
Dunas	3
Llahuecuy	13
Llahuen	3
Ninhue	13
Pantano	7
San Esteban	17
Suelos Recientes	15
Terrazas Aluviales	3
Terrazas Marinas	3

### 8.2.2. Determinación de la efectividad de protección generalizada

Finalmente para determinar la vulnerabilidad de un acuífero, se debe calcular la efectividad de protección generalizada (Pt) para ello, se calculan separadamente las efectividades de protección del suelo (puntaje P1) y de la cobertura litológica (puntaje P2).

P1 corresponde el producto entre el puntaje S y el puntaje R (Tabla 8.8).

**Tabla 8.8:** Valor de P1 por serie en el área de estudio.

Serie de Suelo	S	R	P1
Arenales	10	1,25	12,5
Curanipe	50	1,5	75
Dunas	10	1,75	17,5
Llahuecuy	10	1,75	17,5
Llahuen	125	1,5	187,5
Ninhue	125	1	125
Pantano	50	1,75	87,5
San Esteban	50	1,25	62,5
Suelos Recientes	10	1,75	17,5
Terrazas Aluviales	50	1,75	87,5
Terrazas Marinas	50	1,75	87,5

Por otro lado, el puntaje P2 se calcula multiplicando Lc o Ln (según corresponda) por el espesor (Factor E) en metros de cada serie. Luego, el producto es multiplicado por el factor R (Tabla 8.9).

**Tabla 8.9:** Valor de P2 por serie en el área de estudio.

Serie de Suelo	L	E	R	P2
Arenales	25	13	1,25	406,25
Curanipe	10	13	1,5	195
Dunas	25	3	1,75	131,25
Llahuecuy	10	13	1,75	227,5
Llahuen	25	3	1,5	112,5
Ninhue	25	13	1	325
Pantano	25	7	1,75	306,25
San Esteban	10	17	1,25	212,5
Suelos Recientes	50	15	1,75	1.312,50
Terrazas Aluviales	25	3	1,75	131,25
Terrazas Marinas	10	3	1,75	52,5

Así, la efectividad de protección generalizada se determina mediante la suma de P1 y P2 de cada serie (Tabla 8.10). La estimación de vulnerabilidad se obtiene clasificando Pt según la Tabla 8.11.

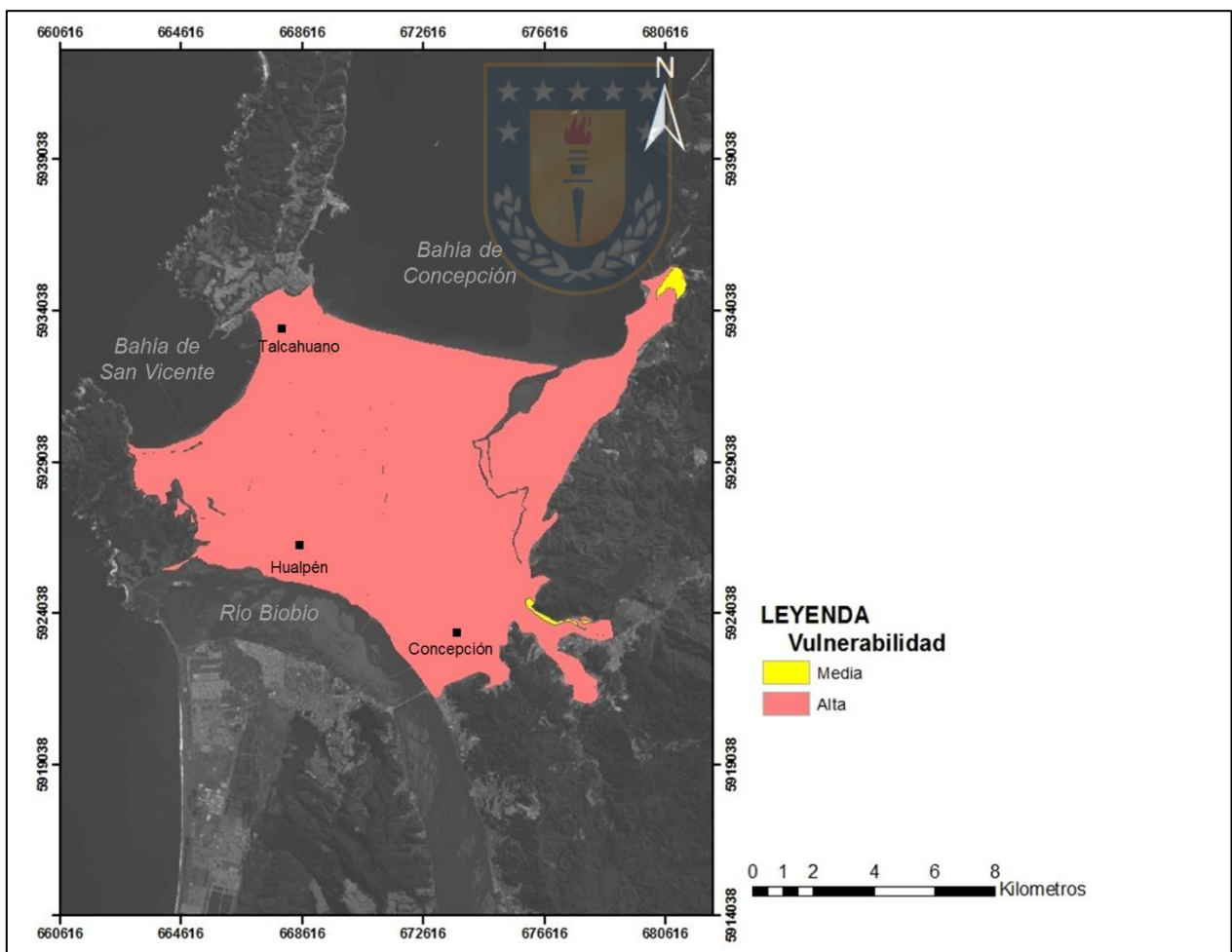
**Tabla 8.10:** Valor de Pt por serie en el área de estudio.

Serie de Suelo	P1	P2	Pt
Arenales	12,5	406,25	418,75
Curanipe	75	195	270
Dunas	17,5	131,25	148,75
Llahuecuy	17,5	227,5	245
Llahuen	187,5	112,5	300
Ninhue	125	325	450
Pantano	87,5	306,25	393,75
San Esteban	62,5	212,5	275
Suelos Recientes	17,5	1.312,50	1.330
Terrazas Aluviales	87,5	131,25	218,75
Terrazas Marinas	87,5	52,5	140

**Tabla 8.11:** Efectividad generalizada de protección y vulnerabilidad asociada.

Pt	Efectividad generalizada de protección	Vulnerabilidad asociada, estimada del acuífero ante emisiones	Tiempo de residencia aproximado en el suelo y subsuelo sobre el acuífero
$\geq 4.000$	Muy alta	Baja	> 25 años
2.000 - 3.999	Alta		10 - 25 años
1.000 - 1.999	Moderada	Media	3 - 10 años
500 - 999	Baja	Alta	Varios meses a 3 años
$\leq 499$	Muy baja		Pocos días a 1 año

Toda la zona de estudio posee vulnerabilidad alta a excepción de zonas muy acotadas en la parte NE y SE en donde esta se estima como vulnerabilidad media (Figura 8.3). Esto se debe a que, en sistemas acuíferos someros, se tiene un menor espesor de la cubierta litológica, por lo tanto, una efectividad de protección generalizada muy baja.

**Figura 8.3:** Mapa Vulnerabilidad del área de estudio. Elaboración propia, 2019.

## 9. CONCLUSIÓN

En el área de estudio se encuentran series de suelo de textura “gruesa” como lo son: arenosa (Suelos Recientes, Arenales y Dunas) y arenosa franca (Llahuecuy) que corresponden a suelos de muy alta permeabilidad, baja retención hídrica, alto poder de oxidación de materia orgánica y poco plásticos. Suelos de textura “media”: franco arenosa (Terrazas Aluviales), franco arcillo arenosa (San Esteban), franco limosa (Llahuen y Pantano) y franco arcillosa (Terrazas Marinas) que poseen una permeabilidad media, son moderadamente plásticos y tienen características óptimas para el desarrollo vegetal (ideales para agricultura). Y por último, series de textura “fina”: franco arcillo limosa (Ninhue) y arcillosa (Curanipe) que son de fácil encharcamiento, muy baja permeabilidad, muy plásticos, de alta retención hídrica y pérdidas importantes de agua por evaporación y escorrentía superficial.

Dependiendo de la permeabilidad de las rocas, de la ocurrencia o no de aguas subterráneas y de la capacidad de almacenamiento se definen dos unidades hidrogeológicas: Unidad Hidrogeológica 1, definida como acuífugo y Unidad Hidrogeológica 2, en donde se define un acuífero de tipo libre, del cual es posible inferir la geometría de forma general. Este posee como límites: al norte la Bahía de Concepción, por oeste la Bahía de San Vicente, por el este la Cordillera de la Costa y por el sur presenta conexión con el Río Biobío. En su parte inferior tiene una capa impermeable (basamento cristalino) y en su parte superior carece de un techo confinante, dejando así el nivel del agua subterránea en equilibrio con la presión atmosférica. Mediante la interpretación de los sondeos eléctricos verticales se obtuvo información del espesor del acuífero y de la profundidad del basamento en diversos puntos, promediando 91,75 m en las cercanías de la Bahía de Concepción y 93,1 m en el sector SSW de la zona de estudio.

La intrusión salina es un proceso dinámico que afecta a acuíferos costeros en donde la interfaz agua dulce-agua salada avanza tierra adentro en periodos de menor recarga del acuífero o mayor extracción del recurso hídrico del lugar. En la zona es importante realizar mayores estudios de este fenómeno sobre todo en dos áreas en donde los sondeos eléctricos verticales indican una posible ocurrencia de esto. Uno de ellos en la Bahía de San Vicente en donde el SEV 13 y el SEV 15 evidencian a más de 48 m de profundidad la presencia de agua salada. Por otro lado, en la zona SSW del área de estudio el SEV 9, a 26 m de profundidad y el SEV 11, a 102 m de

profundidad indican también la ocurrencia de este fenómeno. Todo esto demostrado por resistividades  $<1 \Omega \cdot m$ . La diferencia en la profundidad en estos dos últimos sondajes se debe a que el interfaz agua dulce-agua salada se profundiza hacia el E.

Respecto a la relación entre las interpretaciones de los SEV y las descripciones de los sondajes (Carlos Galli Olivier, 1966) y excavaciones (Carlos Galli Olivier & Richard W. Lemke, 1967). Cabe mencionar que, coinciden en gran mayoría. Notando diferencias entre una y otra que podrían explicarse a que las excavaciones poseen inexactitud en su ubicación (dentro del registro del SERNAGEOMIN no fue posible encontrar indicaciones exactas de la ubicación de cada uno de estos, solo descripciones de estas como “100 m al sur de Carriel Sur”). En este mismo sentido, la diferencia del nivel freático entre lo interpretado por los SEV y dichas excavaciones se explicaría por este mismo efecto, sumado a la diferencia de más de 50 años entre este estudio y los anteriores. Lo que evidentemente produce diferencias en la medición del nivel freático en la zona.

Las variaciones de transmisibilidad apuntan a variaciones en el espesor del acuífero y/o a variaciones en la permeabilidad de este (Villanueva & Iglesias, 1984). La deducción del espesor se hace con respecto a la profundidad del basamento en el acuífero libre que, según los resultados obtenidos en la campaña de prospección geofísica, este espesor es mayor hacia el NW (144 m en SEV 1 y SEV 20). Así como en el lado E de la zona de estudio el acuífero disminuye su espesor (78 m, 60 m y 70 m en SEV 12, SEV 13 y SEV 16 respectivamente). Por otro lado, la variación de permeabilidad es directamente proporcional a la transmisibilidad. En la zona NW la permeabilidad alcanza valores de 181,82 m/d y en la parte E toma valores entre 6,59 m/d y 37,24 m/d.

La estimación para el área de estudio de la evapotranspiración real corresponde a 414,46 mm/año, la escorrentía superficial de 545,04 mm/año e infiltración 125,6 mm/año.

Los parámetros fisicoquímicos ( $t^\circ$ , sólidos disueltos, pH y conductividad eléctrica) tomados en el área de estudio en terreno están dentro de la Norma Chilena Oficial NCh 409/1.of.2005. Respecto a la concentración en el agua subterránea de metales pesados, están en cumplimiento con el Decreto Supremo N° 46/2002, a excepción de los valores de Al, Fe y Mn, en donde la alta concentración de estos elementos puede ser explicada por la disolución de rocas ígneas,

metamórficas y sedimentarias concentrándose de forma natural en aguas subterráneas. Las diferencias en la concentración del Fe con el Pb (correlación negativa) puede explicarse por la fuerte afinidad del Fe para precipitar metales, proceso que disminuye la concentración de Pb en la solución (Inocencio-Flores *et al.*, 2013). Es importante tener en cuenta que valores sobre el “valor característico” de estos elementos también pueden deberse a la utilización de estos metales en la industria del acero, en abrasivos, pinturas de diversos tipos, en la industria del petróleo, etc. Siendo este último punto a considerar, debido a la ubicación dentro del área de estudio de planta refinadora de petróleo perteneciente a ENAP (ENAP Refinería Biobío). Precisamente es en la ubicación de esta planta donde se obtuvo ambas muestras de agua para el análisis de metales pesados. El análisis de Vulnerabilidad realizado con el método BGR evidencia un alto grado de vulnerabilidad del acuífero en casi toda su extensión.



## 10. REFERENCIAS

AGUIRRE, L.; HERVÉ, F. & GODOY, E. 1972. Distribution of metamorphic facies in Chile-an outline. *Krystalinikum*, Vol. 9, p. 7-19.

ARENAS, F.; HIDALGO, R. & MATTOS, C. 2009. Chile: del país urbano al país metropolitano. Pontificia Universidad Católica de Chile: 469 pp. Santiago, Chile.

BIRÓ-BAGÓCZKY, L. 1982. Revisión y redefinición de los Estratos de Quiriquina, Campaniano-Maastrichtiano, en su localidad tipo, en la Isla Quiriquina, 36°37' Lat. S. Chile, Sudamérica, con un perfil complementario en Cocholgue. En *Congr. Geol. Chileno*, No. 3, Actas, Vol. 1, p. A29-A64. Concepción.

BÖRGEL, R. 1983. Geografía de Chile, Tomo II, Geomorfología. Geografía de Chile, Ediciones Instituto Geográfico Militar: 182 pp. Santiago.

CAPPETTA, H. 1987. Mesozoic and Cenozoic Elasmobranchii, Chondrichthyes II. In *Handbook of Paleoichthyology*. Gustav Fisher Verlag: 193 pp. Stuttgart.

CARTES, I. 2004. Petrografía y ambiente de depositación de las Metapelitas paleozoicas con huellas fósiles entre Tomé y Lirquen VIII región del Biobío. Chile.- Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción (Inédito): 115 p. Concepción.

CECIONI, A.; ESTERIO, H.; PINEDA, V. & QUEZADA, J. 1997. Geología Urbana de Talcahuano. En *Congreso Geológico Chileno*, 8., Antofagasta, Chile, 13-17 Octubre 1997: pp.785-789.

CERDA, A. 1998. The influence of geomorphological position and vegetation cover on the erosional and hydrological processes on a Mediterranean hillslope. *Hydrological Processes* 12: 661–671.

CHOW, V.; MAIDMENT, D. & MAYS, D. 1994. *Hidrología Aplicada*. Editorial Mc Graw-Hill: 584 pp. Santa Fe de Bogotá, Colombia.

CIERC-SERPLAC. 1977. *Atlas de Concepción Metropolitano*.

CIREN. 1999. *Descripciones de Suelos Materiales y Símbolos*, Estudio Agrológico VIII Región. Centro de Información de Recursos Naturales. Tomo 1: 288 pp. Santiago, Chile.

COLLAO, S.; ALFARO, G.; CECIONI, A.; GONZÁLEZ, A. & QUINZIO, A. 2000. Evaluación de los recursos metálicos de la Región del Bío-Bío. Proyecto Fondo Nacional de Desarrollo Regional. Departamento Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción (Inédito): 80 pp. Concepción.

CUSTODIO E. & LLAMAS M. 1983. *Hidrología Subterránea*. Editorial Omega, Segunda Edición, Tomos I y II: 2350p. Barcelona.

CUSTODIO E. & LLAMAS M. 1996. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega. 1224 pp. Barcelona.

DANIELS, F. & ALBERTY, R. 1966. Physical Chemistry. Third edition. John Wiley and Sons, Inc. New York.

DEPARTAMENTO DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE RECURSOS HIDRICOS, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 2004. Manual para la aplicación del concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos establecido en el Decreto 46 de 2002.

DIRECCIÓN GENERAL DE AERONAUTICA CIVIL. 2018. Anuario Climatológico de la Dirección Meteorológica de Chile.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 2002. Decreto Supremo N° 46 de 2002. Concepto de vulnerabilidad de acuíferos establecido en la norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas.

DONOSO, C. 2011. Caracterización de suelos en las localidades de Arauco, Colcura, San Pedro de la Paz y Concepción, Mediante prospección eléctrica. Tesis para optar al grado de Geofísico, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Concepción, Concepción. 129 páginas.

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES, Universidad de Concepción.

FCIHS. 2009. Hidrogeología: Conceptos básicos de hidrología subterránea. Comisión docente curso internacional de hidrología subterránea. Barcelona.

GAJARDO, A. 1981. Hoja Concepción-Chillán, Región del Bío-Bío. Escala 1:250.000. Mapas Geológicos Preliminares de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas: 56 pp. Santiago.

GALLI, C. 1966. Suelo de fundación de las Hojas Talcahuano, Cosmito y Hualpencillo: informe preliminar.

GALLI, C. 1967. Geología Urbana y Suelos de Fundación de Concepción y Talcahuano.- Departamento de Geología y Mineralogía, Universidad de Concepción 247p. Concepción.

GALLI, C. & W. LEMKE R., 1967. El suelo de fundación de Concepción, Instituto de investigaciones geológicas, CHILE.

GLODNY, J.; ECHTLER, H.; COLLAO, S.; ARDILES, M.; BURÓN, P. & FIGUEROA, O. 2008. Differential Late Paleozoic active margin evolution in South-Central Chile (37°-40°S) The Llanhue Fault Zone. Journal of South American Earth Sciences. Vol. 26: 397-411. Oxford.

HAUSER, A. 1995 Carta hidrogeológica de Chile. N° 2, Hoja Talca. Servicio Nacional de Geología y Minería, 73 pp.



- HERVÉ, F. 1976. Superimposed folded and metamorphism in the Laraquete-Colcura área (metamorphic basement of the Central Chile).- *Munst. Forsch.Geol:palaont.* 38/ 99-110-Stuttgart.
- HERVÉ, F. 1977. Petrology of the Crystalline Basement of the Nahuelbuta Mountains, South Central Chile, Comparative studies on the geology of the Circum-Pacific Orogenic Belt in Japan and Chile. Japan Society for the promotion of Science. 97-114 pp. Tokio.
- HERVÉ, F.; GODOY, E.; PARADA, M.; RAMOS, V.; RAPELA, C.; MPODOZIS, C. & DAVIDSON, J. 1987. A general view on the Chilean-Argentine Andes, with emphasis on their early History.- *Circum Pacific orogenic belts and the evolution of the Pacific Ocean Basin.* American Geophysical Union, Geodynamics Series 18. 97-114. Washington.
- HERVÉ, F.; MUNIZAGA, F.; PARADA, M.; BROOK, M.; PANKHURST, R. & SNELLING, D. 1988. Granitoids of the Coast Range of central Chile: Geochronology and geologic setting. *Journal of South American Earth Sciences.* Vol. 1: 185-194 p. Oxford.
- HERVÉ, F.; PANKHURST, R.; FANNING, M.; CALDERÓN, M. & YAXLEY, G. 2007. The South Patagonian batholith: 150 my of granite magmatism on a plate margin. *Lithos*, 97, 373 – 394.
- HÖLTING, B.; HAETLÉ, T.; HOHBERGER, K-H.; NACHTIGAL, K.; VILLINGER, E.; WEINZIERL, W. & WROBEL, J-P. 1995. Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. *Geologisches Jahrbuch*, C 63, p 5-24. Hannover, Alemania.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, 2005. Norma Chilena Oficial NCh 409/1.of.2005. Santiago, Chile.
- KELLER, G. & FRISCHKNECHT, F. 1966. *Electrical Methods in Geophysical Prospecting.* Pergamon Press, Oxford. 517 pp.
- KOPPEN, W. 1948. *Climatología.* Fondo de Cultura Económica. Primera Ed. en español: 478 pp. México.
- LAL, R. & SHUKLA, M. 2004. *Water Infiltration in Soil.* En: *Principles of soil physics.* The ohio State university Columbus, ohio, u.S.A. Marcel dekker, Inc. Pag. 376.
- LEE, R. 1980. *Forest Hydrology.* Columbia University Press. 349 pp. New York, United States of America.
- LLAMAS, J. 1991. Metales pesados en la atmósfera de Madrid. *Boletín Geológico y Minero.* Vol.102-1
- MARDONES, M. & JAQUE, E. 1991. *Geomorfología del valle del río Laja.* Extensos de Ponencias y Seminarios Congreso Ciencias de la Tierra. Instituto Geográfico Militar: 115-121 p. Santiago.

MARTÍNEZ, E.; VALLE, S.; SILVA, P. & ACEVEDO, E. 2004. Evaluación de algunas propiedades físicas y químicas de un suelo Mollisol asociadas a manejo en cero labranza. En: Evaluación de parámetros y Procesos Hidrológicos en el Suelo. Compendio de los trabajos presentados en la VII Escuela Latinoamericana de Física de Suelos. La Serena, Chile. Noviembre del 2 al 14 de 2003.95-100 p. UNESCO, Paris.

MATUS, P. & NOVOA, E. 2006. Enciclopedia regional del Biobío, Pehuén editores limitada: 256 pp. Chile.

MAYOR, A.; BAUTISTA, S. & BELLOT, J. 2009. Factors and interactions controlling infiltration, runoff, and soil loss at the microscale in a patchy Mediterranean semiarid landscape. *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 1702–1711.

MENDOZA, J. 2001. Distribución, caracterización, génesis y características tectónicas de los yacimientos arenas silíceas del área costera de la VIII región, entre Coliumo y Los Alamos.- Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción. (Inédito) 190p. Concepción.

MOCKUS, V. 1964. Estimation of direct runoff from storm rainfall. SCS, National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology, 30pp. Washington, DC.

MUÑOZ, J. 1956. En Yenks, W.F. (Ed.), *Handbook of South American Geology*, Geolo. Soc. Am. Men., vol 65, pp. 187-214. Baltimore.

ORELLANA, E. 1982. *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua* 2ª ed. Paraninfo Ltd, 578 pp. Madrid.

PALACKY, G. 1987. Resistivity characteristics of geologic targets, en: Nabighian, M.N., ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, Vol. 1, pp. 53-129.

PINEDA, V. 1983. Evolución Paleogeográfica de la Cuenca Sedimentaria Cretácico-Terciaria de Arauco. *Geología y Recursos Minerales de Chile*. Univ. Concepción, 1, pp. 375-390.

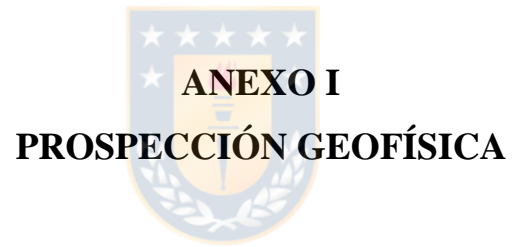
QUEZADA, J.; GONZÁLEZ, G.; DUNAI, T.; JENSEN, A. & JUEZ, J. 2007. Alzamiento litoral Pleistoceno del norte de Chile: edades 21Ne de la terraza costera más alta del área de Caldera-Bahía Inglesa. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 34, No. 1, p. 81-96. (ISI).

SALAZAR, C. 2004. Ammonites del Maastrichtiano de la formación Quiriquina. VIII región del Bio-Bio. Chile sistemática, Bioestratigráfica y afinidades paleobiogeográficas.- Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Concepción (Inédito) 155p. Concepción.

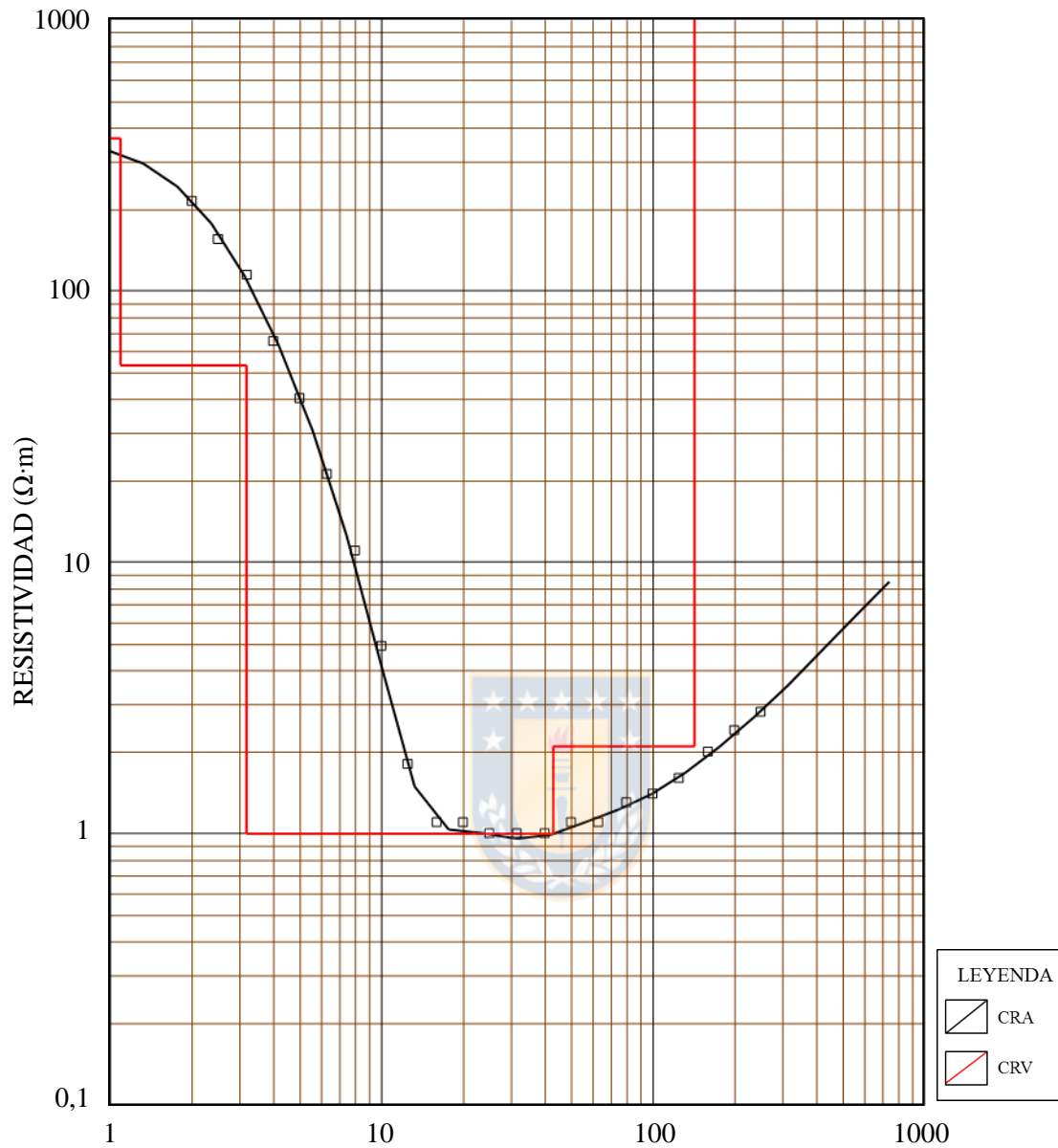
SALOMONS, W. & FORSTNER, U. 1984. *Metal in the hydrocycle*. Springer-Verlag. Heidelberg: 349pp. Berlin.

SÁNCHEZ, F. 2011. Medidas puntuales de permeabilidad. Universidad de Salamanca. 13 pp. Salamanca.

- SAXTON, K.; RAWLS W.; ROMBERGER, J. & PAPENDINCK, R. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science of America Journal*. 50 pp. Madison.
- SERNAGEOMIN. 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería. Publicación Geológica digital. No. 4. Santiago.
- STRUCKMEIER, W. & MARGAT, J. 1995. Hydrogeological maps: A Guide and a Standard Legend. *International Association of Hydrogeologists*. Vol. 17.
- TERLIEN, M. 1998. The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds. *Environmental Geology*, 35(2-3), pp. 124-130.
- THORNTHWAITE, C. & MATHER, J. 1995. The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, *Publications in Climatology*, Vol. 8, N°1: 104pp.
- TURNBULL, L.; WAINWRIGHT, J. & BRAZIER, R. 2010. Changes in hydrology and erosion over a transition from grassland to shrubland. *Hydrological Processes* 24: 393–414.
- USDA, 1964. Hydrology. Section 4, part I, Watershed planning. En: *National Engineering handbook*. Departamento de agricultura de los Estados Unidos, Servicio de Conservación de Suelos: 16pp: Washington DC.
- VÁSQUEZ, P. 2001. Petrología y Geotermobarometría del Basamento Metamórfico de la Cordillera de La Costa de Chile entre los 36° 30' y 38° 00' S. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción. Concepción. pp. 170.
- VÁZQUEZ-SUÑÉ, E. & CASTRO, A. 2002. Plantilla de cálculo de la infiltración EASYBAL 3.
- VILLANUEVA, M. & IGLESIAS L. 1984. Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. ITGE. 426 páginas.
- VRBA, J. & ZAPOROZEC, A. 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. Verlag Heinz. Heise, Hannover, Germany, *International Contributions to Hydrogeology*, Vol. 16, 131 pp.
- WARD, A.; TRIMBLE, S. & WOLMAN, M. 2004. *Environmental Hydrology*. 2nd Edition, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- WERNER, J. 1996. Introducción a la Hidrogeología. Ed. Facultad de Ciencias de la Tierra. Universidad Autónoma de Nuevo León. Primera edición: 174 pp. Ciudad de México.
- WILLNER, A. 2005. Pressure-temperature evolution of an Upper Paleozoic paired metamorphic belt in Central Chile (34°-35°30'S). *Journal of Petrology* 46: 1.805-1.833 p.
- ZELADA, A. & MAQUIRE, P. 2005. Expediente Urbano y Comunal. Estudio de Modificación Plan Regulador Comunal.



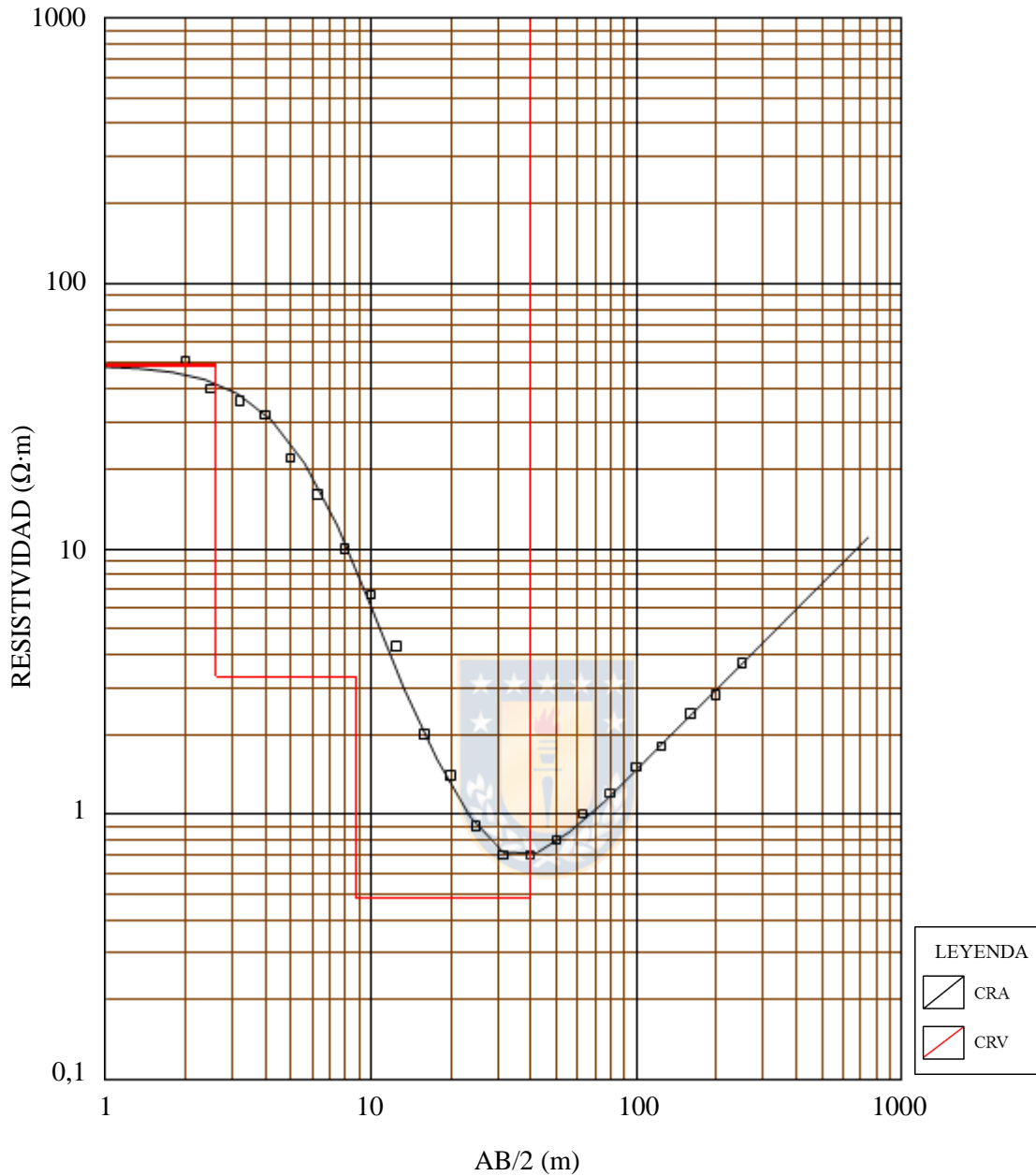
### SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 1



**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)
363	1,1	
53	2,1	1,1
1	40	3,2
2,1	100	43
6500		143

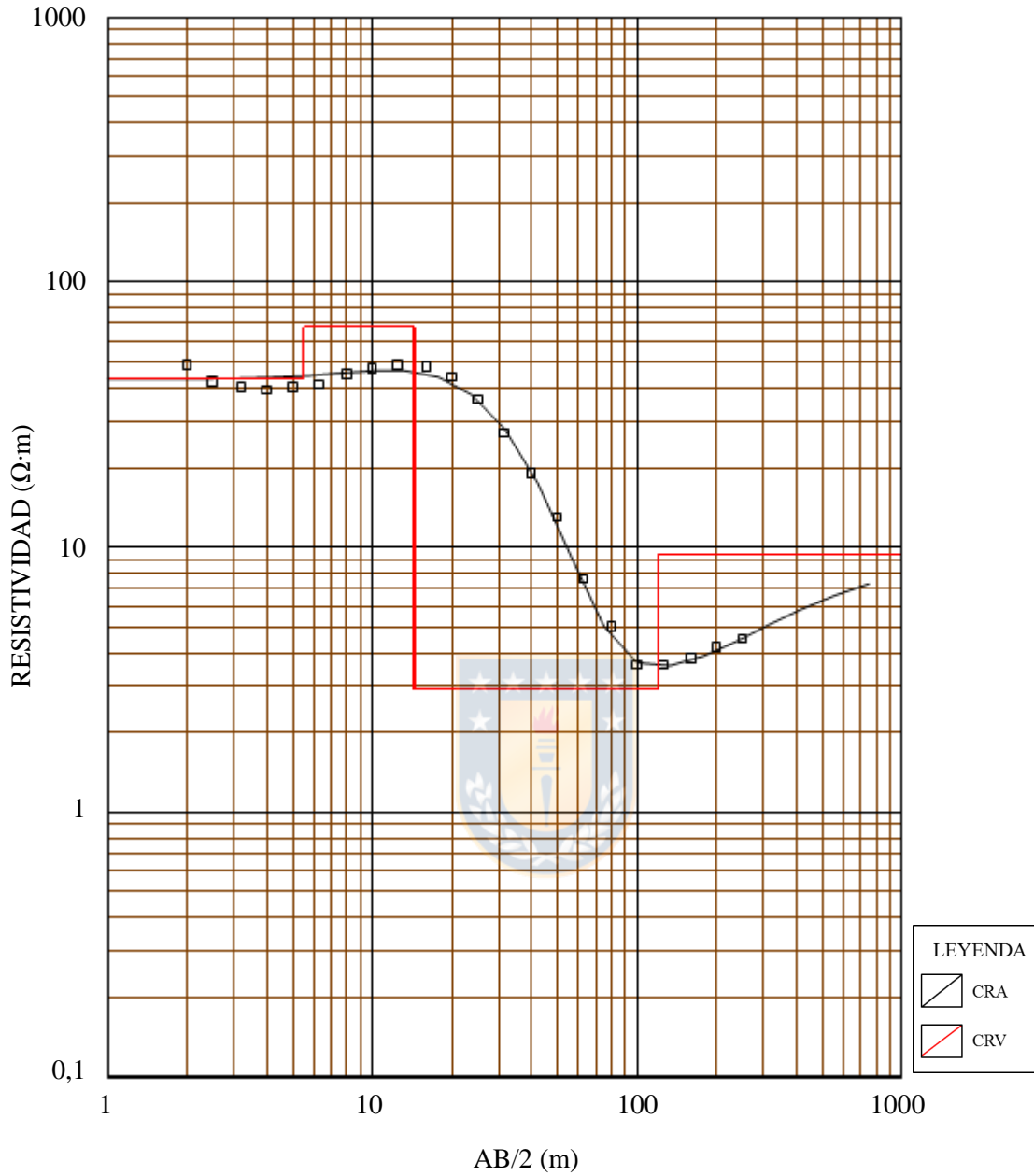
**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 2**



**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)
49	2,6	
3,3	6,2	2,6
0,48	31	8,8
2409		40

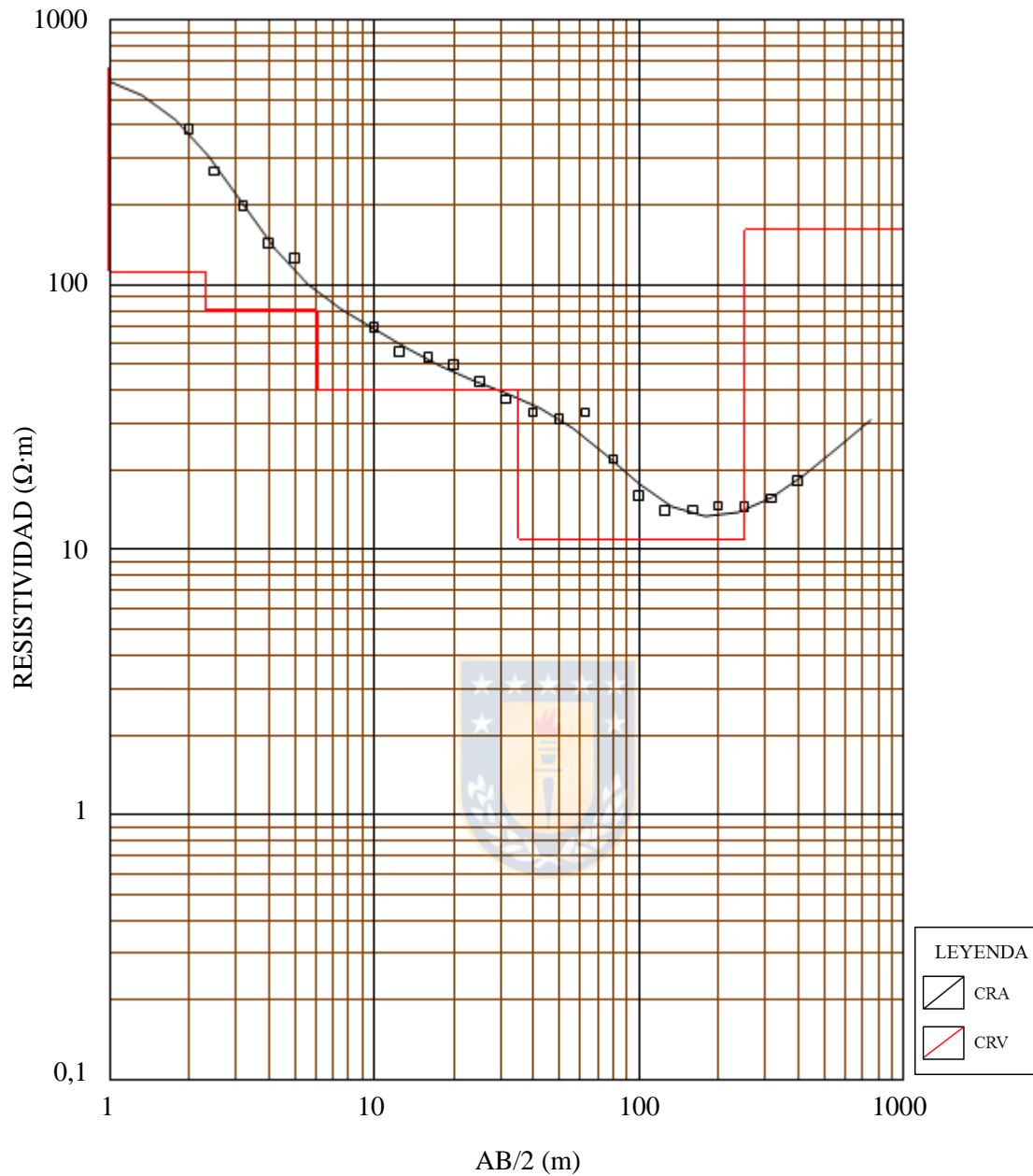
**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 3**



**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)
43	5,5	
68	8,9	5,5
2,9	106	14
9,4		120

### SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 4

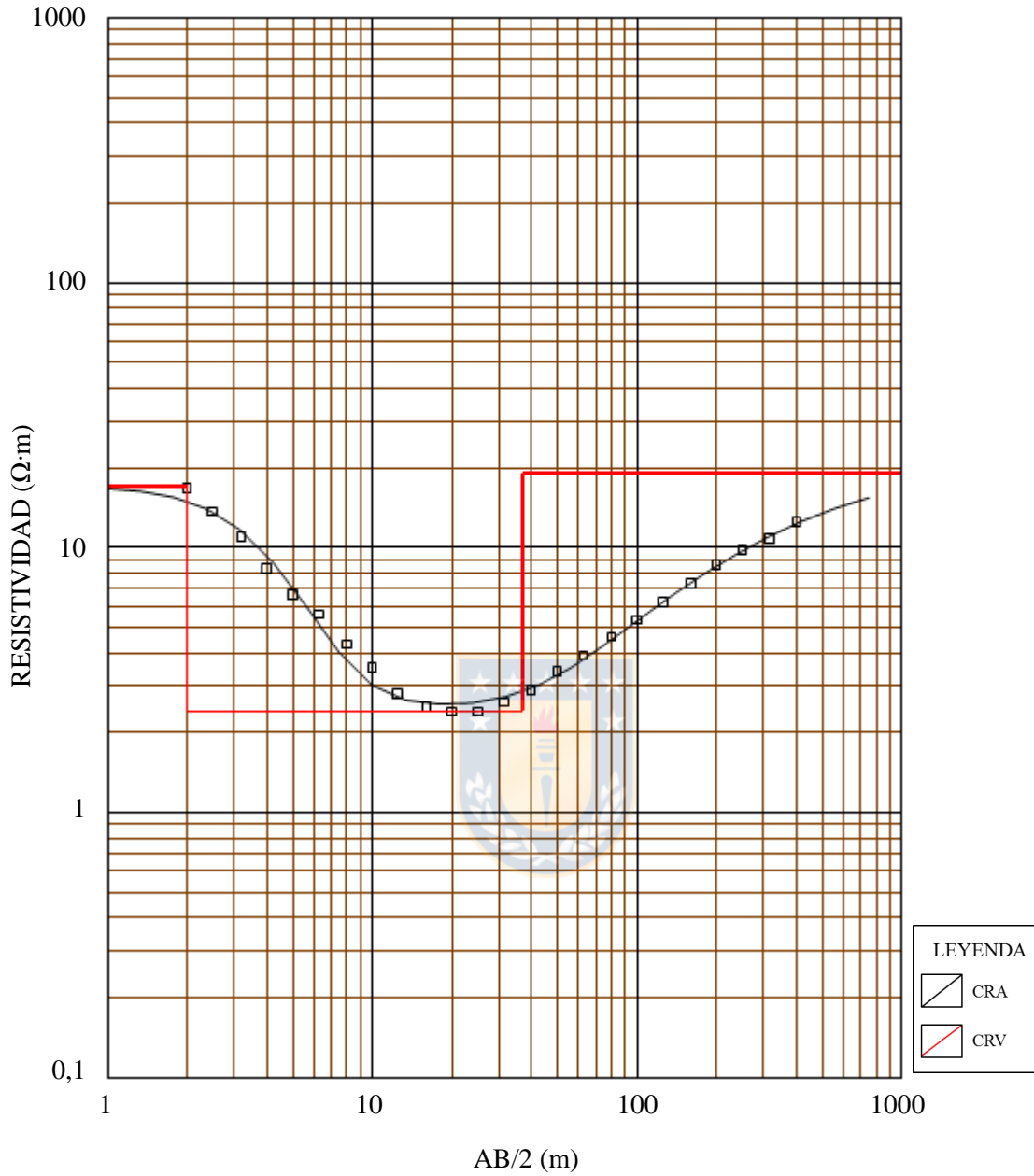


#### MODELO

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)
663	1	
112	1,3	1
80	3,8	2,3
40	29	6,1
11	216	35
162		251



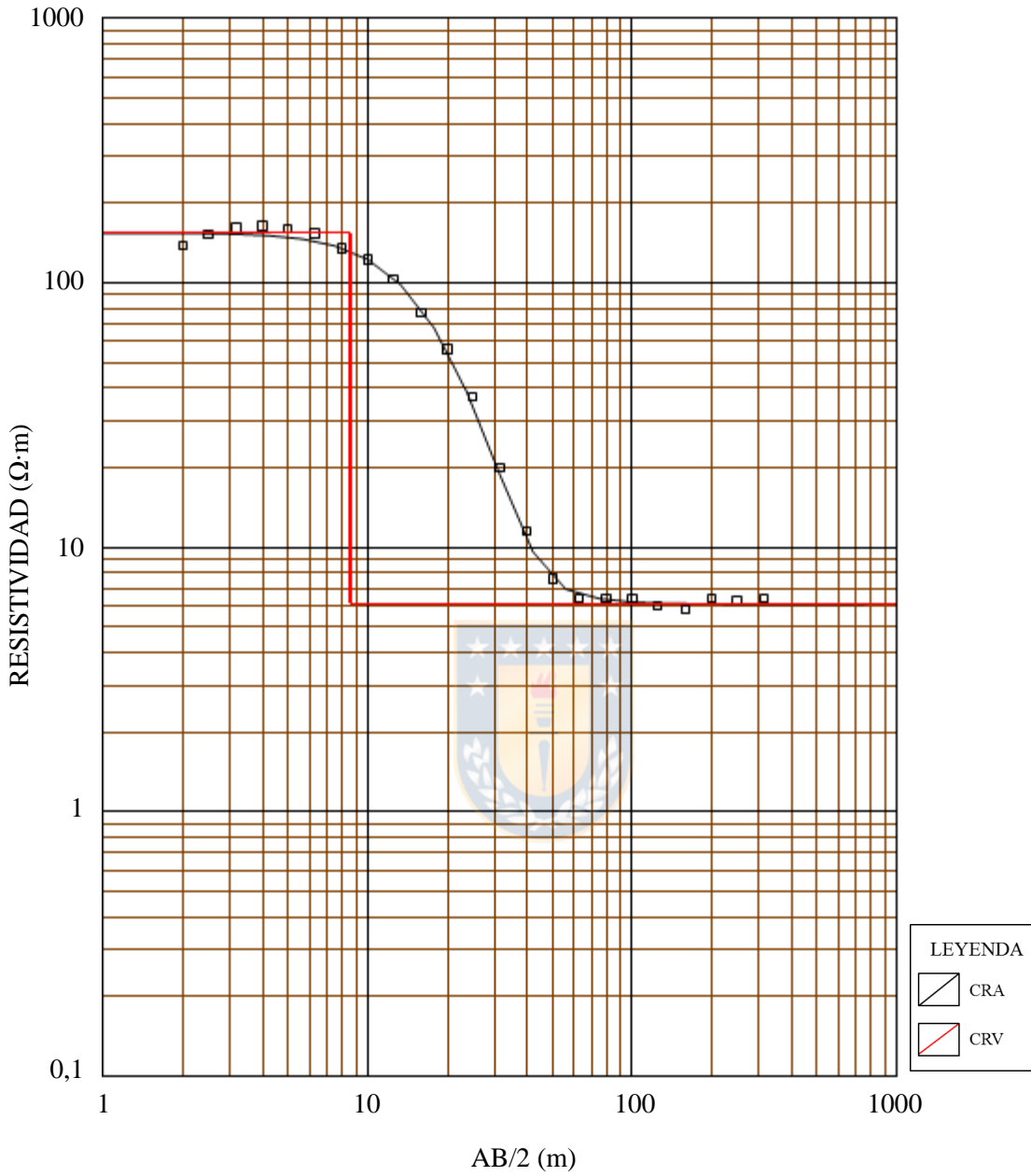
**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 5**



**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)
17	2	
2,4	35	2
19		37

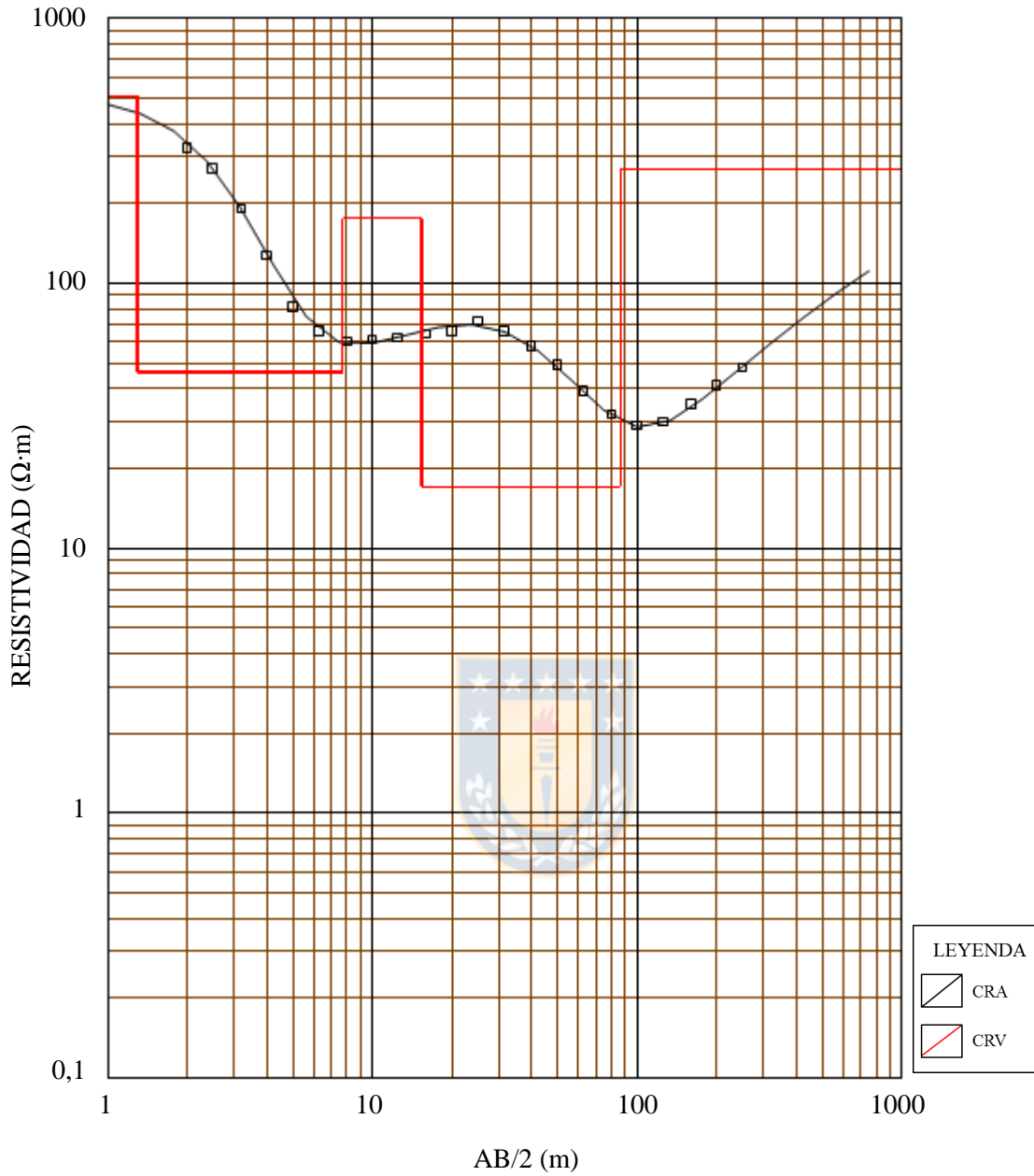
**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 6**



**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)
154	8,6	
6,1		8,6

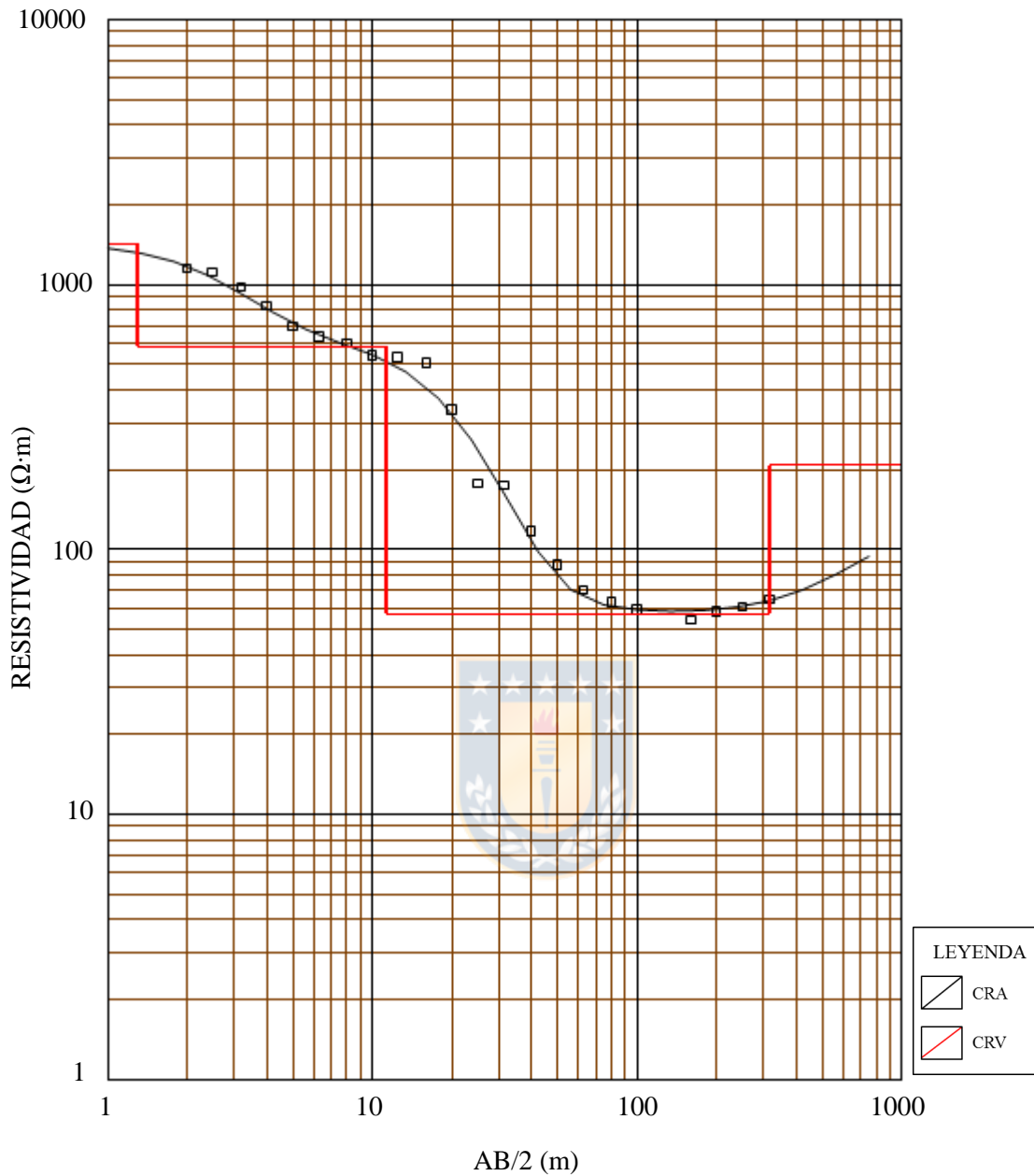
**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 7**



**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)
508	1,3	
46	6.4	1,3
175	7,7	7,7
17	71	15
268		86

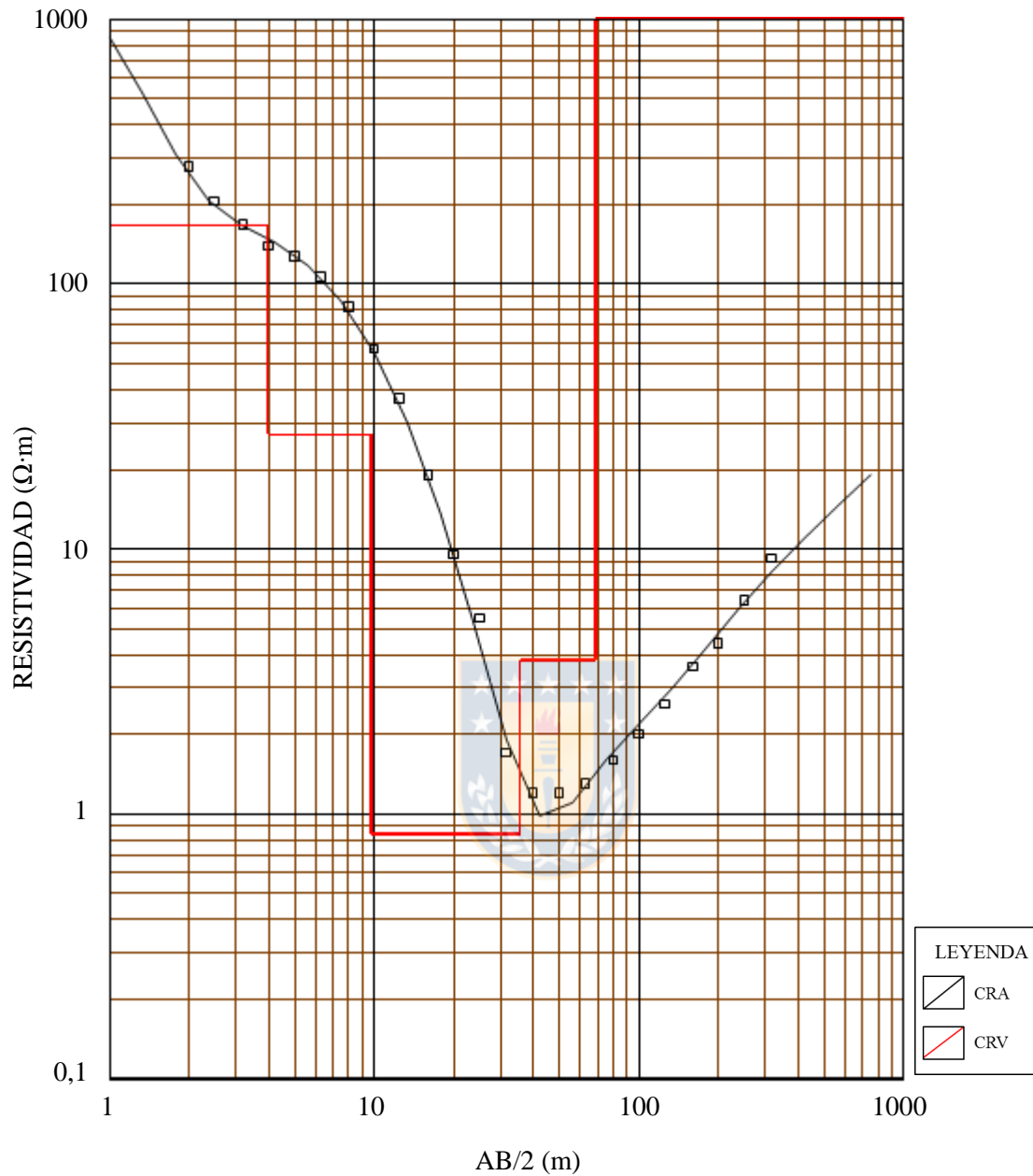
### SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 8



#### MODELO

Resistividad (Ω·m)	Esesor (m)	Profundidad (m)
1419	1,3	
580	10	1,3
57	305	11
208		316

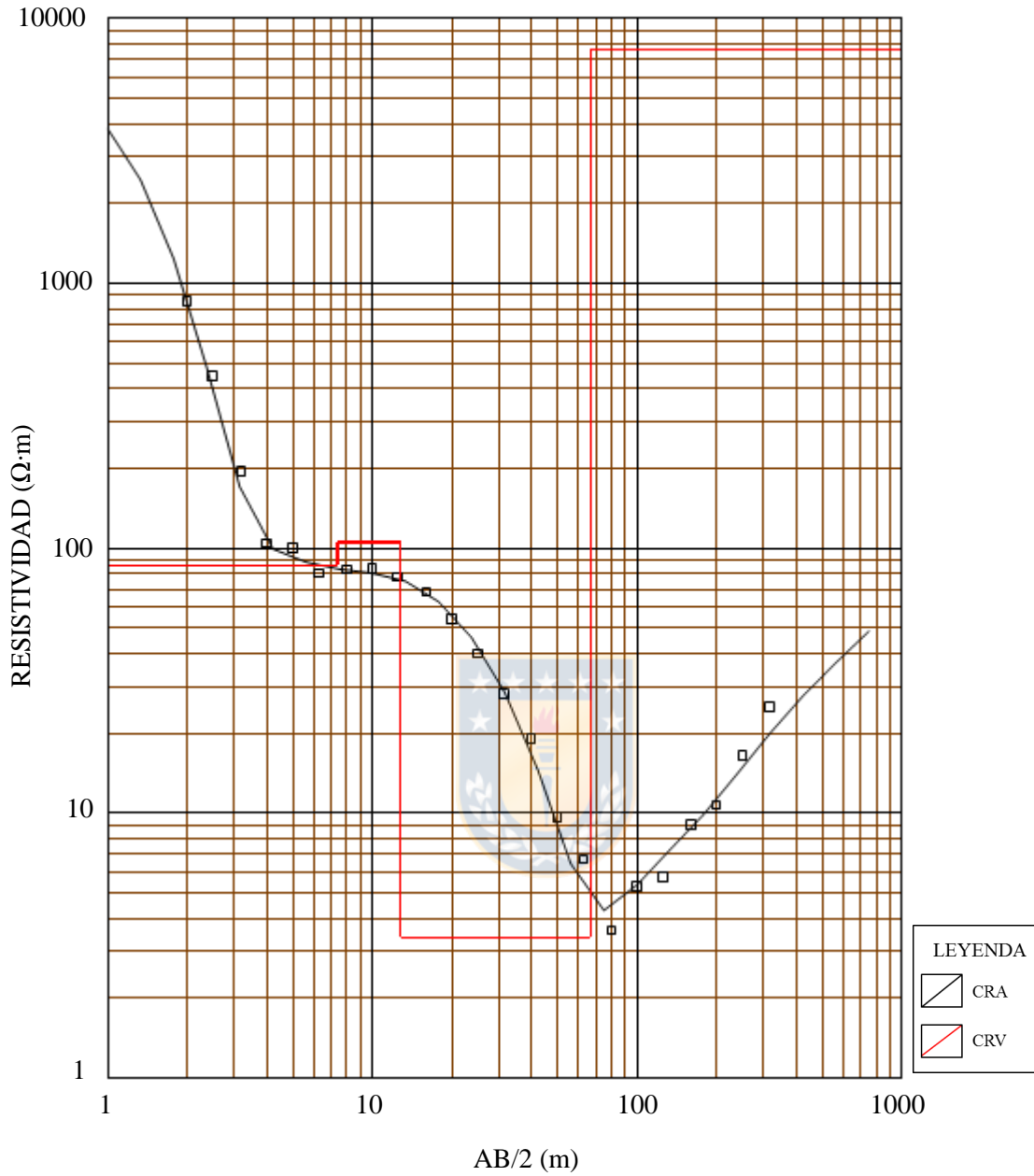
### SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 9



#### MODELO

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)
1896	0,46	
166	3,5	0,46
27	5,8	4
0,84	26	9,8
3,8	33	36
4500		69

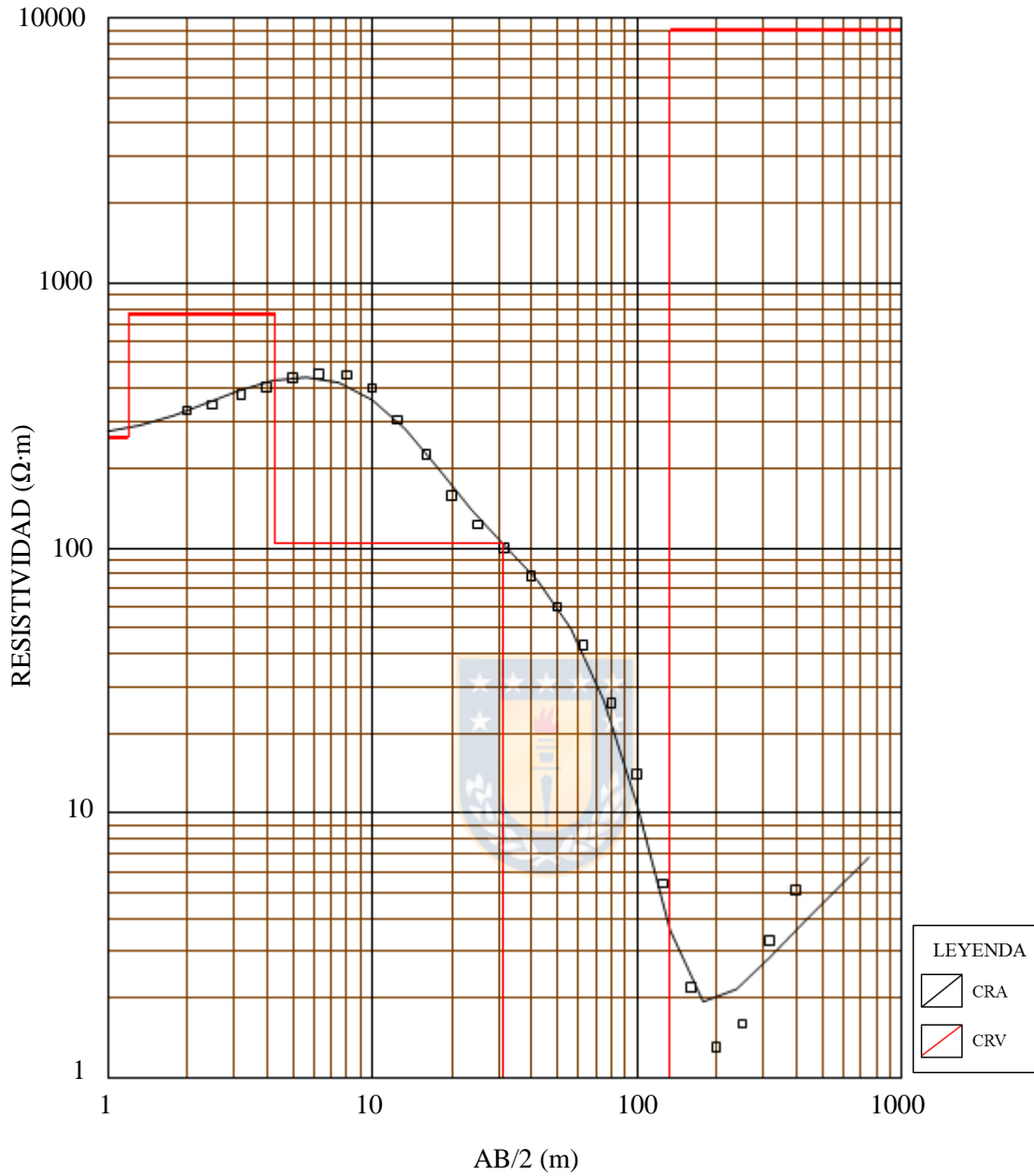
**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 10**



**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)
6558	0,61	
86	6.8	0,61
105	5,4	7,4
3,4	54	13
7596		67

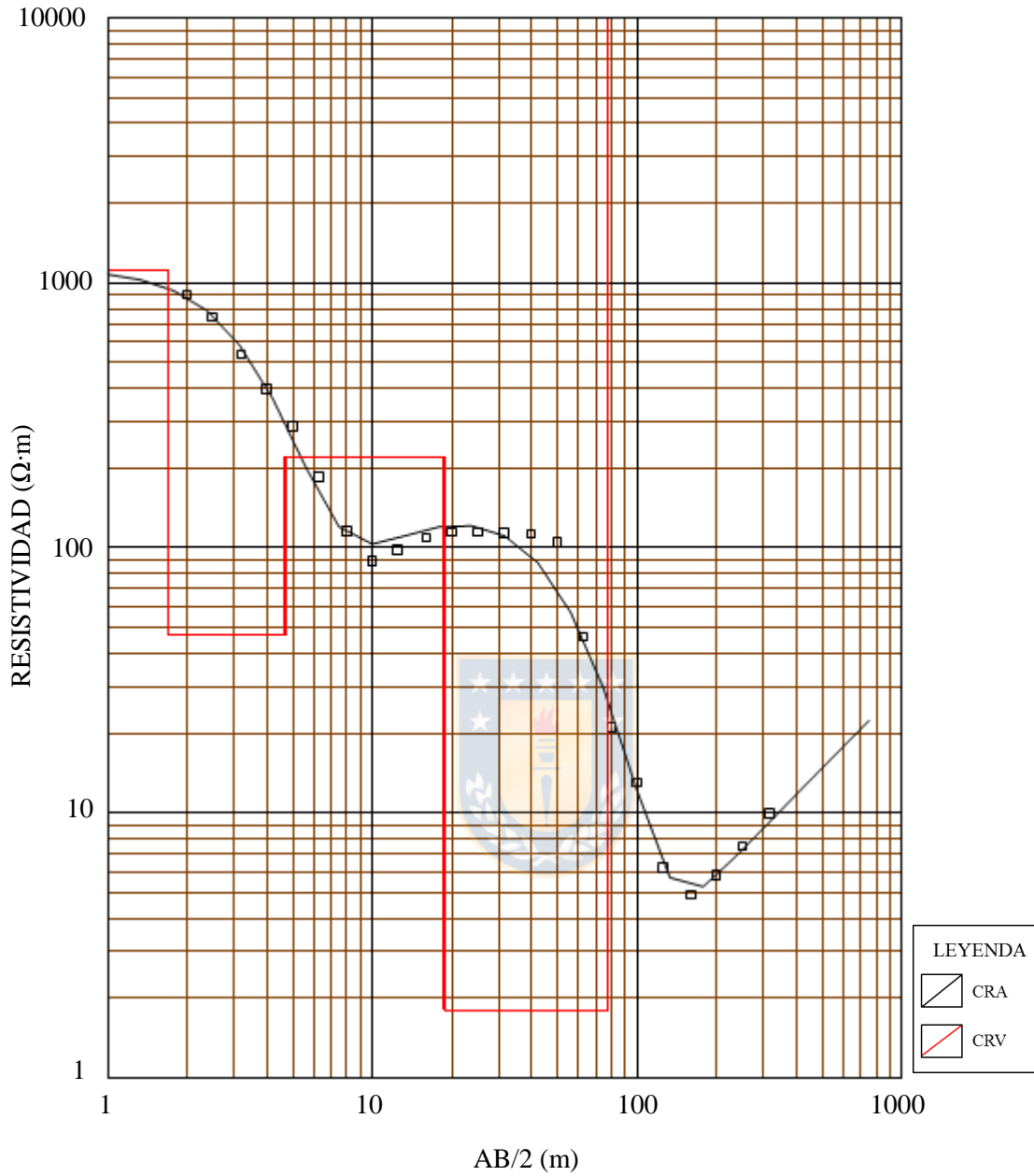
**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 11**



**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)
261	1,2	
761	3,1	1,2
104	27	4,3
0,96	102	31
9016		133

**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 12**

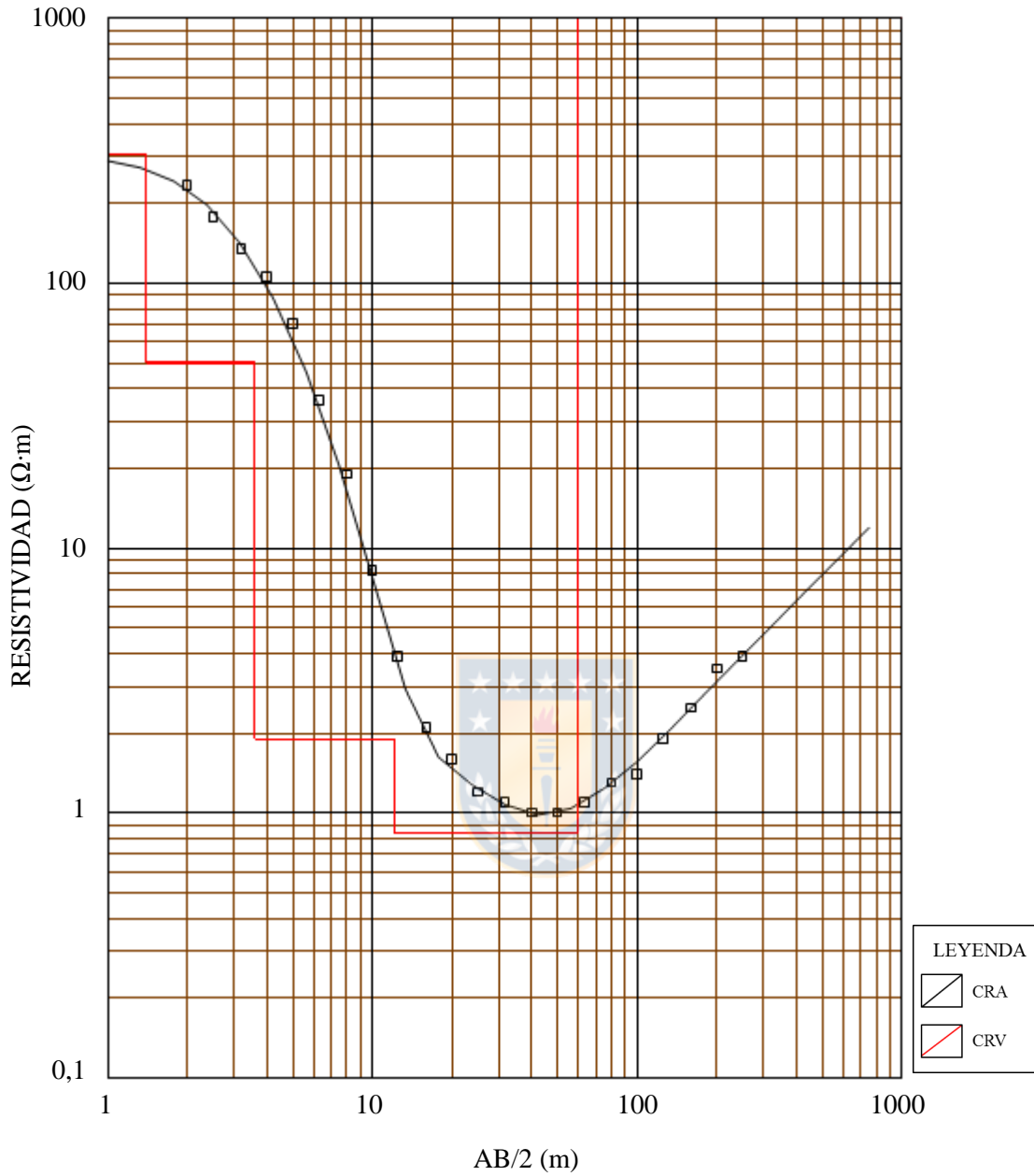


**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)
1117	1,7	
47	3	1,7
221	14	4,7
1,8	59	19
9960		78



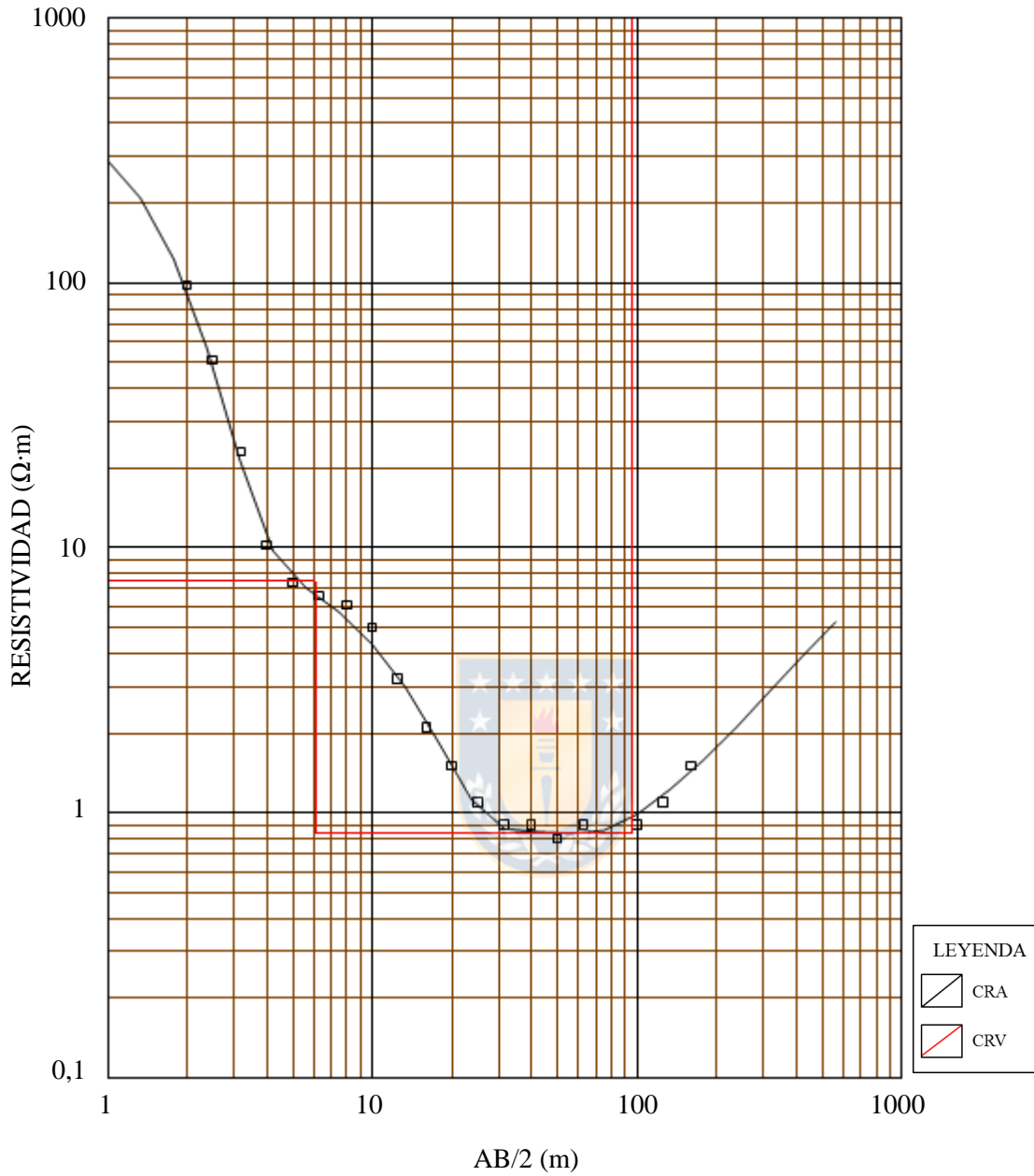
**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 13**



**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Esesor (m)	Profundidad (m)
305	1,4	
50	2,2	1,4
1,9	8,5	3,6
0,84	48	12
9661		60

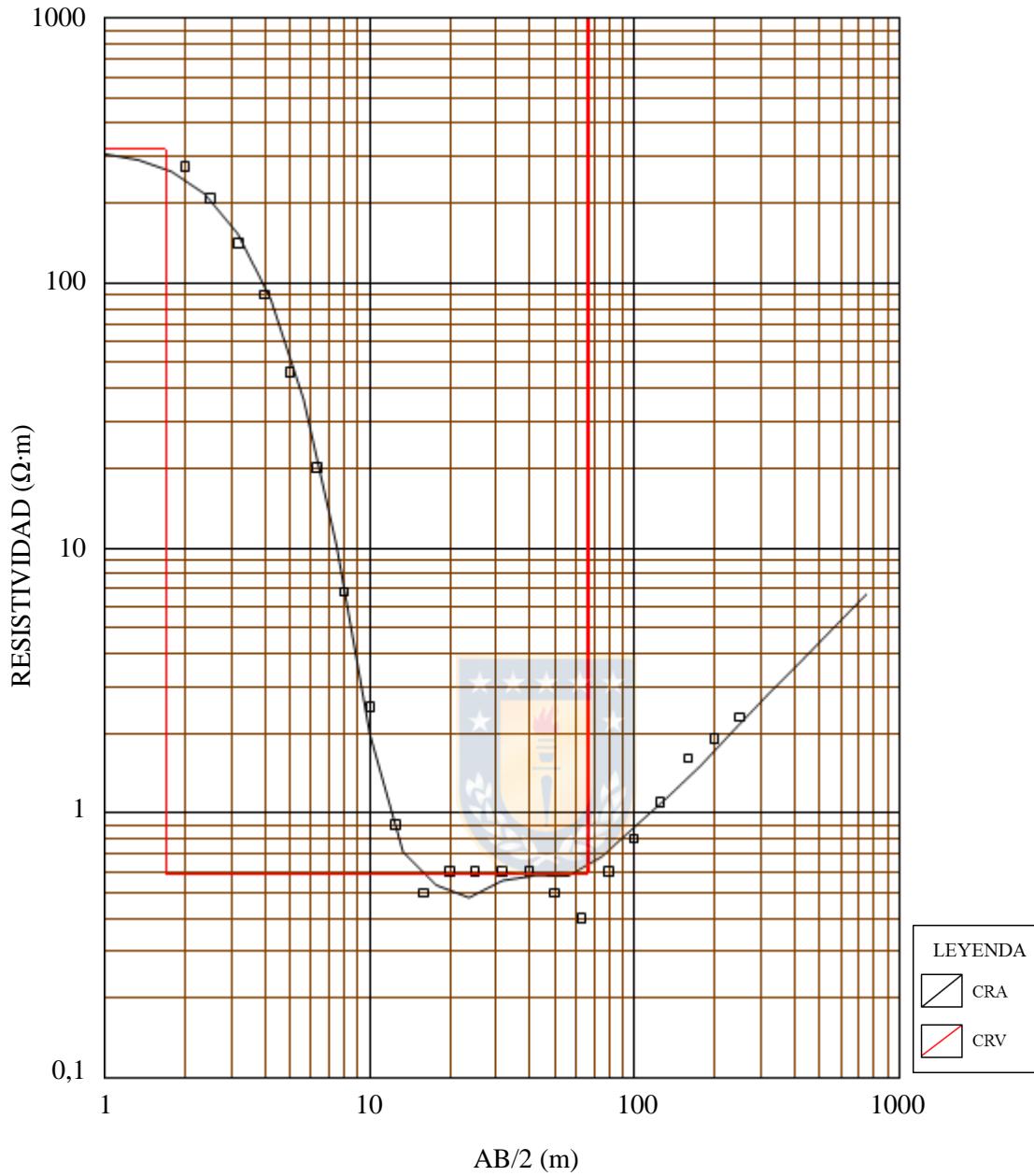
**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 14**



**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Esesor (m)	Profundidad (m)
418	0,72	
7,5	5,4	0,72
0,84	90	6,1
8936		96

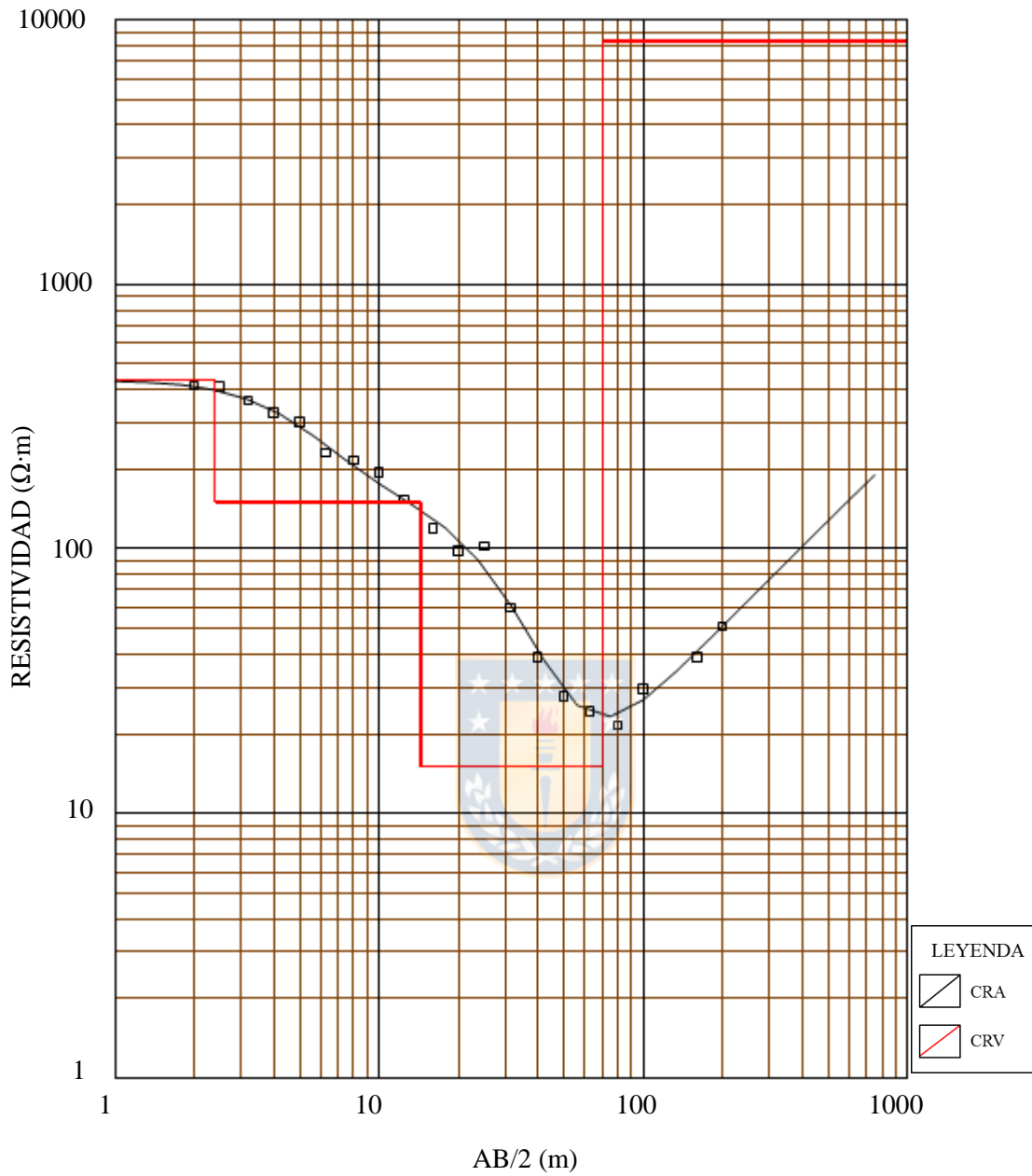
**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 15**



**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Esesor (m)	Profundidad (m)
319	1,7	
0,59	65	1,7
5548		67

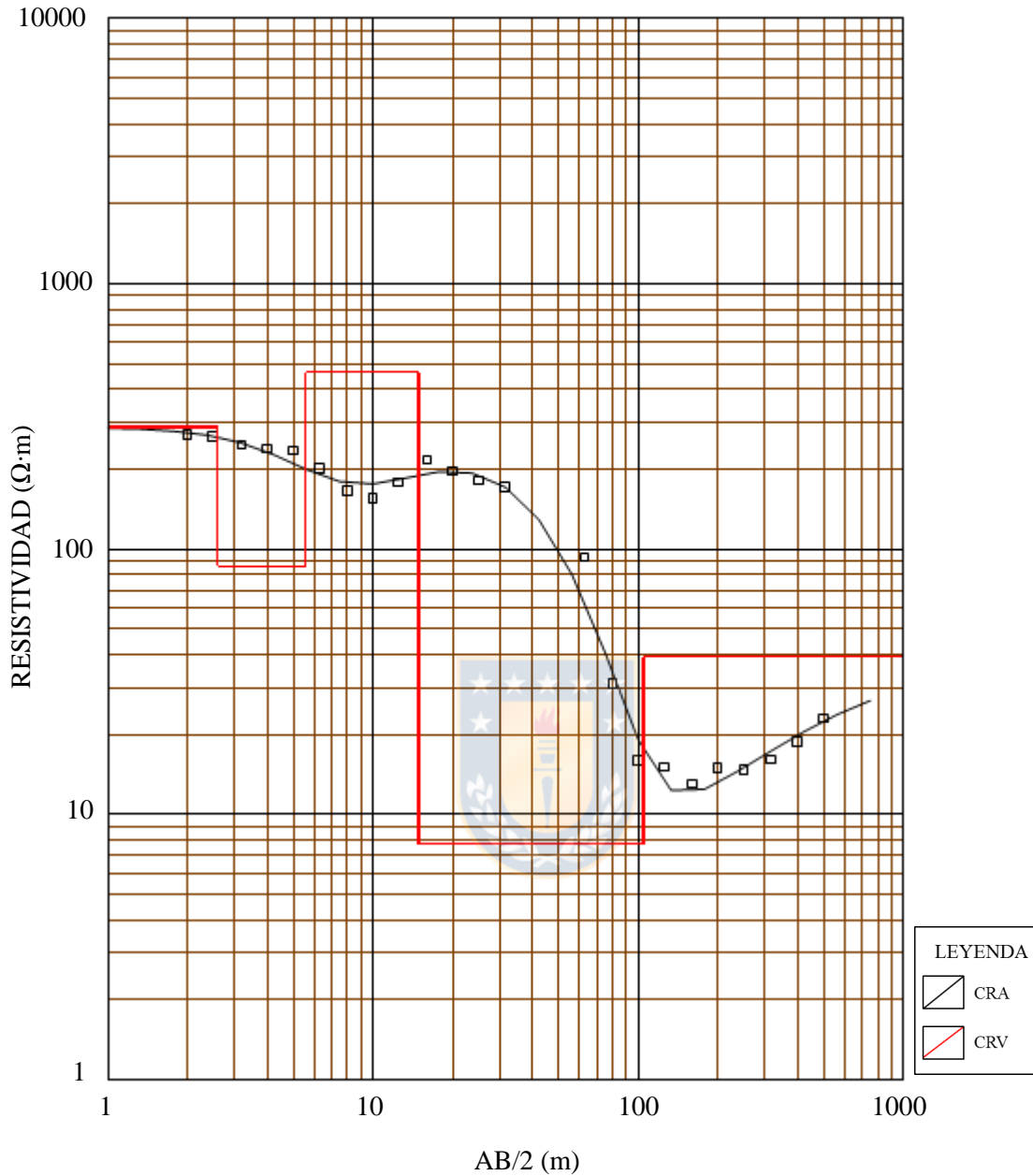
**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 16**



**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Esesor (m)	Profundidad (m)
435	2,4	
150	12	2,4
15	56	14
8285		70

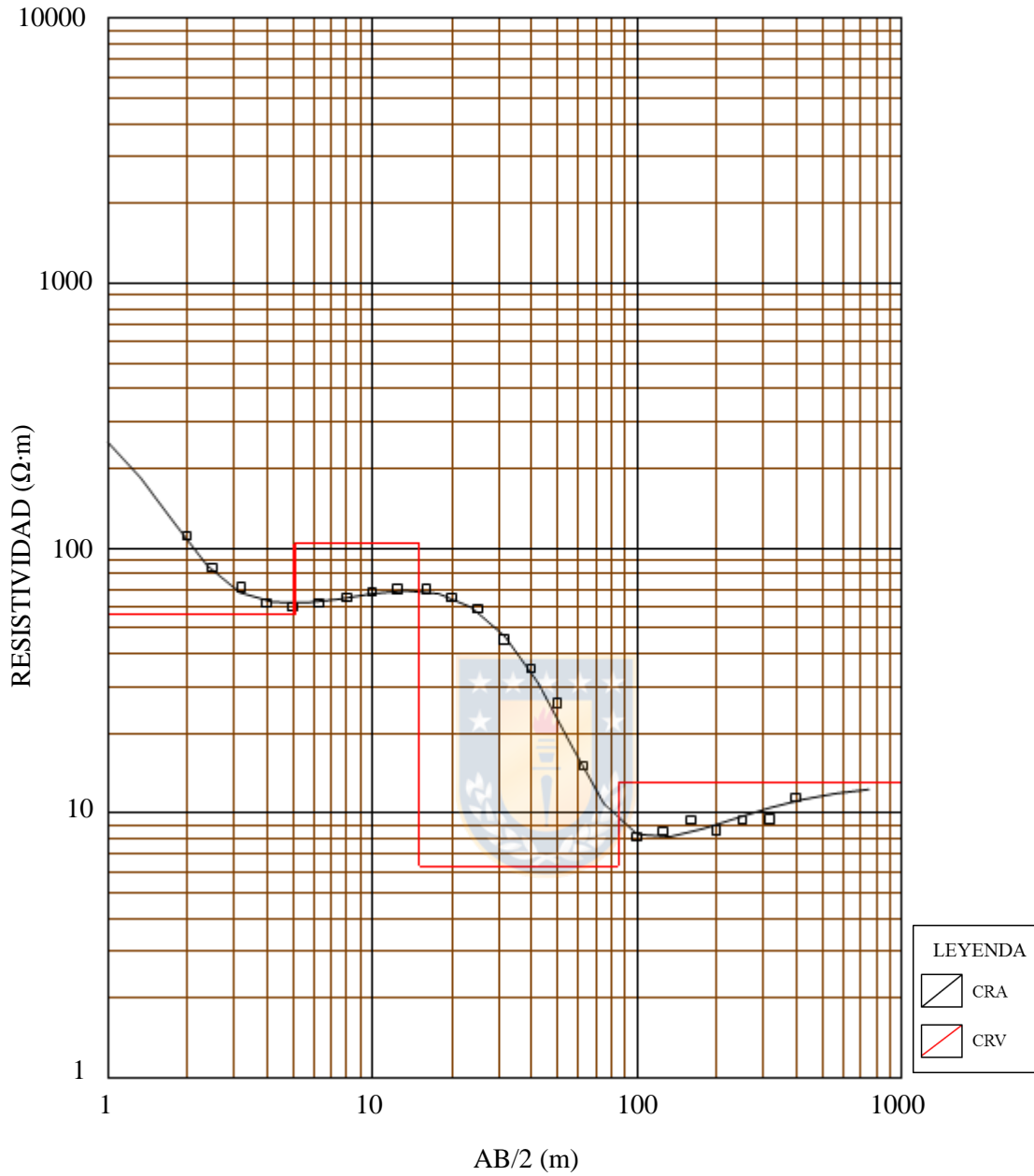
### SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 17



#### MODELO

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)
287	2,6	
86	3	2,6
463	9,3	5,6
7,7	90	15
39		105

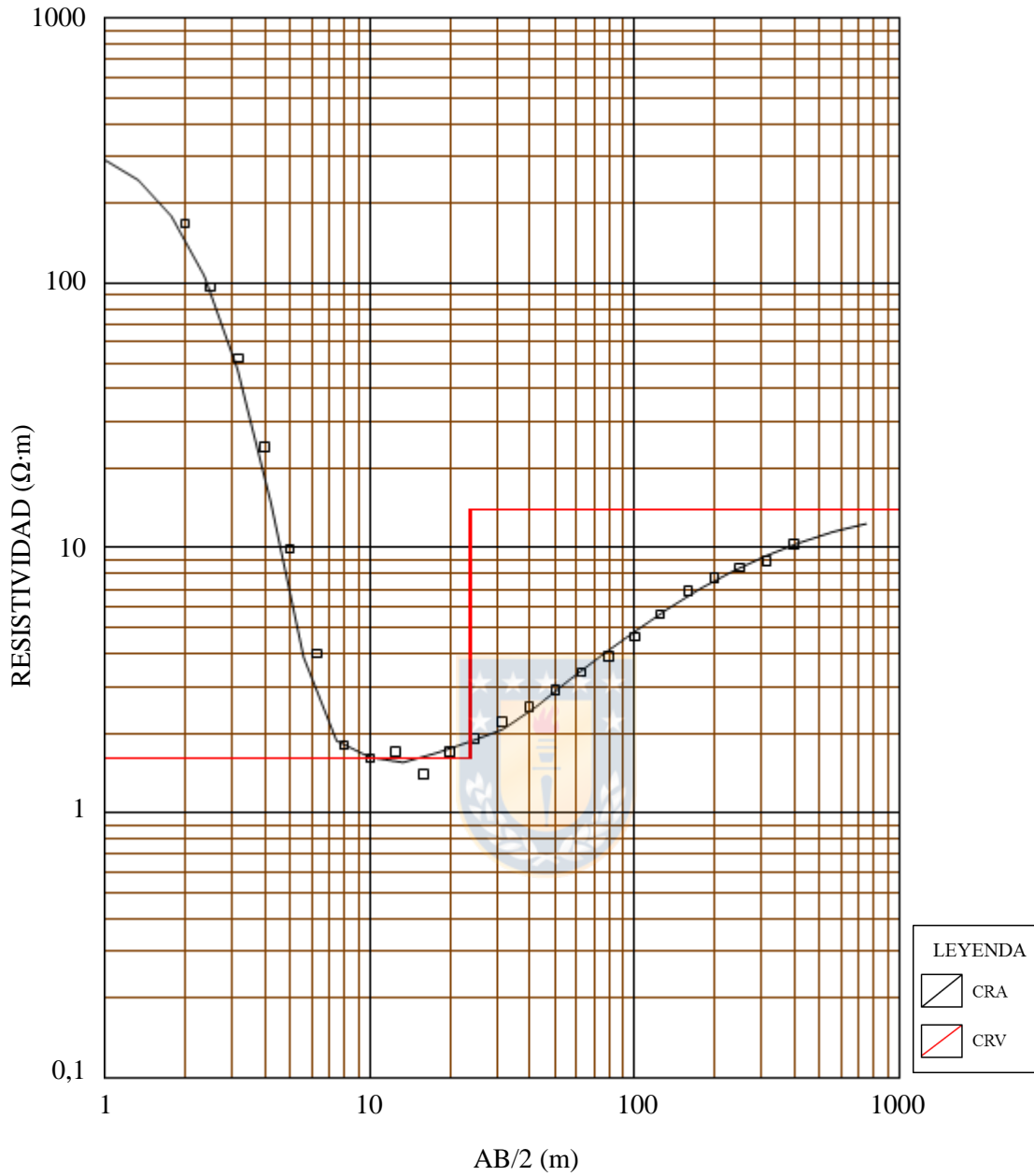
**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 18**



**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)
386	0,59	
56	4,5	0,59
104	10	5,1
6.3	70	15
13		85

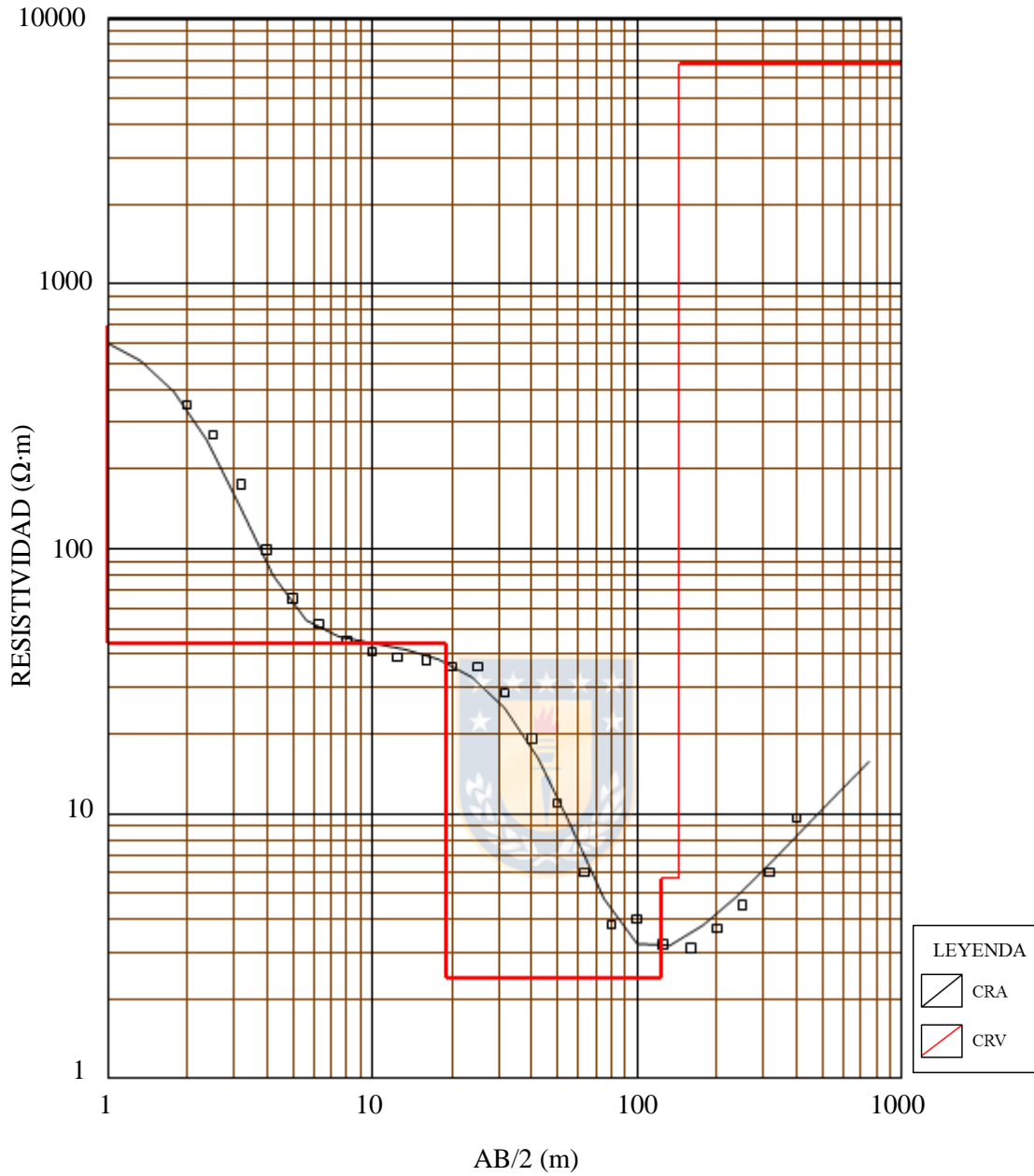
**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 19**



**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Esesor (m)	Profundidad (m)
345	1	
1,6	23	1
14		24

**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 20**

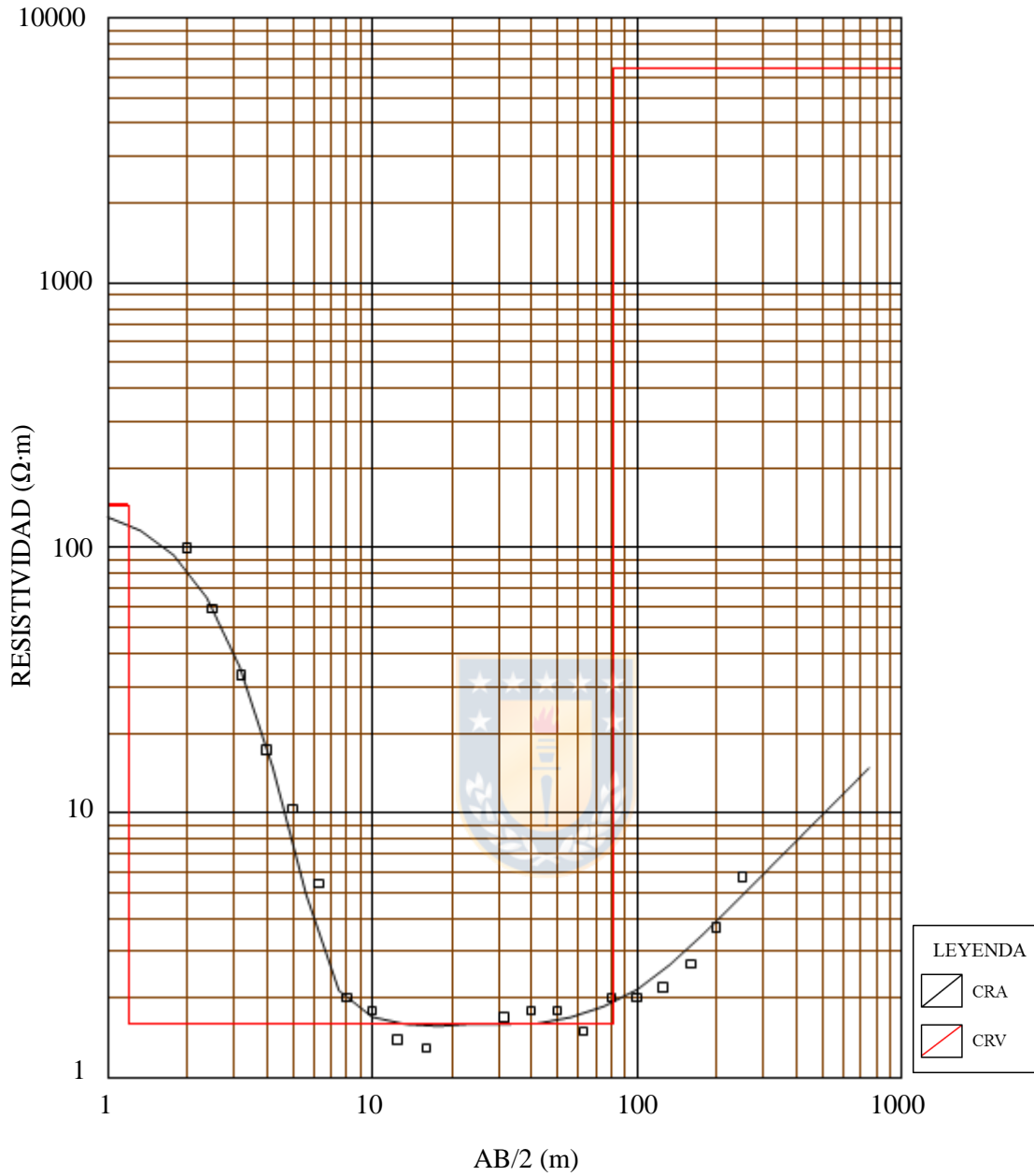


**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)
694	1	
44	18	1
2,4	104	19
5,7	21	123
6765		144



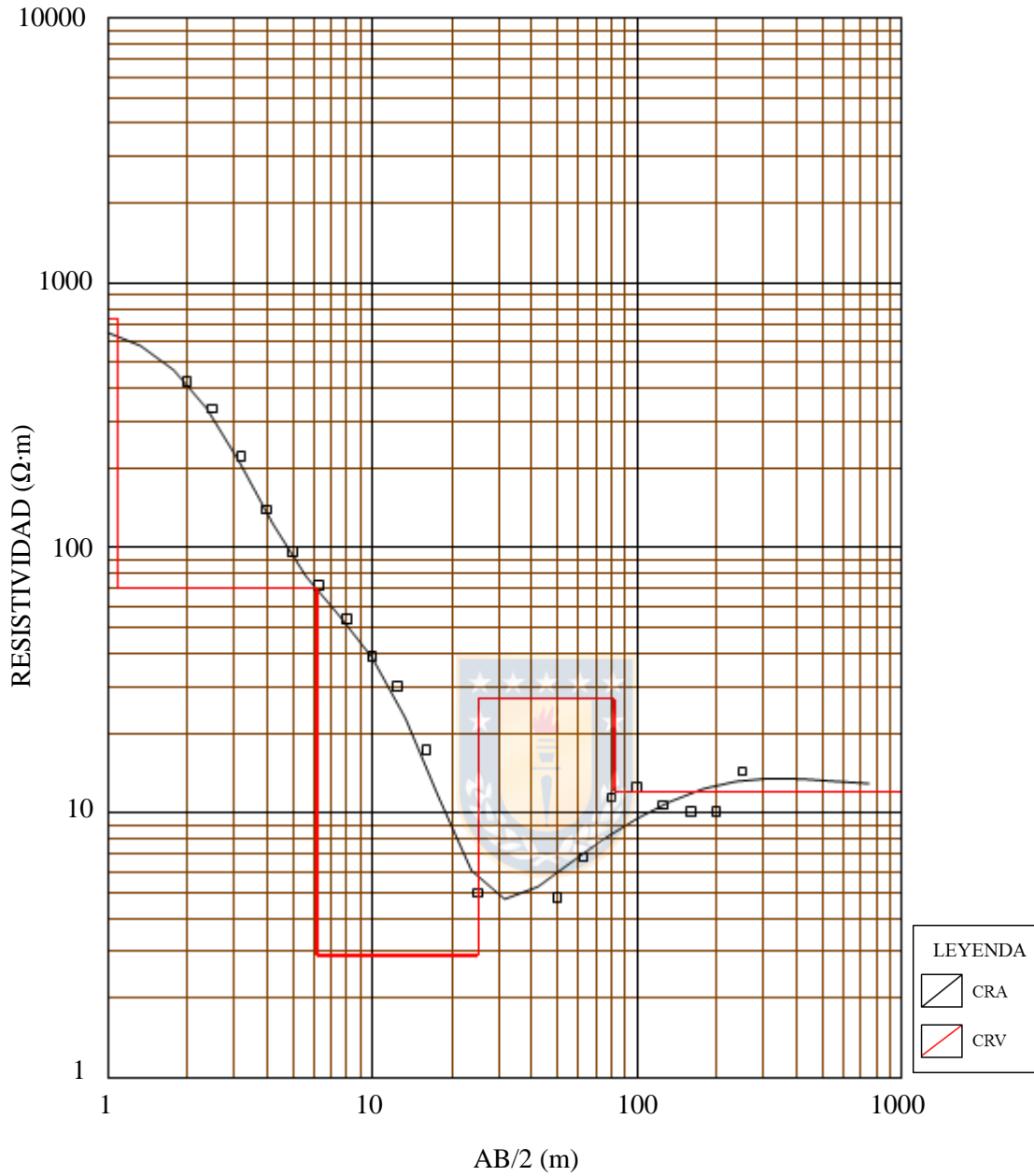
**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 21**



**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Espesor (m)	Profundidad (m)
145	1,2	
1,6	80	1,2
6450		81

**SONDAJE ELECTRICO VERTICAL 22**



**MODELO**

Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Esesor (m)	Profundidad (m)
728	1,1	
70	5,1	1,1
2,9	19	6,2
27	57	25
12		82



**ANEXO II**  
**BALANCE HIDROLÓGICO**













**Tabla 11:** Matriz de cálculo ETR Serie Terrazas Marinas.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGI	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	Reserva máx.		40,8
											FEB	MAR	TOTAL
Temperatura	12,2	10,5	9,6	8,727	9,218	10	11,8	13,67	14,53	16,75	16,158	14,93	
i	3,86	3,07	2,68	2,32	2,52	2,86	3,67	4,58	5,03	6,24	5,91	5,24	47,99
ETP sin corr	51,3	42,6	38,1	33,8	36,2	40,0	49,2	59,2	63,9	76,3	72,9	66,1	629,5
n°días mes	30	31	30	31	31	30	31	30	31	31	28,25	31	
n° horas luz	11	10,1	9,65	9,85	10,65	11,75	12,9	13,9	14,35	14,2	13,25	12,15	
ETP corr.	47,1	37,0	30,6	28,6	33,2	39,2	54,7	68,5	78,9	93,3	75,8	69,1	656,1
Precipitación	62,0	166,9	255,5	212,7	192,7	73,9	54,2	24,5	30,2	15,6	20,9	23,3	1132,3
ETR	47,1	37,0	30,6	28,6	33,2	39,2	54,7	64,8	30,2	15,6	20,9	23,3	425,1
Déficit	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,8	48,8	77,7	55,0	45,8	231,0
Reserva	15,0	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedentes	0,0	104,1	224,9	184,0	159,5	34,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	707,2

**Tabla 12:** Número de Curvas (NC) y retención máxima (s) en mm de Serie Arenales.

ARENALES - GRUPO HIDROLÓGICO A				
Uso	% Área	NC por uso	% Área * NC	% Área * NC/100
Cuerpos de agua	1,28	100	128,00	1,28
Áreas urbanas e industriales	7,50	72	540,00	5,40
Humedales	12,40	98	1215,20	12,15
Terrenos agrícolas	73,30	72	5277,60	52,78
Bosques	0,04	45	1,80	0,02
Praderas y matorrales	5,30	38	201,40	2,01
Áreas des. de vegetación	0,00	70	0,00	0,00
			NC	73,64
			s	90,92

**Tabla 13:** Número de Curvas (NC) y retención máxima (s) en mm de Serie Llahuen.

LLAHUEN - GRUPO HIDROLÓGICO B				
Uso	% Área	NC por uso	% Área * NC	% Área * NC/100
Cuerpos de agua	0,00	100	0,00	0,00
Áreas urbanas e industriales	3,07	84	257,88	2,58
Humedales	13,03	98	1276,45	12,76
Terrenos agrícolas	81,70	81	6617,70	66,18
Bosques	0,00	66	0,00	0,00
Praderas y matorrales	2,19	57	124,83	1,25
Áreas des. de vegetación	0,00	80	0,00	0,00
			NC	82,77
			s	52,88

**Tabla 13:** Número de Curvas (NC) y retención máxima (s) en mm de Serie Llahuecuy.

LLAHUECUY - GRUPO HIDROLÓGICO A				
Uso	% Área	NC por uso	% Área * NC	% Área * NC/100
Cuerpos de agua	0,00	100	0,00	0,00
Áreas urbanas e industriales	1,80	72	129,60	1,30
Humedales	0,00	98	0,00	0,00
Terrenos agrícolas	98,00	72	7056,00	70,56
Bosques	0,14	45	6,30	0,00
Praderas y matorrales	0,00	38	0,00	0,00
Áreas des. de vegetación	0,00	70	0,00	0,00
			NC	71,86
			s	99,48

**Tabla 14:** Número de Curvas (NC) y retención máxima (s) en mm de Serie Ninhue.

NINHUE - GRUPO HIDROLÓGICO C				
Uso	% Área	NC por uso	% Área * NC	% Área * NC/100
Cuerpos de agua	0,41	100	41,00	0,41
Áreas urbanas e industriales	8,29	87	721,23	7,21
Humedales	0,00	98	0,00	0,00
Terrenos agrícolas	77,59	88	6827,92	68,28
Bosques	1,46	71	103,66	1,04
Praderas y matorrales	12,20	70	854,00	8,54
Áreas des. de vegetación	0,00	87	0,00	0,00
			NC	85,48
			s	43,15

**Tabla 15:** Número de Curvas (NC) y retención máxima (s) en mm de Serie Dunas.

DUNAS - GRUPO HIDROLÓGICO A				
Uso	% Área	NC por uso	% Área * NC	% Área * NC/100
Cuerpos de agua	2,90	100	290,00	2,90
Áreas urbanas e industriales	13,40	72	964,80	9,65
Humedales	5,80	98	568,40	5,68
Terrenos agrícolas	43,30	72	3117,60	31,18
Bosques	0,00	45	0,00	0,00
Praderas y matorrales	15,90	38	604,20	6,04
Áreas des. de vegetación	18,50	70	1295,00	12,95
			NC	68,40
			s	117,35

**Tabla 16:** Número de Curvas (NC) y retención máxima (s) en mm de Serie Suelos Recientes.

SUELOS RECIENTES - GRUPO HIDROLÓGICO A				
Uso	% Área	NC por uso	% Área * NC	% Área * NC/100
Cuerpos de agua	0,00	100	0,00	0,00
Áreas urbanas e industriales	82,15	72	5914,80	59,15
Humedales	0,00	98	0,00	0,00
Terrenos agrícolas	13,60	72	979,20	9,79
Bosques	2,60	45	117,00	1,17
Praderas y matorrales	1,57	38	59,66	0,60
Áreas des. de vegetación	0,00	70	0,00	0,00
			NC	70,71
			s	105,23

**Tabla 17:** Número de Curvas (NC) y retención máxima (s) en mm de Serie Curanipe.

CURANIPE - GRUPO HIDROLÓGICO D				
Uso	% Área	NC por uso	% Área * NC	% Área * NC/100
Cuerpos de agua	0,00	100	0,00	0,00
Áreas urbanas e industriales	20,50	89	1824,50	18,25
Humedales	0,14	98	13,72	0,14
Terrenos agrícolas	1,80	91	163,80	1,64
Bosques	47,08	83	3907,64	39,08
Praderas y matorrales	30,30	77	2333,10	23,33
Áreas des. de vegetación	0,00	90	0,00	0,00
			NC	82,43
			s	54,15

**Tabla 18:** Número de Curvas (NC) y retención máxima (s) en mm de Serie Terrazas Aluviales.

TERRAZAS ALUVIALES - GRUPO HIDROLÓGICO B				
Uso	% Área	NC por uso	% Área * NC	% Área * NC/100
Cuerpos de agua	2,10	100	210,00	2,10
Áreas urbanas e industriales	24,50	84	2058,00	20,58
Humedales	8,60	98	842,80	8,43
Terrenos agrícolas	64,70	81	5240,70	52,41
Bosques	0,00	66	0,00	0,00
Praderas y matorrales	0,00	57	0,00	0,00
Áreas des. de vegetación	0,00	80	0,00	0,00
			NC	83,52
			s	50,14

**Tabla 19:** Número de Curvas (NC) y retención máxima (s) en mm de Serie Terrazas Marinas.

TERRAZAS MARINAS - GRUPO HIDROLÓGICO C				
Uso	% Área	NC por uso	% Área * NC	% Área * NC/100
Cuerpos de agua	0,00	100	0,00	0,00
Áreas urbanas e industriales	21,20	87	1844,40	18,44
Humedales	13,14	98	1287,72	12,88
Terrenos agrícolas	18,00	88	1584,00	15,84
Bosques	6,27	71	445,17	4,45
Praderas y matorrales	41,30	70	2891,00	28,91
Áreas des. de vegetación	0,00	87	0,00	0,00
			NC	80,52
			s	61,44

**Tabla 20:** Número de Curvas (NC) y retención máxima (s) en mm de Serie Pantano.

PANTANO - GRUPO HIDROLÓGICO B				
Uso	% Área	NC por uso	% Área * NC	% Área * NC/100
Cuerpos de agua	2,90	100	290,00	2,90
Áreas urbanas e industriales	52,40	84	4401,60	44,02
Humedales	26,79	98	2625,42	26,25
Terrenos agrícolas	15,38	81	1245,78	12,46
Bosques	0,02	66	1,32	0,01
Praderas y matorrales	1,20	57	68,40	0,68
Áreas des. de vegetación	1,20	80	96,00	0,96
			NC	87,29
			s	37,00

**Tabla 21:** Número de Curvas (NC) y retención máxima (s) en mm de Serie San Esteban.

SAN ESTEBAN - GRUPO HIDROLÓGICO B				
Uso	% Área	NC por uso	% Área * NC	% Área * NC/100
Cuerpos de agua	0,00	100	0,00	0,00
Áreas urbanas e industriales	73,13	84	6142,92	61,43
Humedales	0,00	98	0,00	0,00
Terrenos agrícolas	0,97	81	78,57	0,79
Bosques	5,37	66	354,42	3,54
Praderas y matorrales	20,50	57	1168,50	11,69
Áreas des. de vegetación	0,00	80	0,00	0,00
			NC	77,44
			s	73,98

**Tabla 22:** Recarga mensual (mm) estimados para la serie Arenales, a partir de la planilla EASYBAL 3.0

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio Mensual
Enero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Febrero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Marzo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,14	0,00	0,35
Abril	11,74	0,00	19,95	15,03	0,00	0,00	0,00	15,50	0,00	0,00	3,54	0,00	5,48
Mayo	24,58	29,57	40,99	14,49	37,50	24,61	5,12	2,43	23,04	24,45	36,44	25,07	24,02
Junio	46,76	46,66	40,10	53,54	49,06	49,41	43,82	43,79	43,54	48,85	47,07	47,57	46,68
Julio	45,48	45,84	44,82	51,25	44,11	51,01	50,83	52,16	26,96	49,51	47,68	49,95	46,63
Agosto	43,28	42,13	38,92	54,77	46,87	38,57	43,55	43,52	46,28	46,63	40,00	45,16	44,14
Septiembre	37,00	18,18	1,78	34,20	14,58	10,92	0,00	35,03	0,00	26,31	32,83	21,12	19,33
Octubre	21,60	0,00	22,01	0,00	0,00	17,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,07
Noviembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diciembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Anual	230,43	182,37	208,57	223,29	192,13	191,71	143,32	192,44	139,82	195,75	211,70	188,88	191,70

**Tabla 23:** Recarga mensual (mm) estimados para la serie Llahuecuy, a partir de la planilla EASYBAL 3.0

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio Mensual
Enero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Febrero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Marzo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Abril	17,68	0,00	25,89	20,97	0,00	0,00	0,00	15,86	0,00	0,00	5,05	0,00	7,12
Mayo	9,94	8,87	34,93	26,49	16,80	3,91	0,00	2,43	2,34	3,75	30,38	4,37	12,02
Junio	40,70	40,60	34,04	47,48	43,00	43,35	28,24	37,73	37,48	42,79	41,01	41,51	39,83
Julio	39,42	39,78	38,76	45,19	38,05	44,95	44,77	46,10	12,32	43,45	41,62	43,89	39,86
Agosto	37,22	36,07	32,86	48,71	40,81	32,51	37,49	37,46	40,22	40,57	33,94	39,10	38,08
Septiembre	23,76	3,54	13,78	19,56	26,58	22,92	0,00	22,29	0,00	11,67	26,77	6,48	14,78
Octubre	15,54	0,00	15,95	0,00	0,00	2,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,84
Noviembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diciembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Anual	184,25	128,85	196,21	208,41	165,25	150,19	110,50	161,88	92,36	142,23	178,76	135,36	154,52

**Tabla 24:** Recarga mensual (mm) estimados para la serie Llahuen, a partir de la planilla EASYBAL 3.0

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio Mensual
Enero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Febrero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Marzo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Abril	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mayo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Junio	0,00	0,00	0,00	0,85	2,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27
Julio	12,30	11,94	9,71	25,22	18,08	14,90	15,68	3,77	12,31	12,69	13,87	12,48	13,58
Agosto	17,25	16,10	12,89	28,74	20,84	12,54	17,52	17,49	20,25	20,60	13,97	19,13	18,11
Septiembre	10,97	11,95	10,75	12,87	9,35	14,79	0,00	9,00	0,00	10,78	6,80	12,07	9,11
Octubre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Noviembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diciembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Anual	40,52	39,99	33,35	67,68	50,72	42,24	33,20	30,26	32,57	44,07	34,65	43,68	41,08

**Tabla 25:** Recarga mensual (mm) estimados para la serie Ninhue, a partir de la planilla EASYBAL 3.0

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio Mensual
Enero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Febrero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Marzo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Abril	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mayo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Junio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Julio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agosto	0,00	0,00	0,00	15,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30
Septiembre	0,00	0,00	0,00	3,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26
Octubre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Noviembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diciembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Anual	0,00	0,00	0,00	18,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,56

**Tabla 26:** Recarga mensual (mm) estimados para la serie Dunas, a partir de la planilla EASYBAL 3.0

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio Mensual
Enero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Febrero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Marzo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,30	0,00	0,53
Abril	43,10	0,00	51,31	46,39	0,00	0,00	0,00	22,82	0,00	0,00	5,70	0,00	14,11
Mayo	26,74	60,93	68,85	16,65	68,86	55,97	7,28	2,43	54,40	55,81	65,64	56,43	45,00
Junio	75,96	75,86	69,30	71,60	70,92	78,61	73,02	72,99	72,74	78,05	76,27	76,77	74,34
Julio	74,68	75,04	74,02	80,45	73,31	80,21	80,03	81,36	29,12	63,67	76,88	79,15	72,33
Agosto	72,48	71,33	68,12	83,97	76,07	67,77	72,75	72,72	75,48	75,83	69,20	74,36	73,34
Septiembre	40,56	20,34	3,94	36,36	16,74	13,08	0,00	39,09	0,00	28,47	62,03	23,28	23,66
Octubre	50,80	0,00	40,87	0,00	0,00	19,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,25
Noviembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diciembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Anual	384,31	303,49	376,41	335,43	305,91	314,99	233,08	291,42	231,74	301,83	362,02	310,00	312,55

**Tabla 27:** Recarga mensual (mm) estimados para la serie Suelos Recientes, a partir de la planilla EASYBAL 3.0

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio Mensual
Enero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Febrero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Marzo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,54	0,00	0,21
Abril	36,47	0,00	44,68	39,76	0,00	0,00	0,00	28,90	0,00	0,00	8,74	0,00	13,21
Mayo	29,78	54,30	60,52	19,69	62,23	49,34	3,52	2,43	47,77	49,18	55,97	49,80	40,38
Junio	66,29	66,19	59,63	73,07	68,59	68,94	63,35	63,32	63,07	68,38	66,60	67,10	66,21
Julio	65,01	65,37	64,35	70,78	63,64	70,54	70,36	71,69	32,16	66,71	67,21	69,48	64,77
Agosto	62,81	61,66	58,45	74,30	66,40	58,10	63,08	63,05	65,81	66,16	59,53	64,69	63,67
Septiembre	43,60	23,38	6,98	39,40	19,78	16,12	0,00	42,13	0,00	31,51	52,36	26,32	25,13
Octubre	41,13	0,00	41,54	0,00	0,00	22,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,75
Noviembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diciembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,87	0,00	0,00	0,00	0,24
Anual	345,08	270,89	336,15	317,01	280,65	285,43	200,31	271,53	211,68	281,94	312,95	277,40	282,59

**Tabla 28:** Recarga mensual (mm) estimados para la serie Curanipe, a partir de la planilla EASYBAL 3.0

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio Mensual
Enero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Febrero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Marzo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Abril	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mayo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Junio	6,42	5,70	5,76	15,69	16,04	3,50	3,18	0,00	0,00	2,78	7,07	2,12	5,69
Julio	20,72	21,08	20,06	26,49	19,35	26,25	26,07	18,61	27,15	24,75	22,92	25,19	23,22
Agosto	18,52	17,37	14,16	30,01	22,11	13,81	18,79	18,76	21,52	21,87	15,24	20,40	19,38
Septiembre	12,24	13,22	12,02	14,14	10,62	16,06	0,00	10,27	0,00	12,05	8,07	13,34	10,17
Octubre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Noviembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diciembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Anual	57,90	57,37	52,00	86,33	68,13	59,62	48,04	47,64	48,68	61,45	53,30	61,06	58,46



**Tabla 29:** Recarga mensual (mm) estimados para la serie Terrazas Aluviales, a partir de la planilla EASYBAL 3.0

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio Mensual
Enero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Febrero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Marzo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Abril	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mayo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Junio	5,00	4,28	0,33	12,00	11,85	2,08	3,80	0,00	0,00	1,36	1,64	0,70	3,59
Julio	16,71	17,07	16,05	22,48	15,34	22,24	22,06	14,45	21,72	20,74	18,91	21,18	19,08
Agosto	14,51	13,36	10,15	26,00	18,10	9,80	14,78	14,75	17,51	17,86	11,23	16,39	15,37
Septiembre	8,23	9,21	8,01	10,13	6,61	12,05	0,00	6,26	0,00	8,04	4,06	9,33	6,83
Octubre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Noviembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diciembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Anual	44,45	43,92	34,54	70,61	51,91	46,17	40,64	35,46	39,24	48,00	35,84	47,61	44,86

**Tabla 30:** Recarga mensual (mm) estimados para la serie Terrazas Marinas, a partir de la planilla EASYBAL 3.0

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio Mensual
Enero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Febrero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Marzo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Abril	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mayo	2,18	0,00	9,20	5,68	3,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,54	0,00	1,99
Junio	0,49	24,48	22,63	7,27	2,79	22,28	14,67	9,99	14,84	21,56	0,80	20,90	13,56
Julio	28,01	28,37	27,35	4,98	26,64	4,74	4,56	5,89	9,59	3,24	1,41	3,68	12,37
Agosto	25,81	24,66	21,45	8,50	0,60	21,10	26,08	26,05	0,01	0,36	22,53	27,69	17,07
Septiembre	19,53	20,51	13,78	21,43	17,91	22,92	0,00	17,56	0,00	19,34	15,36	20,63	15,75
Octubre	4,13	0,00	4,54	0,00	0,00	4,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07
Noviembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diciembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Anual	80,14	98,02	98,95	47,87	51,18	75,16	45,31	59,49	24,44	44,50	43,64	72,91	61,80

**Tabla 31:** Recarga mensual (mm) estimados para la serie Pantano, a partir de la planilla EASYBAL 3.0

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio Mensual
Enero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Febrero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Marzo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Abril	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mayo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Junio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Julio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agosto	0,00	0,00	0,00	12,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,06
Septiembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Octubre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Noviembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diciembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Anual	0,00	0,00	0,00	12,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,06

**Tabla 32:** Recarga mensual (mm) estimados para la serie San Esteban, a partir de la planilla EASYBAL 3.0

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Promedio Mensual
Enero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Febrero	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Marzo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Abril	6,39	0,00	2,18	9,68	0,00	0,00	0,00	10,15	0,00	0,00	7,14	0,00	2,96
Mayo	24,16	11,80	23,64	14,07	19,73	6,84	4,70	2,43	5,27	6,68	19,09	7,30	12,14
Junio	29,41	29,31	22,75	36,19	31,71	32,06	26,47	26,44	26,19	31,50	29,72	30,22	29,33
Julio	28,13	28,49	27,47	33,90	26,76	33,66	33,48	34,81	26,54	32,16	30,33	32,60	30,69
Agosto	25,93	24,78	21,57	37,42	29,52	21,22	26,20	26,17	28,93	29,28	22,65	27,81	26,79
Septiembre	19,65	17,76	1,36	21,55	14,16	10,50	0,00	17,68	0,00	19,46	15,48	20,70	13,19
Octubre	4,25	0,00	4,66	0,00	0,00	4,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,10
Noviembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diciembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Anual	137,91	112,13	103,63	152,82	121,89	108,52	90,85	117,69	86,93	119,08	124,40	118,64	116,21