



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



MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARA PROYECTO DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA EN CONCEPCIÓN, CHILE

Memoria para optar al Título de Geólogo

Álvaro Fabián Mella Torres

Profesor Patrocinante:	Dr. Jorge Quezada Flory
Profesional Guía	Sr. Carlos Salinas Neira
Profesores Comisión	Sr. Ramiro Ulises Bonilla Parra
	Msc. Abraham Elías González Martínez

Concepción, 2021



Conocer lo que no vemos para cuidar lo que amamos.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
1	INTRODUCCIÓN..... 1
1.1	Generalidades 2
1.1.1	Energía geotérmica 4
1.2	Área de estudio 4
1.2.1	Clima..... 5
1.3	Objetivos..... 5
1.3.1	Objetivo general..... 5
1.3.2	Objetivos específicos 6
1.4	Metodología..... 6
2	MARCO TEÓRICO 9
2.1	Recursos y yacimientos geotérmicos..... 9
2.1.1	Tipo y usos de yacimientos geotérmicos 9
2.2	Propiedades geotérmicas del subsuelo..... 11
2.3	Bombas de calor 14
2.3.1	Coeficiente de eficiencia..... 15
2.3.2	Tipos de bomba de calor 17
3	GEOLOGÍA..... 22
3.1	Geomorfología..... 22
3.1.1	Cordillera de la costa 24
3.1.2	Planicie litoral 24
3.1.3	Cerros Isla 25
3.2	Unidades Geológicas 27
3.2.1	Rocas metamórficas..... 27
3.2.2	Rocas intrusivas 30
3.2.3	Rocas estratificadas..... 32

3.2.4	Depósitos no consolidados.....	34
3.3	Geología estructural.....	39
3.3.1	La fosa de Concepción.....	39
3.4	Geofísica y sondajes	42
3.4.1	Sondajes de rotación	43
3.4.2	Calicatas.....	49
3.4.3	Velocidad de ondas superficiales.....	53
3.4.4	Resultados	57
4	HIDROLOGÍA	59
4.1.1	Hidrología superficial	61
4.1.2	Balance hídrico	66
5	HIDROGEOLOGÍA	88
5.1	Generalidades	88
5.2	Unidades Hidrogeológicas.....	88
5.2.1	Granito Basal	89
5.2.2	Arenas arcillosas (maicillo).....	90
5.2.3	Arenas Limosas.....	90
5.2.4	Arenas fluviales	91
5.3	Piezometría y direcciones de flujo.....	92
5.4	Análisis de Vulnerabilidad	94
5.4.1	Método GOD	95
6	CONCLUSIONES.....	98
7	REFERENCIAS	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página	
2.1	Tipos y uso de la energía geotérmica	12
3.1	Profundidad y referencia de ubicación para sondajes	55

3.2	Modelo estratigráfico de sondaje S-1, de 45 metros de profundidad	55
3.3.	Modelo estratigráfico de sondaje S-2, de 10 metros de profundidad	57
3.4	Modelo estratigráfico de sondaje S-3, de 35 metros de profundidad	57
3.5.	Índice de calidad de roca	60
3.6.	Resultados de ensayos RQD	60
3.7	Nivel freático identificado en sondajes.	61
3.8	Profundidad y referencia de calicatas	62
3.9	. Modelo estratigráfico calicatas de 3 m (C-1 y C-2).	63
3.10	Modelo estratigráfico calicatas de 5 m (C-3 y C-4).	64
3.11	Nivel freático en calicatas.	65
4.1	Caracterización de la cuenca hidrológica en estudio	76
4.2	Número de curva en función del grupo hidrológico del suelo y uso de suelo	93
4.3	Características granulométricas para cada grupo de suelo encontrado en la cuenca analizada	97
4.4	Asignación de número de curva según grupo hidrológico de suelo y uso de suelo	99
4.5	Número máximo de horas de sol, para los 36° de latitud sur	103
4.6	Parámetros hidráulicos de las series de suelo estimados a partir de la granulometría, según la metodología propuesta por Saxton <i>et. al</i> (1986)	105
4.7	Profundidad de zona radicular ponderada para cada serie suelo, a partir de superficies de uso de suelo	106
4.8	Estimación de la recarga máxima de cada píxel del área de estudio, considerando tipo y cobertura de suelo	107
5.1	Permeabilidad relativa de los tipos de suelo.	111
5.2	Cálculo de índice GOD.	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.1	Participación de distintas fuentes en la matriz energética nacional	4
2.1	Variación de temperatura a profundidad en un pozo de monitoreo ubicado en el hemisferio norte (Nicosia, Chipre)	17
2.2	Esquema del ciclo de una bomba de calor	19
2.3	Esquemas de sistemas de calefacción abiertos	25
2.4	. Esquema de sistema verticales cerrados	26
2.5	Esquemas de intercambiadores horizontales cerrados	27
3.1	Geomorfología de la provincia de Concepción	29
3.2	Mapa geológico del sector céntrico de la ciudad de Concepción con ubicación de perfiles gravimétricos	35
3.3	. Modelo estratigráfico, de densidad y velocidad de ondas de corte para sondaje 'Pozo 1'	48
3.4	Perfiles gravimétricos del centro de la ciudad de Concepción	52
3.5	Ubicación de sondajes	54
3.6	Ubicación referencial de calicatas	63
3.7	Ubicación de los arreglos de los ensayos geofísicos	66
3.8	Gráficos de velocidades vs profundidad hasta 50 m de los ensayos E-1 y E-2.	68
3.9	Ubicación y orientación de perfiles de velocidad	69
3.10	Perfiles de velocidad interpretados a partir de E-1 y E-2.	70
3.11	Perfil estratigráfico del terreno del ex hospital traumatológico	72
4.1	Modelo de elevación digital de la cuenca estudiada	74
4.2	Gráfico de precipitación anual (en mm) de la ciudad de Concepción	87
4.3	Esquema conceptual del ciclo hidrológico	88

4.4	Hietograma esquemático que representa la relación entre Precipitación total, precipitación efectiva o escorrentía superficial (Pe), abstracción inicial (Ia) y retención (Fa)	89
4.5	Solución de la ecuación de precipitación neta (escorrentía)	91
4.6	Mapa de distribución de series de suelo, con resolución de 50 x 50 metros	95
4.7	Triángulo textural para la clasificación de suelos según grupo hidrológico	96
4.8	Mapa de uso de suelo, con resolución de 50 x50 metros	98
4.9	Mapa de número de curva	99
4.10	Mapa de precipitación neta anual promedio	100
4.11	Gráfico de escorrentía superficial, estimada con datos desde 1970 al 2000.	101
4.12	Evapotranspiración real. estimada con datos desde 1970 al 2000	109
5.1	Mapa de isopiezas de la ciudad de concepción	117
5.2	Diagrama de flujo de cálculo de índice GOD para la estimación de la vulnerabilidad del acuífero	120
5.3	Mapa de índice GOD para acuífero de la ciudad de Concepción	122



RESUMEN

El uso directo de la energía geotérmica ha demostrado ser uno de los métodos más eficientes, y prometedoras desde el punto de vista económico y medioambiental. La implementación de esta tecnología requiere de un profundo entendimiento de las condiciones hidrogeológicas del área de estudio, ya que el agua constituye uno de los principales agentes caloportadores. Se presenta en este informe un modelo hidrogeológico conceptual de un terreno ubicado en la ciudad de Concepción, Chile. Este modelo incorpora datos geológicos, geofísicos, hidrológicos e hidrogeológicos provenientes de labores de terreno e información publicada; procesados y compilados mediante la utilización de herramientas digitales de georreferenciación. El desarrollo de esta metodología pretende sentar las bases para un mejor entendimiento del agua subterránea y las propiedades caloríficas del subsuelo, así como establecer objetivos futuros de prospección que permitan detallar con mayor precisión la información aquí presentada.



1 INTRODUCCIÓN

El aumento de los costos energéticos y medioambientales asociado al uso de combustibles fósiles ha hecho que la popularidad de los sistemas de energía renovable y eficiente sea cada vez mayor (Lo Russo *et al.*, 2014). Estudios como el de Lund *et al.* (2016), sustentan esta observación al documentar aumento en el empleo de bombas de calor geotérmicas como medio de climatización en construcciones residenciales y comerciales.

El presente estudio es parte de la iniciativa del Servicio de Salud de Concepción, la cual busca implementar nuevas tecnologías energéticas, renovables y eficientes, en miras a una interacción medioambiental más responsable y una optimización de los recursos económicos.

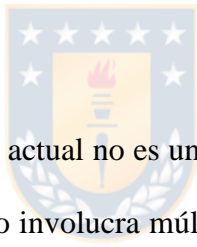
Tras migrar sus servicios a nuevas instalaciones, el antiguo edificio del hospital traumatológico de Concepción cumple aún funciones de asistencia al personal y almacenamiento de recursos del nuevo centro de atención. El funcionamiento de este establecimiento requiere de un sistema de calefacción para satisfacer las necesidades de climatización y consumo de agua caliente, que en el presente resulta ser altamente dependiente de fuentes de energía no renovable.

Por otro lado, la ciudad de Concepción está asentada sobre un amplio valle cubierto por sedimentos no consolidados heredados de antiguos cauces del río Biobío, conformado una potente capa que en algunos puntos alcanza los 160m de espesor y que se profundiza en dirección a la ribera del río (Vivallos *et al.*, 2010). Esta cobertura constituida

fundamentalmente por arena limosa corresponde a un gran acuífero, con un nivel freático muy cercano a la superficie en gran parte de su extensión (Gajardo, 1981). Este rasgo de la particular geología de Concepción es de gran interés para proyectos que requieren de alta disponibilidad de agua subterránea, como es el caso de algunos sistemas de geotermia de baja entalpía, donde este recurso es empleado como fuente y/o transporte.

Para sustentar las ideas presentadas, además de aclarar la motivación de este trabajo, se presenta a continuación una revisión de los principales conceptos de geotermia además de una contextualización del actual escenario energético, mundial y nacional.

1.1 Generalidades



Entender la situación energética actual no es una tarea fácil. Para ello es necesario tomar en cuenta que el tema energético involucra múltiples aspectos de la economía global. La Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) es un organismo que está orientado a coordinar las acciones políticas de los países miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), y anualmente publica análisis bajo el nombre de *World Energy Outlook* (Panorama Energético Mundial) donde son estudiados distintos escenarios energéticos y su evolución en el tiempo. Uno de estos escenarios es el SDS (Escenario de Desarrollo Sostenible), el cual es definido por tres objetivos: lograr el acceso universal a la energía, mejorar la calidad del aire y enfrentar el cambio climático. Lograr este escenario requiere acción principalmente en el campo de las inversiones, donde queda expresado que éstas deben disminuir para el caso del uso de combustibles (principalmente fósiles) y aumentar para proyectos de generación de

electricidad en base a fuentes renovables, en conjuntos con un aumento de tecnologías más eficientes en el uso de la energía (Cozzi *et al.*, 2019).

En Chile ya existen iniciativas formuladas en este sentido, como la Ley n° 20.257, la cual estimula la instalación de proyectos de energías renovables no convencionales (ERNC). Sin embargo, la matriz energética aún es altamente dependiente del uso de combustibles fósiles (principalmente petróleo importado), y la inclusión de ERNC es aún incipiente (Figura 1.1).

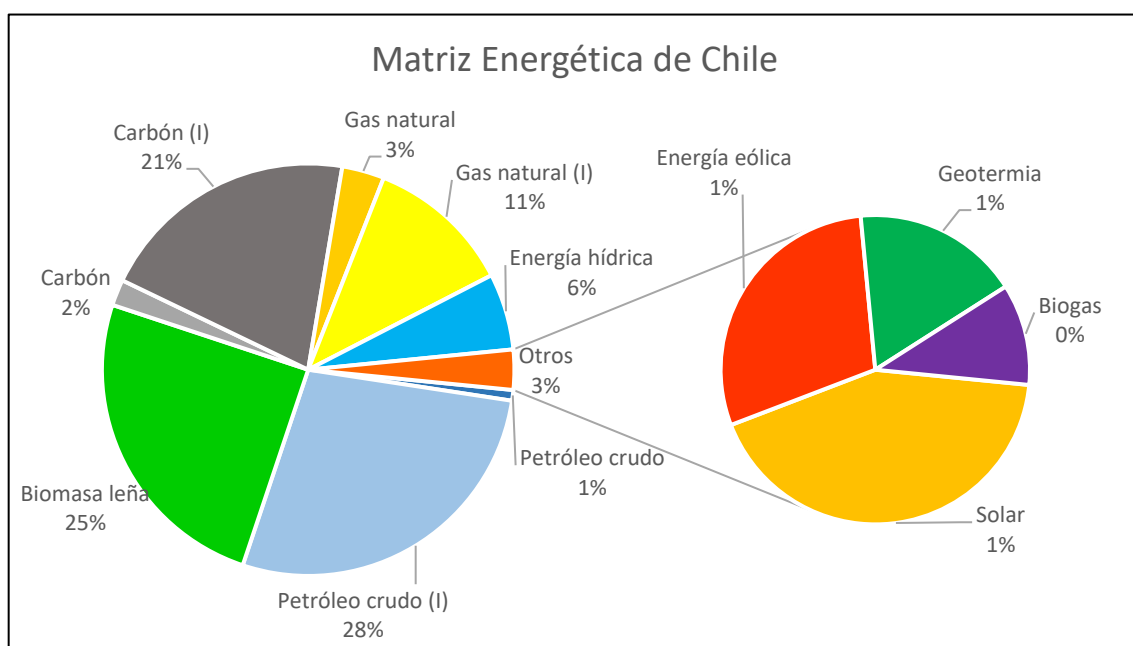


Figura 1.1: Participación de distintas fuentes en la matriz energética nacional. Muestra una gran dependencia en el empleo de combustibles fósiles, donde cerca del 90% de este es importado. Tomado de Agencia Chilena de Eficiencia Energética (2018).

1.1.1 Energía geotérmica

Dentro de las opciones disponibles en el mercado de las ERNC, la energía geotérmica aparece como una de las alternativas más eficientes. Particularmente, los sistemas donde esta es empleada de forma directa han experimentado un notable aumento en su popularidad, lo que queda de manifiesto en un incremento de alrededor de un 800% en la capacidad instalada y utilización entre los años 1995 y 2015 a nivel mundial (Lund & Boyd, 2016).

El uso directo de la energía geotérmica más común es el de calefacción por medio de bombas de calor que utilizan el agua subterránea. Estas instalaciones de climatización ofrecen una mejora substancial en la eficiencia energética, además de una reducción significativa de emisión de CO₂, efectos de calentamiento global y contaminación medioambiental (Russo *et al.*, 2014). Su buen desempeño se basa en la relativa estabilidad de la temperatura del agua subterránea que conlleva una mayor eficiencia si se compara con el desempeño de otros sistemas de bomba de calor que utilizan otras fuentes (como el aire o sedimentos no saturados). Adicionalmente, los sistemas de bombas de calor en base a agua subterránea o GWHP (por las siglas en inglés, *Groundwater Heat Pumps*) requieren menos espacio que sistemas convencionales de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

1.2 Área de estudio

El Hospital Traumatológico de Concepción es uno de los principales centros médicos de la región del Biobío, Chile. Antiguamente, servicio operaba en una construcción aldeaña

que, a partir del 2017, tras su traslado a la ubicación actual (Roosevelt N°1585), cumple funciones de respaldo. Es esta edificación antigua para la que se ha requerido el presente estudio.

1.2.1 Clima

Concepción posee un clima templado marítimo con influencia mediterránea y una estación seca corta. La temperatura promedio anual es de 12°C, con máximas que rodean los 20°C. El promedio en verano es 17°C, mientras que en invierno es de 8°C (Dirección meteorológica de Chile, 2011). Dada la cercanía de la ciudad al mar, y la latitud a la que se encuentra, la oscilación térmica es moderada. Las precipitaciones se concentran entre los meses de Junio y Agosto, y en el año 2019 éstas alcanzaron un promedio de 715,6 mm (Dirección meteorológica de Chile, 2019). Información más detallada de pluviometría, horas de sol y temperatura es presentada en el capítulo de Hidrología.

1.3 Objetivos

Este trabajo pretende incentivar la utilización de sistemas de uso directo de energía geotérmica, presentando un caso real, donde el primer paso consiste en conocer la disponibilidad y naturaleza del material caloportador. El planteamiento general y alcances de este estudio se resumen en los siguientes objetivos.

1.3.1 Objetivo general

Elaborar un modelo hidrogeológico conceptual del área de estudio que reúna información base para estudios posteriores más detallados de prospección y extracción de agua

subterránea, con la finalidad de instalar un sistema de calefacción y climatización en base a energía geotérmica de baja entalpía.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar la geología del área de estudio, en tres dimensiones.
2. Identificar acuíferos y no acuíferos.
3. Estimar propiedades hidráulicas del/los acuíferos.
4. Inferir direcciones de flujo del agua subterránea y niveles piezométricos.
5. Calcular la disponibilidad de agua subterránea a través de un balance hídrico anual.



1.4 Metodología

La metodología empleada para la confección del modelo hidrogeológico obedece a las directrices aconsejadas por la guía para el uso de modelos de agua subterráneas en el servicio de evaluación de impacto ambiental (Servicio de Evaluación Ambiental, 2012), que establece los contenidos mínimos que debe acompañar una modelación que asegure la entrega de información relevante y suficiente para la evaluación de proyectos de evaluación de impacto ambiental. La metodología señalada es de complejidad básica, consistiendo fundamentalmente en una recopilación de datos de acceso público y de estudios básicos facilitados por el solicitante, además del levantamiento de datos geológicos en terreno. El resultado final del presente trabajo contempla la realización de

3 estudios, que en su conjunto constituyen el modelo hidrogeológico conceptual. Estos son:

➤ Estudio Geológico.

- Revisión de estudio previos y antecedentes (cartas geológicas, estratigrafía, habilitaciones de pozos, estudios de suelo, etc.).
- Labores de campo (geología superficial).
- Etapa gabinete.
 - Geología superficial.
 - ✓ Marco geomorfológico y estructural.
 - ✓ Mapa de geología de superficie.
 - ✓ Contacto roca – relleno.
 - Geología subsuperficial.
 - ✓ Profundidad del basamento.
 - ✓ Perfiles geológicos.
 - ✓ Estratigrafía generalizada.

➤ Estudio Hidrológico.

- Revisión de estudios anteriores.
- Recopilación de datos meteorológicos y pluviométricos.

- Etapa de gabinete.
 - Definición de cuenca hidrológica
 - Balance hídrico (precipitación, temperatura, evapotranspiración, escorrentía).
- Estudio Hidrogeológico.
 - Revisión de estudios anteriores y antecedentes (catastro de pozos, niveles freáticos, listado de derechos de agua).
 - Labores de terreno (encuestas de pozos, medición de niveles).
 - Etapa de gabinete.
 - Definición de unidades hidrogeológicas (extensión y propiedades elásticas).
 - Análisis de niveles piezométricos y determinación de la dirección de flujo subterráneo (mapa de iso-piezas).
 - Interacciones de recarga y descarga subterránea.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Recursos y yacimientos geotérmicos

La energía geotérmica es energía calórica almacenada en unidades geológicas. Este calor proviene fundamentalmente del interior de la tierra, aunque también puede proceder de fuentes externas como la luz solar. Como para cualquier otro tipo de recurso, es necesaria la presencia de elementos y procesos que permitan la concentración de la sustancia en cuestión. En el caso de la energía geotérmica, la presencia de agua subterránea que fluye por las unidades geológicas no sólo concentra el calor, sino que además sirve como material directo de aprovechamiento, ya sea por medio de sondaje o bombeo. Según lo anterior, podemos entender que un **yacimiento** geotérmico corresponde a la porción de la corteza terrestre donde se localizan materiales permeables que albergan un **recurso** geotérmico susceptible a ser aprovechado (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2008).

2.1.1 Tipo y usos de yacimientos geotérmicos

El aprovechamiento de este recurso es realizado desde hace miles de años por diversas culturas a lo largo del mundo, principalmente a través baños termales, que son una manifestación natural en superficie de esta energía. Actualmente su uso se encuentra más diversificado donde, dependiendo de la temperatura a la que se encuentre, puede ser empleado para la generación de electricidad, procesos industriales, climatización, entre otros.

La cantidad de energía que puede intercambiar un sistema con su entorno es conocida como **entalpía**, ya sea tomando o cediendo energía en forma de calor. En este sentido, es posible clasificar los distintos recursos geotérmicos según su entalpía, haciendo alusión directa a la temperatura del fluido que alberga (Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Tipos y uso de la energía geotérmica (Gehring & Loksha, 2012).

Tipo	Ubicación geográfica y geológica	Uso/Tecnología
Alta: >200°C	Globalmente alrededor de los límites de las placas tectónicas, en zonas calientes y áreas volcánicas	Generación de energía con tecnología convencional de vapor, flash, doble flash o vapor seco
Medio: 150 – 200°C	En forma global principalmente en geología sedimentaria o adyacentes a recursos de alta temperatura	Generación de energía con centrales eléctricas binarias, por ejemplo, ORC o tecnología Kalina
Baja: <150°C	Existe en la mayoría de los países (el gradiente de temperatura promedio de 30 °C/km significa que los recursos de aproximadamente 150 °C se pueden encontrar en profundidades cercanas a 5 km)	Usos directos (calefacción de espacios y procesos, etc.) y, según la ubicación y la tarifa de energía ofrecida, generación de energía con central eléctrica binaria

Las bombas de calor que emplean agua subterránea caen en la clasificación de los recursos de baja entalpía, específicamente aquellos que rondan entre los 5 a 25°C, y que son conocidos como geotermia de muy baja entalpía o geotermia superficial.

2.2 Propiedades geotérmicas del subsuelo

La base que permite la prospección de geotermia de muy baja entalpía es el estudio de las propiedades térmicas de la fuente de calor que, en este caso corresponde a la cobertura sedimentaria permeable de la superficie de la tierra. Este segmento de la corteza posee una gran inercia térmica, que es la capacidad que tiene un material para almacenar energía calorífica e ir liberándola de manera progresiva (Cabezas, 2012). Adicionalmente, la masa del suelo dado tendrá una capacidad de transferencia de calor interna, la cual queda definida por dos propiedades: la **conductividad térmica** y la **capacidad calorífica**.

Conductividad térmica (λ): propiedad intrínseca de un material que está relacionada con su capacidad para conducir y permitir el movimiento de la energía térmica de manera interna. El calor se mueve espontáneamente dentro del medio, desde áreas de alta temperatura a áreas más frías, tendiendo a un equilibrio y una homogeneidad térmica. En el caso del suelo o sedimento, cuando la conductividad térmica es alta, las variaciones de temperatura dentro del medio son menores. Esta propiedad se incrementa con la humedad y la porosidad del medio, parámetros que dependen principalmente de la granulometría del material. Por lo tanto, un suelo arenoso y húmedo permite una mejor transmitancia térmica que un suelo arcilloso y seco. Cabe mencionar, que un medio poroso y no saturado puede contener espacios vacíos que generan un menor intercambio de calor.

Capacidad calorífica: puede ser entendida como la capacidad de un medio para almacenar calor en respuesta a un cambio de temperatura, sin involucrar un cambio de fase. Esta propiedad es dependiente también del tamaño del grano y humedad del material, donde medios arenosos y húmedos tendrán una menor capacidad calorífica que uno arcilloso y seco. A menor sea este parámetro, menor será la influencia de la temperatura de la superficie sobre la del subsuelo.

Además de las cualidades térmicas del material geológico, la temperatura también dependerá de la profundidad a la que sea medida. El **gradiente geotérmico** es la razón existente entre el nivel térmico y la profundidad de enterramiento, donde un aumento en la profundidad significará también un aumento en la temperatura. Además, la distribución de temperatura dentro del terreno es afectada por la estructura del material, la cobertura superficial (vegetación, tierra desnuda, nieve, etc.) y la interacción climática (condiciones de borde) determinada por la temperatura del aire, viento, radiación solar, humedad atmosférica y lluvia. Es así como la temperatura en la superficie no es siempre constante en el tiempo, por lo que muchas veces existirá una variación estacional del gradiente geotérmico en los primeros metros de enterramiento. La Figura 2.1 muestra un perfil de temperatura a distintas profundidades dentro un pozo medida en dos épocas del año, donde es posible notar esta variación estacional. Adicionalmente, este perfil muestra la existencia de un límite a partir del cual la variación termal estacional es mínima o inexistente, este nivel es conocido como **profundidad de seguridad**, y es un parámetro crítico, necesario de obtener al momento de estudiar la disponibilidad y factibilidad de explotación del recurso térmico.

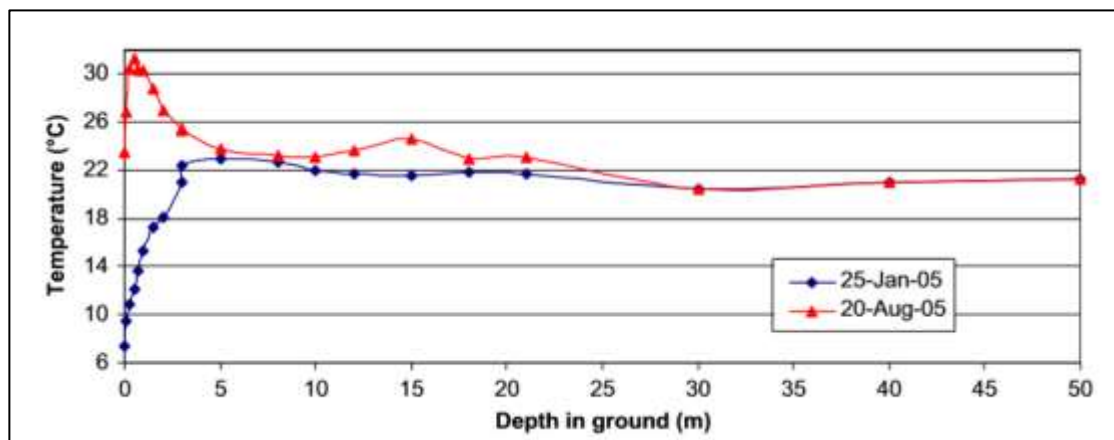


Figura 2.1: Variación de temperatura a profundidad en un pozo de monitoreo ubicado en el hemisferio norte (Nicosia, Chipre). Las curvas azul y roja corresponden a mediciones en invierno y verano, respectivamente. Tomado de Florides & Kalogirou (2007).

Teniendo claro los conceptos previamente presentados, queda de manifiesto que un levantamiento en terreno de información de la geología superficial y subsuperficial es la manera de establecer la naturaleza y disponibilidad del recurso en cuestión. Posteriormente, teniendo identificada una fuente estable de calor a lo largo del tiempo, es necesaria la implementación de sistemas de intercambio de calor que permitan la explotación efectiva de este recurso. Estos sistemas son conocidos como bombas de calor.

2.3 Bombas de calor

Una bomba de calor es un sistema que permite la transferencia de calor desde una fuente hasta su destino, gracias al aporte externo de trabajo. El funcionamiento de este mecanismo es detallado a continuación, y esquematizado en la Figura 2.2.

1. El calor proveniente de la fuente geotermal se transfiere a un fluido de trabajo por medio de un intercambiador de calor llamado **evaporador**. Este fluido de trabajo es un refrigerante que se encuentra en estado líquido saturado y a una temperatura más fría que la fuente geotermal de forma que existe un flujo de calor hacia él. El calor de la fuente evapora y sobrecalienta al refrigerante.
2. El fluido de trabajo, en estado gaseoso, pasa por un **compresor** eléctrico. Este proceso aumenta la presión y temperatura del fluido de trabajo.
3. El fluido de trabajo a alta temperatura intercambia calor con el medio receptor, que puede ser el agua o el aire de un edificio. Este intercambio ocurre en el **condensador** por difusión, debido a que el fluido de trabajo se encuentra a una temperatura mayor que el fluido receptor. A medida que el fluido de trabajo pierde calor, este vuelve a su estado líquido.
4. El fluido de trabajo líquido con alta presión y temperatura luego pasa por una válvula de **expansión**. Aquí la presión del fluido disminuye, al igual que su temperatura baja. Finalmente, este líquido de baja temperatura y presión fluye hacia el evaporador, cerrando y comenzando nuevamente el ciclo.

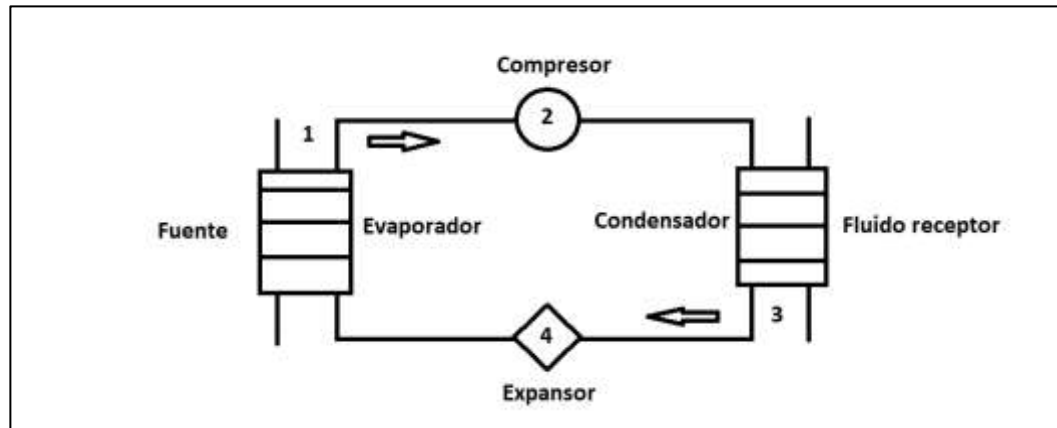


Figura 2.2: Esquema del ciclo de una bomba de calor. Modificado de Self *et al.* (2013)

2.3.1 Coeficiente de eficiencia

La eficiencia es la razón entre la energía producida por una máquina térmica y la energía que le debe ser suministrada para su funcionamiento.

$$\eta_{ter} = \frac{E_{producida}}{E_{suministrada}} = \frac{E_{salida}}{E_{entrada}} \quad (\text{ecuación n}^\circ 1)$$

En una máquina térmica ideal, la eficiencia puede ser expresada como función de las temperaturas de su focos frío y caliente.

$$\eta \equiv \frac{T_H - T_C}{T_H} \quad (\text{ecuación n}^\circ 2)$$

De aquí es posible entender que la eficiencia del sistema dependerá del gradiente térmico que existe entre ambas fuentes.

La bomba térmica transfiere un calor ' Q_c ' a un foco caliente. Éste se obtiene de una fuente fría de la que extrae un calor ' Q_f ' gracias a un trabajo realizado ' W ' que, en este caso, corresponde al trabajo realizado por el compresor. El principio de conservación de la

energía relaciona estos tres términos en la ecuación: $Q_c = W + Q_f$. Es así como la eficiencia de la máquina de calor puede ser expresada como:

$$\eta = \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{Q_c - Q_f}, \text{ para un proceso de calefacción (ecuación n}^\circ\text{3)}$$

o

$$\eta = \frac{Q_f}{W} = \frac{Q_f}{Q_c - Q_f}, \text{ para un proceso de refrigeración (ecuación n}^\circ\text{4)}$$

Dado que el proceso realizado por una bomba de calor no involucra una generación de energía, sino sólo un transporte, el trabajo aplicado al ciclo siempre será menor a la energía de salida del sistema, obteniéndose rendimientos siempre superiores a 1. Es debido a esta particularidad que el término rendimiento es reemplazado por el de eficiencia o CoP (acrónimo del inglés *Coefficient of Performance*). Otro aspecto importante de las bombas de calor es que su eficiencia decrece con el aumento del gradiente térmico que existe entre sus fuentes. Esta es una condición clave a considerar al momento de evaluar la viabilidad de la instalación de un sistema de este tipo, siendo imperativo comprobar que en todo momento la producción de calor será mayor al consumo de energía eléctrica.

Cabe mencionar que en este proceso de transferencia existen factores técnicos asociados a los equipos de calefacción, que se traducen en fugas de energía durante el proceso de transporte, y que deben ser considerados al momento de estimar la eficiencia del sistema. Es por esto por lo que, en la práctica, son empleados indicadores más detallados como el EER (siglas del inglés *Energy efficiency ratio*), el cual considera todo el sistema de extracción y distribución del calor. Este valor es facilitado por los fabricantes de los

respectivos equipos de calefacción en forma tablas de potencia térmica versus potencia absorbida, lo que permite realizar un análisis más realista que permita garantizar un ahorro energético y económico.

2.3.2 Tipos de bomba de calor

Los distintos tipos de bomba de calor se clasifican según los materiales que aportan y reciben el calor, y según el tipo de ciclo que es empleado para permitir esta transferencia energética.

2.3.2.1 Clasificación según naturaleza materiales

Como se mencionó anteriormente, dependiendo de la fuente de calor (Aire, Agua o Tierra) y del fluido receptor (Aire o Agua), existen diferentes tipos de bombas de calor:

Aire – Aire: Las más comunes; por factores económicos y sobre todo por la disponibilidad de las fuentes. La máquina toma calor del aire exterior y se lo cede a un caudal de recirculación del aire del local a calefactar.

Aire – Agua: Toma el calor del aire exterior y se lo cede al agua de circulación de una instalación de calefacción por agua. Son muy adecuadas las instalaciones de suelo radiante por su baja temperatura de funcionamiento.

Agua – Aire: Toma el calor de una corriente de agua: un río cercano o una corriente subterránea y se lo cede al aire del local a calefactar.

Agua – Agua: Toma el calor de una corriente de agua y se lo cede al agua de una instalación de calefacción.

Las bombas que toman calor del agua tienen un **CoP** superior a las de aire, debido a que la temperatura de esta es más constante, sobre todo en el caso de aguas subterráneas. La de los ríos es más variable a lo largo del año, pero no tan variable como la del aire exterior, ni tampoco tan impredecible. Sin embargo, su uso está supeditado a la existencia en las cercanías de la instalación de una corriente de agua adecuada, lo cual no es fácil y restringe en gran manera la aplicación de estas máquinas.

2.3.2.2 Clasificación según tipo de ciclo

En base a la geometría del sistema de cañerías y la naturaleza del fluido transportador, esta clasificación comprende intercambiadores de calor **abiertos** y **cerrados**.

2.3.2.2.1 Sistemas abiertos:

En este caso, el calor del suelo eleva la temperatura del medio que será empleado de forma directa como fluido receptor. Un sistema de tipo abierto podría ser uno en el que se hace circular aire a través de tubos enterrados, donde es precalentado (o pre- enfriado), para posteriormente ser calentado o enfriado por una unidad de aire acondicionado e ingresar a la construcción (Figura 2.3, izquierda). De forma similar, agua subterránea o un estrato portador de agua puede ser usado como medio portador de calor que entra en contacto directo con la tubería de la bomba de calor. En tales casos es requerida la instalación de dos pozos, uno de extracción y otro para la reinyección del agua subterránea empleada (Figura 2.3, derecha).

Existen además sistemas con intercambiadores verticales (o intercambiadores de pozo). Éstos son empleados en sitios con menor disponibilidad de espacio o cuando realizar una excavación no es viable debido a la poca profundidad del fondo rocoso (Figura 2.4). Como fue visto en capítulo 2.2, este traspaso de calor es posible debido a la estabilidad térmica que existe a partir de cierta profundidad.

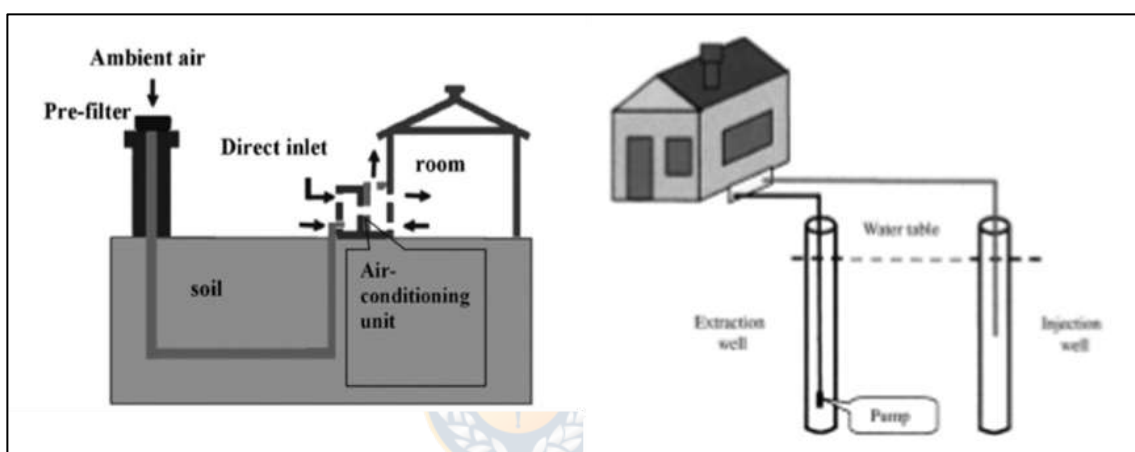


Figura 2.3: Esquemas de sistemas de calefacción abiertos. A la izquierda se muestra el esquema básico de precalentamiento del aire por calor del suelo; a la derecha se muestra la disposición de los elementos de una bomba de calor asociada a agua subterránea. Tomado de Florides & Kalogirou (2007).

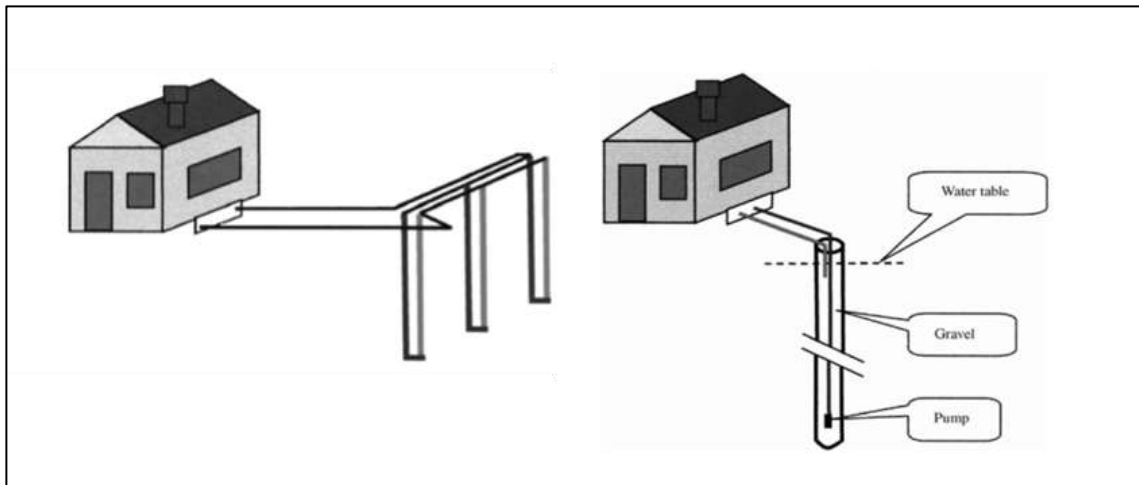


Figura 2.4: Esquema de sistema verticales cerrados. A la izquierda se detallan los elementos típicos de una sonda instalada en un pozo de agua subterránea. Tomado de Florides & Kalogirou (2007)

2.3.2.2.2 Sistemas cerrados:

En este caso, intercambiadores de calor (sondas térmicas) son enterrados, ya sea de forma horizontal, vertical u oblicuamente, y un medio transportador de calor (usualmente un fluido refrigerante) es circulado dentro del intercambiador. Usualmente, las configuraciones horizontales (Figura 2.5) son las que tienen una mejor relación entre costo y efectividad cuando se dispone del suficiente terreno y éste es fácil de excavar. Aquí, el fluido intercambiador circula por un circuito (en serie, paralelo o tipo trinchera) absorbiendo el calor acumulado en el suelo debido a la radiación solar que éste recibe. Es por lo tanto necesario considerar que el terreno ocupado no sea cubierto posteriormente, lo cual requiere una mayor planificación y diseño del área a intervenir

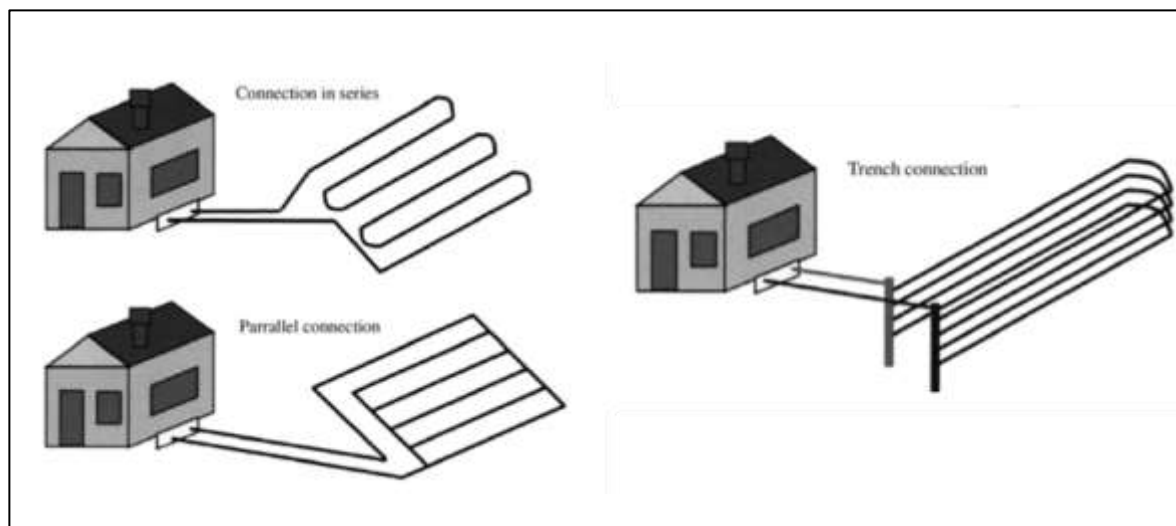


Figura 2.5: Esquemas de intercambiadores horizontales cerrados. Tomado de Florides & Kalogirou (2007).



3 GEOLOGÍA

La energía geotérmica de baja entalpía es un recurso almacenado en las capas más superficiales de la corteza terrestre. Esto hace que conocer el tipo y distribución de las distintas unidades geológicas encontradas dentro del área de estudio, sea la base teórica para este tipo de estudios. Es esencial además caracterizar el comportamiento del agua dentro de estas unidades (si se encuentra), ya que este elemento juega un rol primordial en la distribución del calor dentro del medio, además de servir en muchos casos como el fluido que permite su aprovechamiento. En este capítulo se presenta un resumen de los principales rasgos del terreno en miras a identificar, de forma preliminar, la distribución del recurso energético.



3.1 Geomorfología

La ciudad de Concepción se encuentra en la zona central de Chile, emplazada sobre el territorio conocido como el Valle de la Mocha. Este valle corresponde a una fosa tectónica, que se encuentra entre la cordillera de la costa y la planicie litoral, en el borde occidental del continente sudamericano, una de las zonas tectónicas más activas del mundo en la actualidad. Las variadas unidades geomorfológicas que constituyen el relieve del sector son reflejo de esta dinámica, y su distribución es un factor de control de primer orden para la disposición de la cobertura de sedimentos y los cauces de aguas continentales superficiales y

subterráneas. De este a oeste, estas unidades son: cordillera de la costa, planicies litorales, cerros islas, horst occidentales y terrazas marinas; como se presenta en la Figura 3.1.

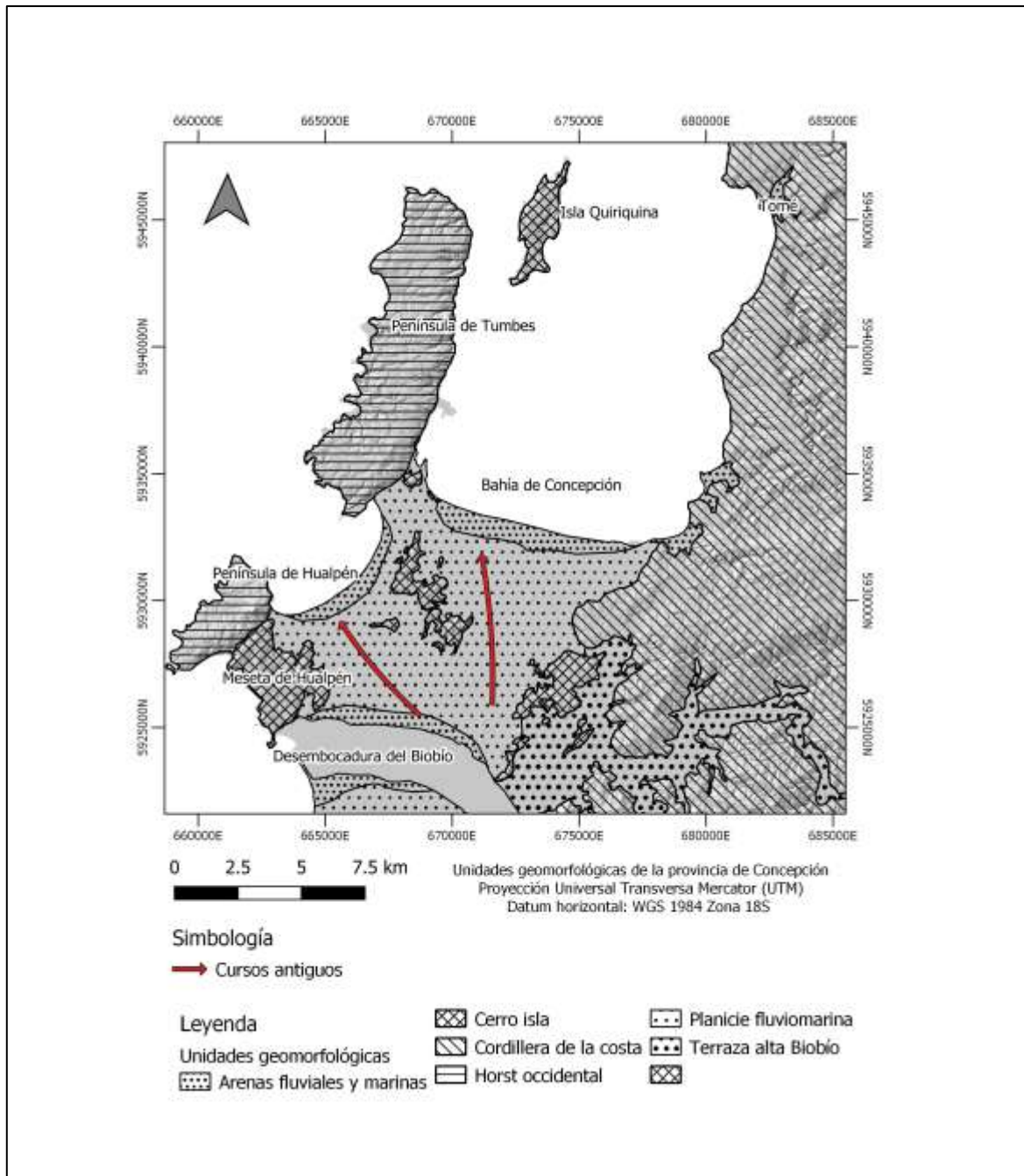


Figura 3.1: Geomorfología de la provincia de Concepción. Elaboración propia

3.1.1 Cordillera de la costa

Corresponde al límite oriental del área de estudio (Figura 3.1) extendiéndose en dirección N-S. Es un cordón montañoso de aspecto acolinado y de alturas que no superan los 250 m, y cuya exhumación ha sido constante desde el triásico a una tasa de 0,03-0,04 mm/año (Glodny *et al.*, 2008). El límite occidental es escarpado, producto de la presencia de fallas normales de dirección NE-SW que además son el límite oriental de la llanura de Concepción.

Este cordón montañoso es cortado por el valle fluvial del río Andalién y más al sur, el río Biobío. Entre sus cumbres más importantes destacan los cerros Caracol y Lo Pequén, con alturas cercanas a los 250 m s.n.m. Börgel (1983) estimó que más del 60% de la cordillera costera estaría afectada por la erosión moderada a muy severa.



3.1.2 Planicie litoral

Limita al este con la Cordillera de la Costa (desde donde se extiende unos 11 km hasta la costa) y al sur con el río Biobío, abarcando unos 9 km hasta las costas de la bahía de Concepción en el norte. Esta unidad es la que abarca mayor superficie dentro del área de estudio, y constituye una llanura de agradación fluvio-marina. La evolución de esta llanura está ligada a la parte superior del delta del río Biobío, que ha sido modelado por procesos fluviales, eólicos, marinos y antrópicos. Esta evolución es evidenciada por los diferentes niveles aterrizados, cursos de inundación del río Biobío (actuales y abandonados) y depósitos aluviales del río Andalién; además de dunas, marismas costaneras y barras litorales (Galli, 1967). Su altura no supera los 10 m s.n.m. en la mayor parte de su extensión, y decae hacia el norte hasta desaparecer, dando lugar a sectores donde la cordillera de la costa termina

abruptamente en el mar en forma de potentes acantilados de hasta 50 m de altura en las localidades de Dichato, Tomé y Penco, entre otras (Mendoza, 2001).

3.1.3 Cerros Isla

Comprende a aquellos cerros que emergen de la planicie litoral, entre ellos el cerro Chepe, La Pólvara, Lo Galindo, Amarillo, Chacabuco; los más importantes. Estos rodean los 80 m s.n.m. y corresponden a bloques tectónicos basculados, limitados por fallas normales al sureste (Quezada, 1996). Estos cerros exhiben un relieve disimétrico y discontinuo, con escarpes pronunciados en los bordes que miran hacia la cordillera de costa y laderas escalonadas de menor pendiente hacia el oeste. Dicha morfología es explicable en gran medida por la presencia de fallas los bordes que los escarpes más pronunciados, que además siguen la misma dirección estructural (NNE-SSO, aproximadamente) que las fallas asociadas al Horst de Tumbes y Hualpén y la cordillera de la costa. Su litología sedimentaria cenozoica marina-continental, da indicios de la edad de la fosa estructural y de las transgresiones del mar en ella (Mardones & Brito, 1978).

3.1.3.1 Horst Occidentales

Las penínsulas de Tumbes y los cerros Tetas constituyen bloques solevantados y compartimentados por un doble sistema de fallas ortogonales, de dirección NO-SE y NE-SO. En ambas penínsulas, acantilado marino actual, de probable origen tectónico-eustático, presenta un trazado muy irregular, con ensenadas de fondos estrechos ocupadas por el mar y penínsulas formadas por cornisas de erosión casi horizontales (Mardones & Brito, 1978).

3.1.3.2 Península de Tumbes

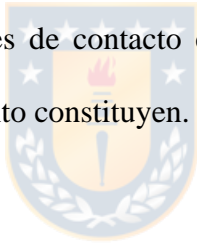
Al norte, la península de Tumbes presenta un relieve disimétrico y amesetado, con mayores elevaciones hacia el escarpe del este, de manera similar los cerros isla que se alzan en la llanura de Concepción. El escarpe oriental es un pronunciado acantilado modelado por el mar que aprovecha además la debilidad de la falla Tumbes y que cae abruptamente hacia la bahía de Concepción, y hacia el oeste, la meseta escasamente pasa los 100 m s.n.m. y sus pendientes son largas y muy convexas en la base.

3.1.3.3 Península de Hualpén

Limitado por la bahía de San Vicente por el norte y la desembocadura del Biobío al sur, este bloque presenta una extensión de unos 17 km². La parte más occidental corresponde a los cerros Teta Norte y Teta Sur, y tiene el aspecto de una península con alturas superiores a los 200 m s.n.m. En su borde que mira el océano hacia el oeste y hacia el sur, la roca granítica ha sido trabajada por la erosión marina, labrando un trazado mucho más sinuoso que Tumbes. En el sureste, otro tipo de relieve corresponde a una plataforma extensa de poco más de 50 metros de altura, probablemente labrada por el mar. El contacto entre la meseta de Hualpén y los cerros Tetas es abrupto y rectilíneo, que corresponde además a un contacto litológico entre rocas graníticas y metamórficas que repite la dirección estructural del abrupto escarpe de falla que limita el Horst de Tumbes de la llanura de Talcahuano.

3.2 Unidades Geológicas

En la ciudad de Concepción se hayen una serie de unidades litoestratigráficas y litodémicas, con edades que abarcan desde el Paleozoico hasta la actualidad (Figura 3.2). De forma general, se presentan rocas ígneas intrusivas (cuya composición varía de tonalítica a granítica) que intruyen rocas metamórficas conformadas principalmente por filitas, esquistos, pizarras y metasedimentitas. En conjunto, ambas unidades constituyen el Basamento Cristalino. Sobre este basamento se depositan una serie de secuencias sedimentarias de origen marino y continental, cuyas edades van desde el Triásico superior al Cuaternario, seguidas por la actual deposición de sedimentos que continúan su acumulación en la actualidad. Estas secuencias poseen distintas relaciones de contacto entre ellas, evidenciando la compleja historia del territorio que en su conjunto constituyen.



3.2.1 Rocas metamórficas

Las rocas del basamento metamórfico corresponden a las más antiguas dentro del contexto geológico del área de estudio, aunque estas no afloran dentro del cuadrángulo acotado del presente trabajo. Dichas rocas se encuentran dispuestas como franjas paralelas de orientación NNE-SSW y se extienden desde el Norte de Pichilemu hasta Puerto Montt, incluyendo Chiloé (Gajardo, 1981). El basamento metamórfico se encuentra constituido por la Serie Oriental y la Serie Occidental, estas series fueron interpretadas como un cinturón metamórfico pareado, de edad casi contemporánea, pero con características petrográficas y mineralógicas diferentes. Este habría surgido como la evolución de un prisma de acreción, y aunque la edad del complejo ha sido difícil de determinar, el escaso contenido

fosilífero ha permitido acotar la sedimentación del protolito al Devónico-Carbonífero temprano (Aguirre *et al.*, 1972).

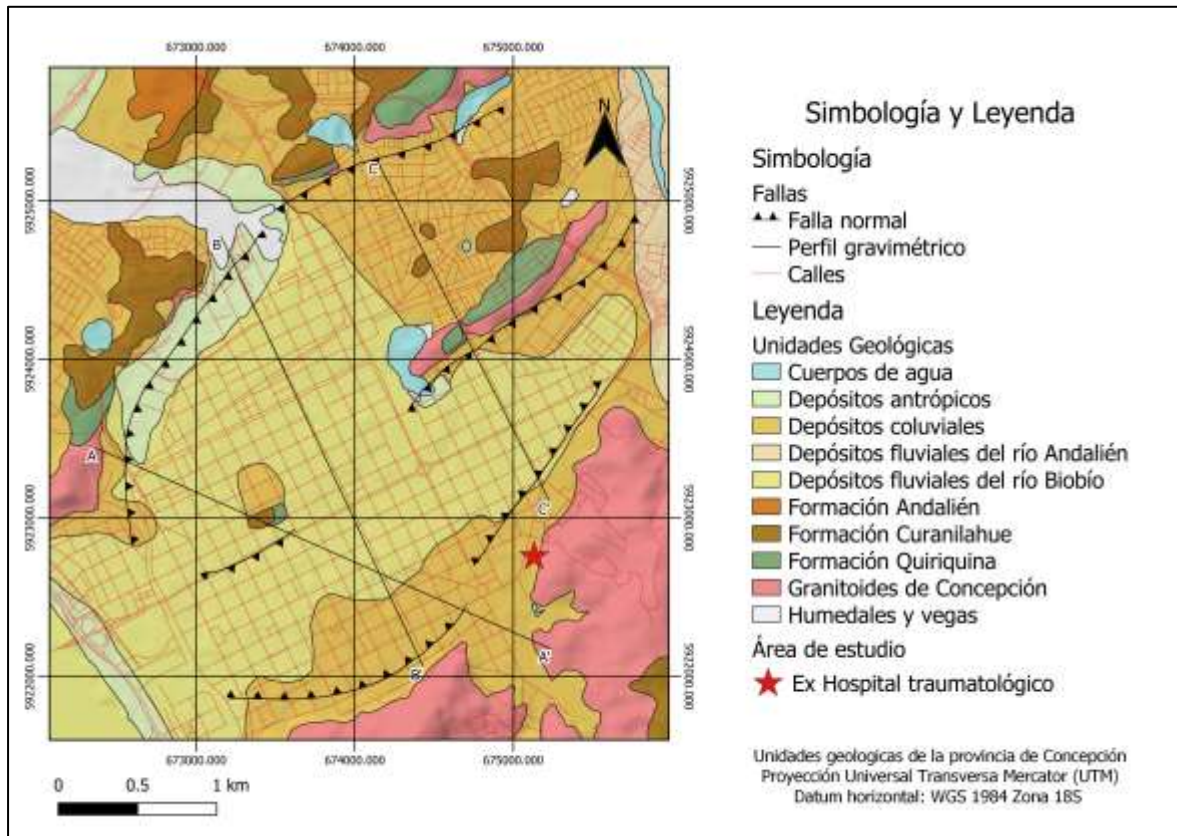


Figura 3.2: Mapa geológico del sector céntrico de la ciudad de Concepción con ubicación de perfiles gravimétricos. Ubicación del ex hospital traumatológico señalada con marcador rojo. Modificado de Vivallos *et al.* (2010).

3.2.1.1 Serie occidental

La Serie Occidental corresponde a una franja de alto P/T (facies de esquistos verdes a esquistos azules), está constituida principalmente por esquistos metapsamopelíticos, con sedimentos siliciclásticos de fondo oceánico como protolito. En intercalación con estas rocas, se encuentran esquistos verdes con protolitos de metabasita, micaesquistos con porfiroblastos

de albita y, más localmente, metacherts y serpentinitas (Hervé *et al.*, 1976). En esta serie la estratificación (S0) se encuentra obliterada por una foliación S2 subhorizontal, que es evidencia de un proceso de acreción basal (Willner, 2005).

El rango de edad del metamorfismo de esta serie ha sido determinado por diversos autores: Martin *et al.* (1999) calcularon el peak entre los 328-304 Ma; Munizaga *et al.* (1973) obtuvieron, con mediciones de Rb/Sr, resultados entre 334-266 Ma.

3.2.1.2 Serie oriental

La serie Oriental, corresponde a una serie de bajo P/T, está compuesta principalmente por metapsamitas y metapelitas; además de gneises, migmatitas y rocas calcosilicatadas en menor medida (Vásquez, 2001). El protolito corresponde a una secuencia detrítica depositada en plataforma del antearco. Estos depósitos fueron adheridos al margen continental mediante un proceso de acreción frontal y luego deformados por acreción basal y por la intrusión del Batolito Costero del Sur (Hervé *et al.*, 1987). La Serie Oriental fue afectada por metamorfismo regional de contacto (tipo Buchan) generado por la intrusión del Batolito Costero (Hervé, 1987; Vásquez, 2001), que ocasionó la aparición de zonas mineralógicas de biotita, andalucita y sillimanita, que corresponden a franjas sucesivas al aumentar el grado de metamorfismo hacia el E, al acercarse al batolito. El grado de metamorfismo, estimado a partir de las asociaciones minerales, llega hasta la facies anfibolita o granulita inferior, con temperaturas de 650°-700°C y presiones de 4 a 6 kbar (Hervé, 1976). En cuanto al rango de edad del metamorfismo, Lucassen *et al.* (2004) obtuvieron una edad de 298 ± 8 Ma mediante K-Ar, indicando un proceso contemporáneo al magmatismo del Carbonífero-Pérmico.

3.2.2 Rocas intrusivas

Las rocas plutónicas del área de estudio corresponden a granitoides calco-alcalinos definidos informalmente como Batolito Costero del Sur por Hervé *et al.* (1987) y monzogranitos que afloran al NW de la Península de Hualpén, definidos como Plutón Hualpén.

3.2.2.1 Batolito Costero del Sur

El Batolito Costero contempla gran parte de las rocas intrusivas paleozoicas que se presentan en la cordillera de la Costa (Hervé y otros 1987). Afloran en la parte central de la Cordillera de Nahuelbuta como una franja continua de orientación NNE-SSW, que se extiende desde los 32°30' hasta los 38°S y se define como una unidad que incluye principalmente a granodioritas y tonalitas; en cantidades menores granitos, seguido de dioritas (Gajardo, 1981). La litología presenta zonación lateral, las granodioritas y tonalitas se encuentran al centro del batolito y en los márgenes, dominan composiciones más diferenciadas, como algunos cuerpos pegmatíticos y granitos de biotita y muscovita; con minerales accesorios como granate, cordierita y sillimanita (Creixell, 2001).

Las dataciones radiométricas realizadas están concentradas alrededor de los 280-300 Ma. Rb-Sr define una isócrona de 294 ± 24 Ma y a la altura del Río Itata, los granitoides arrojan una edad K-Ar de 296 ± 2 Ma en Biotita. Estos resultados son consistentes con el ciclo magmático a los 295 ± 5 Ma, cercano al límite Carbonífero – Pérmico (Hervé, y otros, 1987). El emplazamiento del batolito se produjo en un período muy corto de tiempo (20 Ma), esto pudo deberse a una migración del arco por cambios en los parámetros de subducción (Deckart *et al.*, 2014).

La intrusión del Batolito en el Basamento Metamórfico genera tres zonas de metamorfismo de contacto: zona de biotita, zona de andalucita y zona de sillimanita, aumentando el grado de metamorfismo a medida que disminuye la distancia al intrusivo. Evidencias texturales y geocronológicas sugieren que la intrusión es contemporánea al segundo episodio de deformación de las rocas metamórficas de la Serie Oriental (Hervé, 1987).

3.2.2.2 Plutón Hualpén

Ubicado al NW de la península de Hualpén, el Plutón Hualpén es definido como un monzogranito de biotita, el cual posee cantidades menores de cordierita y turmalina. Está asociado a diques aplíticos, andesíticos y tonalítico, y en contraste con los intrusivos del Batolito Costero del Sur, se determinó un emplazamiento epizonal para el Plutón Hualpén (esto en base a la presencia de cavidades miarolíticas, feldespatos alcalinos en forma de ortoclasa peritética y una aureola de metamorfismo de contacto de extensión moderada (Creixell, 2001)). Dataciones radiométricas realizadas por Lucassen *et al.* (2004), dan edades de 220 ± 5 Ma y 222 ± 2 Ma, utilizando método Rb/Sr, confirmando edades obtenidas anteriormente por Hervé y otros (1987). El Plutón Hualpén intruye a la Serie Occidental y al Batolito Costero del Sur y se encuentra en contacto por falla con la Serie Oriental. (Creixell, 2001).

3.2.3 Rocas estratificadas

3.2.3.1 Formación Santa Juana (Cárnico – Rético)

Unidad sedimentaria compuesta por secuencias continentales y marinas de lutitas, grauvacas, arcosas y conglomerados del Triásico Superior, definida formalmente por Ferraris (1981). Aparece expuesta en la Cordillera de la Costa y en el valle inferior del río Biobío, en las cercanías de la localidad de Santa Juana, donde está definida su localidad tipo (Tavera, 1960; Nielsen, 2005). Detalles sobre esta unidad escapan a los alcances del presente estudio.

3.2.3.2 Formación Quiriquina (Maastrichtiano)

Unidad sedimentaria marina definida formalmente por Biró (1982) como una secuencia transgresiva marina-litoral, con influencia de tormentas. En dicho trabajo es definida su localidad tipo al noroeste de la Isla Quiriquina, en la Bahía Las Tablas. Además, la unidad aflora en la costa de Cocholgüe, donde se define su localidad para-tipo y en cerros islas en las comunas de Concepción y Talcahuano (Biró, 1982). La Formación Quiriquina yace en inconformidad sobre el Basamento Metamórfico y los granitoides triásicos, y subyace en paraconformidad a las secuencias paleógenas y cuaternarias. Salazar (2004) describe la secuencia de base a techo como: conglomerado con clastos polimícticos con tamaño de hasta 10 cm de diámetro, clastos de filitas, esquistos, meta-arenitas y cuarzo lechoso; areniscas amarillas, con estratificación cruzada e intercalación de lentes conglomerádicos, en las que se observa *Mytilus primigenius*, *Inoceramus biroi*, *Ostrea* sp., *Dentalium chilensis* y *Baculites* sp.; intercalaciones de bancos de coquinas en areniscas glauconíticas granodecrecientes en las que se encuentra *Pacitrignonia hanetiana*, *Cardium acuticostatum*;

areniscas y limolitas verdes, con niveles de concreciones calcáreas alineadas paralelas a la estratificación, con presencia de *Eubaculites carinatus*, *Chlamys chilensis*, *Solariella* sp. Biró (1982) la asigna al Campaniano – Maastrichtiano, sobre la base del contenido fósil. Posteriormente, Stinnesbeck (1986) asigna una edad Maastrichtiano, mediante una comparación global de rangos de ammonites; y finalmente Salazar (2004), también en base a los amonoideos presentes, acota su edad a la parte superior del Maastrichtiano Inferior y/o el comienzo del Maastrichtiano Superior hasta el Maastrichtiano Superior más alto.

3.2.3.3 Formación Cosmito (Eoceno Inferior)

Definida por Galli (1967) como un conjunto de capas horizontales o levemente inclinadas de lutitas, areniscas, conglomerados y mantos de carbón. Aflora en Concepción y Talcahuano, definiéndose su localidad tipo en una estación de ferrocarril ubicada 5 km al norte de Concepción, en la localidad de Cosmito. Se interpreta como depósitos lagunares costeros, asociados a pantanos y dunas litorales formados en un ambiente de baja energía Salazar (2004). La unidad yace en inconformidad sobre la Suite Intrusiva Concepción y en paraconformidad a la Formación Quiriquina; y subyace en discordancia angular a la Formación Andalién y a los depósitos recientes (Formación Huachipato). La unidad es correlacionable a la Formación Cerro Alto, descrita por Frutos (1982) en la Isla Quiriquina y a la Formación Curanilahue descrita por Muñoz-Cristi (1946).

3.2.3.4 Formación Andalién (Plioceno – Pleistoceno)

Secuencia de areniscas y conglomerados polimícticos meteorizados, con matriz arenosa de granulometría media a gruesa y clastos subredondeados, definida por Galli (1967). La unidad

aflora en Cerro verde, al oeste de Concepción y en Penco. Corresponde a depósitos torrenciales que representan un ambiente continental de piedemonte. Yace en discordancia angular sobre las rocas paleógenas de la Formación Cosmito e infrayace de la misma forma a los sedimentos de la Formación Huachipato Salazar (2004). Se estima una edad Plioceno-Pleistoceno, que estaría dada por la correlación con rocas de la Formación Tubul en la Península de Arauco de edad Plioceno – Pleistoceno (Galli ,1967).

3.2.4 Depósitos no consolidados

Corresponden a sedimentos semi- consolidados y no consolidados que incluyen depósitos continentales y litorales. Los depósitos continentales están conformados por depósitos de origen aluvial, coluvial y fluvial; mientras que los depósitos litorales corresponden a distintos niveles de terrazas marinas, dunas y arenas de playa que se distribuyen a lo largo de la costa.

3.2.4.1 Depósitos coluviales (Pleistoceno – Holoceno)

Arcillas y limos, con algo de arenas finas a medias, provenientes de la meteorización de rocas sedimentarias e intrusivas. Emplazados en las laderas de los cerros de la ciudad de Concepción, su origen se asocia a procesos de remoción en masa que afectaron principalmente al material granítico meteorizado (denominado informalmente maicillo), de menor estabilidad mecánica, lo que se evidencia por la mayor proporción de este material en estos depósitos. Los afloramientos principales son aquellos de los Cerros Chepe, La Pólvora, Lo Galindo, La Virgen, Caracol, y en sectores como Puchacay, Lonquén y Villuco, los cuales pueden encontrarse estratificados y, en algunos sectores como el Barrio Universitario, interdigitado y en forma de lentes, dentro de los Depósitos fluviales del Biobío (Quezada,

1996). En base a similitudes composicionales y texturales, esta unidad es correlacionable con las unidades Arenas coluviales y relleno de cárcavas y Materiales derrumbados, descritos por Galli (1967).

3.2.4.2 Depósitos fluviales del Biobío (Pleistoceno superior – Holoceno)

Unidad informal propuesta por Quezada (1996) bajo el nombre de arenas del Biobío, corresponde a una secuencia de arenas basáltica medias a gruesas, con selección moderada a buena, intercalada en algunos sectores con capas de limo, arcilla y arenas muy gruesas. Los sedimentos se distribuyen en la bahía de Concepción, en la bahía de San Vicente, el río Biobío, en los escarpes de la Cordillera de la Costa y la península de Tumbes, y corresponde al suelo de fundación de la ciudad de Concepción. El sondaje profundo efectuado por IDIEM y descrito por Poblete (1967), ilustra una columna tipo de esta unidad, que comienza con unos 30 m de ripio seguidos por 100 m de arena y arena limosa intercaladas, que descansan sobre el basamento granítico, y que en niveles superiores (entre los 25 y 28 metros) presenta un característico nivel limoso (Figura 3.3). El origen de estos depósitos está ligado a un extenso delta que habría estado ubicado inicialmente en la bahía de Concepción, y que posteriormente habría migrado hacia la bahía de San Vicente, para finalmente emplazarse en su posición actual, en el golfo de Arauco, como evidencian los antiguos cauces aún visibles desde imágenes satelitales que se encuentran entre la ribera occidental del río Andalién y el cerro Chepe. Durante el desplazamiento de este delta se habrían depositado las espesas capas de sedimento que actualmente rellenan el valle de la Mocha, cuya intercalación rítmica entre arenas finas y gruesas es evidencia de un régimen estacional con períodos de mayor y menor energía. Esta unidad yace discordantemente sobre las formaciones más antiguas mencionadas

anteriormente, y en su porción oriental sería cubierta por los depósitos fluviales del río Andalién. Esta unidad fue propuesta informalmente por Galli (1967) como Formación Huachipato, sin embargo, en el presente estudio se generaliza su denominación para incluir depósitos fluviales actuales asociados al cauce del río. Esta unidad es correlacionable la unidad Depósitos de arenas del Cono del río Laja de propuesta por Brüggén (1950). Martínez-Pardo (comunicación epistolar en Galli, 1967) reconoce tres biofacies superpuestas de foraminíferos en esta unidad, cuyo período máximo de desarrollo habría tenido lugar entre el Pleistoceno superior y el Holoceno, edad a la cual es asignada.

3.2.4.3 Depósitos fluviales del Andalién (Pleistoceno superior – Holoceno)

Los depósitos fluviales del río Andalién fueron definidos informalmente por Galli (1967), como Arenas Andalién, y están conformados por arenas cuarcíferas, arcillas y limos que yacen concordantemente sobre los depósitos del Biobío, en inconformidad al Basamento Paleozoico y se disponen adyacentemente a los materiales coluviales de composición granítica y de rocas clásticas. Su distribución es local, acotada al lecho y las terrazas bajas formadas por el río Andalién.

3.2.4.4 Depósitos litorales

Los depósitos litorales corresponden a distintos niveles de terrazas marinas, dunas y arenas de playa que se distribuyen a lo largo de la costa. Las dunas fueron descritas informalmente por Galli (1967) como depósitos de arenas medias a finas, mezcladas con limo, sin cementación ni estratificación que, al igual que las arenas Andalién, yacen sobre la Formación Huachipato (depósitos fluviales del Biobío) distribuidas en las playas de la bahía de San Vicente y en el sector de la desembocadura del río Biobío, en Hualpén. Las arenas de

playa, por su parte, se separan en arenas silíceas y arenas titaníferas. Las arenas silíceas están conformadas por sedimentos clásticos, provenientes de la desintegración por meteorización de rocas graníticas del Batolito de la Costa (Gajardo, 1981). Por otro lado, las arenas negras titaníferas corresponden a sedimentos cuaternarios con baja consolidación originados de la meteorización y erosión de rocas ígneas y metamórficas que poseen Fe y Ti, el cual es reconcentrado por el oleaje costero (Collao *et al.*, 2000).



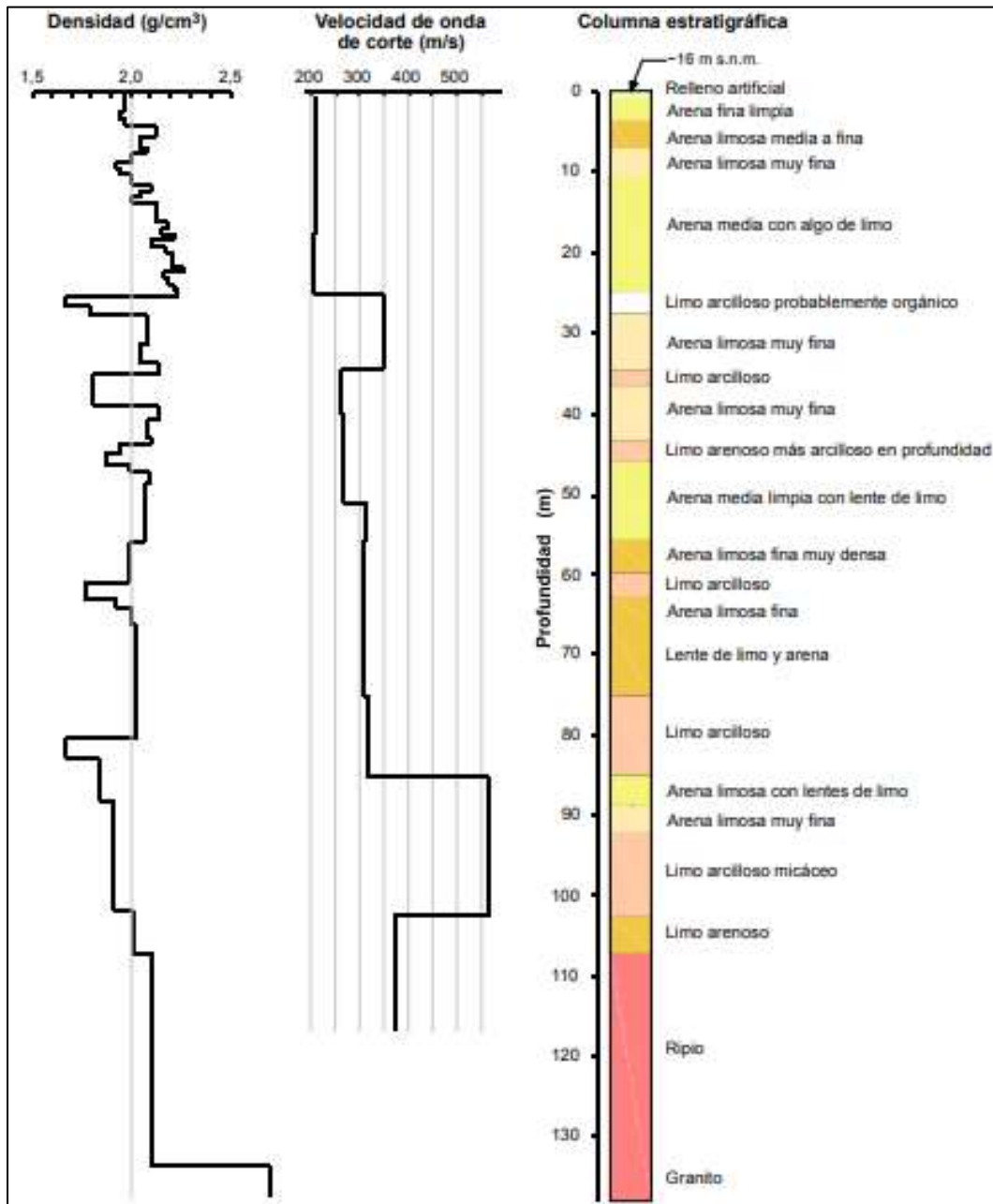


Figura 3.3: Modelo estratigráfico, de densidad y velocidad de ondas de corte para sondaje

‘Pozo 1’, tomado de Poblete en Vivallos *et al.* (2010).

3.3 Geología estructural

El ambiente tectónico regional del área de estudio corresponde al borde de un margen convergente de placas. En tal tipo de ambiente, los esfuerzos tectónicos varían a lo largo del tiempo en su dirección y magnitud, dando lugar a una compleja historia de deformación. Dentro del cuadrángulo estudiado, las evidencias de esta historia están en los pliegues, fallas, estratificaciones, etc., encontradas en las rocas más antiguas que conforman el basamento hasta a las más modernas que constituyen la cobertura sedimentaria. De todos estos rasgos, las fallas son las de mayor importancia dentro del contexto del presente estudio, debido al efecto que estas tienen la modelación de relieve, además de la distribución de las unidades geológicas, el agua subterránea y el calor interno de la tierra. Quezada (1996) sostiene que la ciudad de Concepción se encuentra atravesada por fallas normales que delimitan bloques que descenden o se basculan por su acción generando cuencas estructurales. Otro tipo de estructuras como pliegues y estratificaciones no son de interés para este análisis.

3.3.1 La fosa de Concepción

En la Figura 3.2 se muestra la ubicación de las fallas normales que limitan las principales unidades geomorfológicas del sector, quedando en manifiesto el rol que estas juegan en el desarrollo del amplio valle donde se asienta la ciudad de Concepción, que es nombrado por Galli (1967) como la fosa de Concepción.

Vivallos *et al.* (2010) realizan un estudio gravimétrico a lo largo de los perfiles indicados en la Figura 3.2. En el perfil **A-A'**, ubicado al sur de la ciudad, se observa que la cuenca urbana de Concepción, integrada por rocas sedimentarias y con predominio de depósitos no

consolidados, alcanza un espesor de 133 m entre las calles Freire-Colo Colo y San Martín-Tucapel, extendiéndose y profundizando hacia la ribera del río Biobío. Entre las calles Lincoyán-Rozas y Rengo-Las Heras existe una anomalía gravimétrica positiva que se correlaciona con un afloramiento de rocas sedimentarias (arenisca), el cual yace discordantemente sobre el basamento granítico menos profundo. Éste divide la cuenca en dos depocentros, teniendo la subcuenca suroriental la mayor extensión. El perfil **B-B'**, coincide con el trazado de la calle Castellón. La curva de anomalía gravimétrica de este perfil muestra mínimos relativos que corresponden en el sector NW a depósitos no consolidados y a rocas sedimentarias; el sector SE, en cambio, corresponde solo a depósitos no consolidados. El relieve del basamento está dominado por planos, crestas y valles de base angosta. Entre las calles Juan de Dios Rivera y Cruz la cubierta tiene un espesor medio de 120 m. Entre las calles Av. Los Carrera y Cochrane la potencia varía de 160 a 120 m, aproximadamente. El perfil **C-C'** coincide con la calle Lientur, situada al NE del área de estudio. La cubierta que yace sobre el basamento tiene una menor potencia y extensión que los perfiles anteriores. En esta sección, el basamento granítico aflora al noroeste de la falla del cerro La Pólvara. El espesor modelado de los depósitos no consolidados entre las calles Gutiérrez-Ejército, y Bulnes-Las Heras es de 100 m, cercano a la calle Freire alcanza los 110 m. En el sector SE del perfil, el basamento forma un relieve convexo de menor dimensión (Figura 3.4).

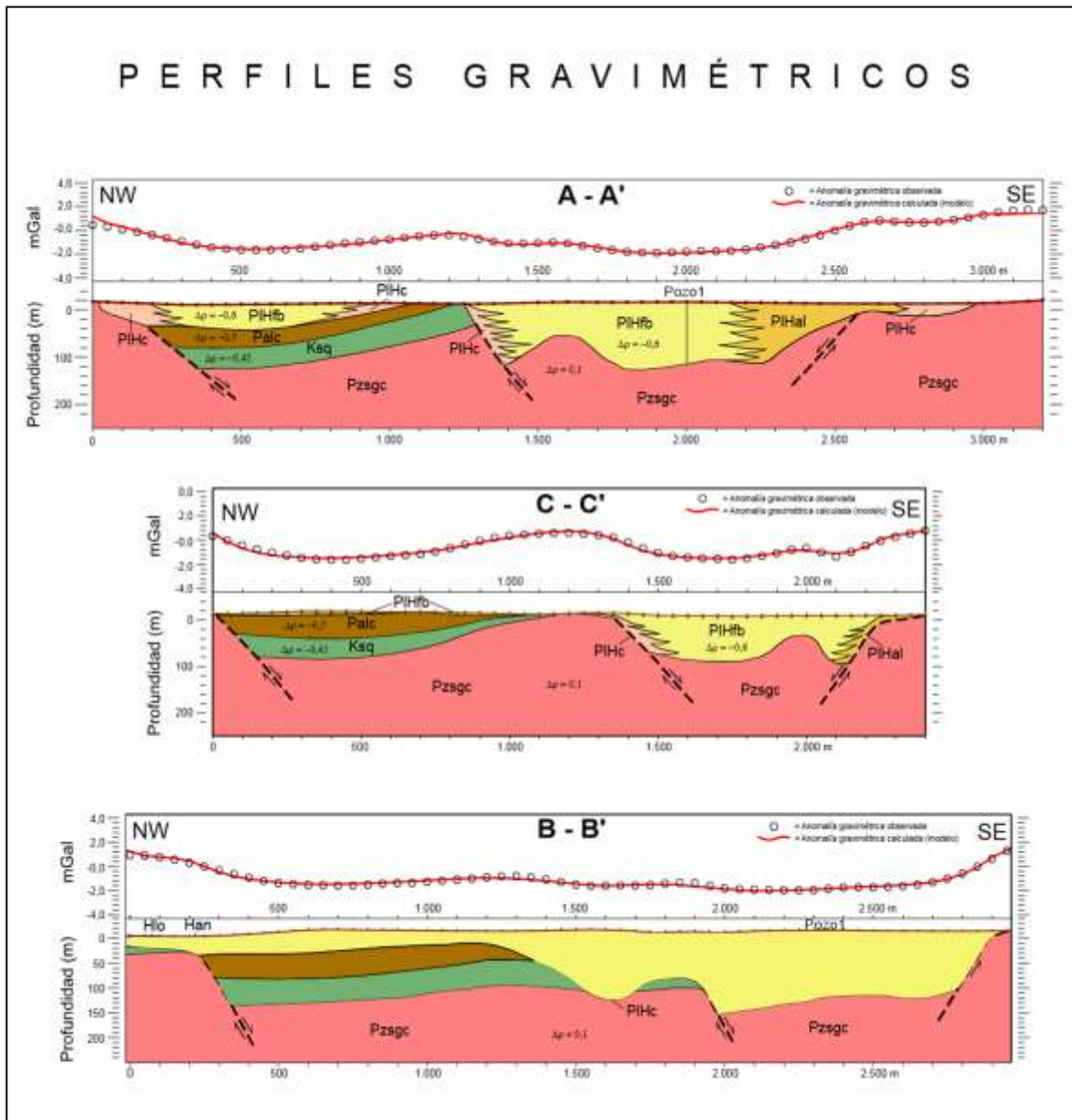


Figura 3.4: Perfiles gravimétricos del centro de la ciudad de Concepción. Colores y simbologías corresponden a los mismos presentados en el mapa de la Figura 3.2. Tomado de Vivallos *et al.* (2010)

3.4 Geofísica y sondajes

En este apartado se presentan los resultados de la exploración geotécnica solicitada por el servicio de salud de Concepción para la construcción del futuro edificio de oncología, donde actualmente se emplaza el ex hospital Traumatológico. Los ensayos realizados en dicha exploración relevantes para el presente estudio corresponden a:

- 1 sondaje rotatorio de 45 m de profundidad (S-1), con extracción de muestras cada 1 metro de profundidad.
- 1 sondaje rotatorio de 10 m de profundidad (S-2), con extracción de muestras cada 1 metro de profundidad.
- 1 sondaje rotatorio de 35 m de profundidad (S-3), con extracción de muestras cada 1 metro de profundidad.
- 2 calicatas de 3 m de profundidad mínima o hasta alcanzar el nivel freático. En cada calicata se realiza toma de muestras para ejecutar ensayos de terreno y de laboratorio.
- 2 calicatas de 5 m de profundidad mínima o hasta alcanzar el nivel freático. En cada calicata se realiza toma de muestras para ejecutar ensayos de terreno y de laboratorio.
- 2 ensayos de medición de ondas superficiales, para la determinación del perfil de velocidad de propagación de ondas de corte (V_s). El ensayo contempla la ejecución de arreglos lineales y bidimensionales para ser analizados mediante métodos SPAC y FK.



3.4.1 Sondajes de rotación

La ubicación de las prospecciones fue definida por la contraparte técnica del Servicio de Salud Concepción y su ubicación se muestra en la Figura 3.5 y Tabla 3.1. El modelo estratigráfico resultante de dichos ensayos se resume en las Tabla 3.2, 3.3 y 3.4.



Figura 3.5: Ubicación de sondajes.

Tabla 3.1: Profundidad y referencia de ubicación para sondajes.

Sondaje	Profundidad de sondaje (m)	Coordenada UTM este (m)	Coordenada UTM norte (m)
S-1	45	675115.00	5922788.00
S-2	10	675170.00	5922722.00
S-3	35	675118.00	5922731.00

Tabla 3.2: Modelo estratigráfico de sondaje S-1, de 45 metros de profundidad.

Horizonte	Tramo (m)	Espesor (m)	Descripción del material
H-1	0.0 – 2.1	2.1	Relleno artificial conformado por arena limosa, color café claro, con restos de escombros. Humedad media, plasticidad media a baja.
H-2	2.1 – 8.1	6.0	Limo arenoso y arcillas arenosas, color gris oscuro, sin presencia de materia orgánica, plasticidad media a alta, humedad alta, textura suave. Según USCS clasifica como MH, CH.
H-3	8.1 – 17.2	9.1	Arena limosa, color gris claro, plasticidad media a baja, nula cementación, humedad media a alta, estructura homogénea. Según USCS clasifica como SM, SP-SM, SW-SM.

Continúa en la página 45

.Continuación de la Tabla 3.2.

H-4	17.2 – 20	2.8	Arcilla de baja plasticidad, color gris oscuro, sin presencia de materia orgánica, humedad alta, cementación nula. Según USCS clasifica como CL.
H-5	20 – 25.7	5.7	Arena limosa y arena arcillosa, humedad media, estructura homogénea, cementación nula. Clasifica como SM y SC.
H-6	25.7 – 41.5	15.8	Maicillo cementado, en avanzado estado de meteorización, humedad baja, presenta granos de cuarzo y cementación moderada.
H-7	41.5 – 45.0	3.5	Roca granítica, color gris blancuzco.

Tabla 3.3: Modelo estratigráfico de sondaje S-2, de 10 metros de profundidad.

Horizonte	Profundidad límite (m)	Espesor (m)	Descripción del material
H-1	0.0 – 2.0	2.0	Relleno artificial, restos de escombros dispersos y maicillo.
H-2	2.0 – 10.0	8.0	Maicillo, arena limosa, arena arcillosa, color café claro, sin presencia de materia orgánica, plasticidad baja, estructura homogénea, textura áspera. Clasifica como SM y SC.

Tabla 3.4: Modelo estratigráfico de sondaje S-3, de 35 metros de profundidad.

Horizonte	Profundidad límite (m)	Espesor (m)	Descripción del material
H-1	0,0 – 2.0	2.0	Arena limosa (maicillos), color café claro, sin presencia de materia orgánica, Compacidad suelta, humedad alta, clasifica como SM.
H-2	2.0 – 5.1	3.1	Limo arenoso de baja plasticidad, color café claro, sin presencia de materia orgánica, humedad alta, textura suave, consistencia muy blanda. Según USCS clasifica como ML.
H-3	5.1 – 7.3	2.2	Arcilla arenosa de baja plasticidad, color gris verdoso, sin presencia de materia orgánica, humedad saturada, cementación nula. Según USCS clasifica como CL.
H-4	7.3 - 11.1	3.8	Arena limosa - limo arenoso, humedad saturada, color grisáceo, estructura homogénea, cementación nula, compacidad/consistencia densa. Clasifica como SM y ML.
H-5	11.1 – 15.9	4.8	Arena limosa, humedad saturada, color grisáceo, estructura homogénea, cementación nula. Clasifica como SM.

Continúa en la página 47

Continuación de la Tabla 3.4.

H-6	15.9 – 22.6	6.7	Maicillos, arena limosa, humedad alta, color café claro, estructura homogénea, cementación nula. Clasifica como SM.
H-7	22.6 – 31	8.4	Maicillos cementados, en avanzado estado de meteorización, humedad baja, sin presencia de materia orgánica.
H-8	31 – 35.0	4.0	Roca granítica, color gris blancuzco.

3.4.1.1 RQD (Rock quality design)

El índice RQD (Deere, 1963), corresponde a una medición cuantitativa de la calidad de la roca, estimada en base al porcentaje de recuperación del material, durante la ejecución de un sondaje, que se representa por la sumatoria de longitudes de testigos recuperados de más de 10 cm de largo (en su eje), en función de la longitud total explorada en el tramo. Matemáticamente queda representada como:

$$RQD (\%) = \frac{\sum \text{longitud de testigos} > 10 \text{ cm}}{\text{longitud explorada}} \times 100$$

Deere propuso la relación entre el valor numérico del RQD y la calidad de la roca, desde el punto de vista ingenieril, como muestra la tabla 3.5.

Tabla 3.5: Índice de calidad de la roca (Deere, 1963).

RQD	Calidad de roca
< 25%	Muy mala
25 % - 50 %	Mala
50 % - 70 %	Regular
75 % - 90 %	Buena
90 % - 100 %	Excelente

La Tabla 3.6 resume los resultados del cálculo del RQD ensayados en ambos sondajes. De acuerdo con este índice observamos que la calidad de roca se encuentra mayormente en el tramo regular a buena.

**Tabla 3.6:** Resultados de ensayos RQD.

Sondaje	Prof. Ensayo (m)	Recuperación (cm)				RQD	
		L1	L2	L3	L4	Σ (m)	%
S-1	41.5 – 43.0	29	29	14	19	0.91	61
	43.0 – 44.5	15	17	62	-	0.94	63
S-3	31.0 – 32.5	38	28	15	-	0.81	54
	32.5 – 34.0	25	45	-	-	0.70	47
	34.0 – 35.0	100	-	-	-	1	100

3.4.1.2 Nivel freático en sondajes

A la fecha de ejecución de la exploración se registró el nivel freático en todos los sondajes. Sin embargo, se debe señalar que el control realizado, es representativo exclusivamente de la fecha en la cual fue realizado (Tabla 3.7).

Tabla 3.7: Nivel freático identificado en sondajes.

Sondaje	Prof. de Sondaje (m)	Prof. de Nivel Freático (m)	Fecha de Control
S-1	45	2.30	16-03-2020
S-2	10	6.60	16-03-2020
S-3	35	1.50	16-03-2020

3.4.2 Calicatas

En terreno se materializaron 4 calicatas (2 calicatas de 3 m y 2 calicatas de 5 m de profundidad) en aquellas zonas donde no se detectó nivel freático. La ubicación fue planificada y definida por la contraparte técnica del Servicio de Salud Concepción.

Se muestra a continuación el detalle con la profundidad, referencia geodésica y ubicación en planta de las calicatas Tabla 3.8 y Figura 3.6. Cabe destacar que en calicatas C-1 y C-2, no fue posible alcanzar 3 m de profundidad, debido a la presencia de nivel freático. El modelo estratigráfico resultante de dichos ensayos se resume en las Tablas 3.9 y 3.10.

Tabla 3.8: Profundidad y referencia de calicatas.

Calicata	Profundidad de calicata (m)	Coordenada UTM este (m)	Coordenada UTM norte (m)
C-1	1.90	675099.00	5922747.00
C-2	1.90	675102.00	5922735.00
C-3	5.0	675171.00	5922767.00
C-4	5.0	675149.00	5922725.00

**Figura 3.6:** Ubicación referencial de calicatas.

Tabla 3.9: Modelo estratigráfico calicatas de 3 m (C-1 y C-2).

Horizonte	Profundidad límite (m)	Espesor (m)	Descripción del material
H-1	0.0 – 0.2	0.2	Relleno artificial
H-2	0.2 – 0.65	0.45	Maicillo, arena limosa, color café anaranjado, fino de plasticidad media a baja. Compacidad media a suelta.
H-3	0.65 – 0.90	0.25	Relleno artificial, conformado por arena limosa, color café oscuro, con presencia de trozos de ladrillo y hormigón, humedad alta, compacidad suelta.
H-4	0.90 – 1.90	1.00	Arena limosa, color café claro, humedad alta, compacidad suelta, plasticidad baja a nula. Según USCS clasifican como SM.

Tabla 3.10: Modelo estratigráfico calicatas de 5 m (C-3 y C-4).

Horizonte	Profundidad límite (m)	Espesor (m)	Descripción del material
H-1	0 – 0.2	0.2	Base granular

Continúa en la página 52.

Continuación de la Tabla 3.10.

H-2	0.2 – 1.2	1.0	Maicillo, arena media a fina limosa, color café claro, sin presencia de materia orgánica, plasticidad baja a nula, humedad baja, estructura homogénea, compacidad media, cementación media a baja. Según USCS clasifica como SM.
H-3	1.2 – 5.0	3.8	Maicillo, arena media a fina limosa, color café claro, sin presencia de materia orgánica, plasticidad baja a nula, humedad baja, estructura homogénea, compacidad media a densa, cementación media a baja, textura áspera. Según USCS clasifica como SM.

3.4.2.1 Nivel freático en calicatas

A la fecha de ejecución de la exploración se registró el nivel freático en todas las calicatas.

Sin embargo, se debe señalar que el control realizado, es representativo exclusivamente de la fecha en la cual fue realizado (Tabla 3.11).

Tabla 3.11: Nivel freático en calicatas.

Calicata	Prof. de Sondaje (m)	Prof. de Nivel Freático (m)
C-1	1.9	1.90
C-2	1.9	1.90
C-3	5.0	-
C-4	5.0	-

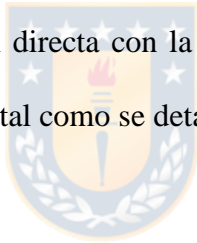
3.4.3 Velocidad de ondas superficiales

La medición de ondas superficiales mediante ensayos de tipo SPAC y FK, realizados en distintos puntos del terreno en estudio, permitió identificar con mayor detalle la variación estratigráfica superficial del subsuelo. La información de los sondajes muestra la presencia de horizontes de menor competencia que aumentan en espesor, desde el fondo del sitio en dirección a la Avda. Roosevelt. A partir de esta información, se definió una campaña de exploración geofísica que permitiera observar, analizar y confirmar dichos contrastes, ubicando un ensayo en el fondo del sitio (E-1, zona competente), cercano al talud y otro en el acceso al sitio (E-2, zona de menor competencia superficial). La ubicación y disposición de estos perfiles se muestran en la Figura 3.7.



Figura 3.7: Ubicación de los arreglos de los ensayos geofísicos.

Foti *et al.* (2015), indican que la profundidad máxima de exploración puede ser aproximada a la mitad de la longitud de onda máxima medida ($\frac{\lambda_{m\acute{a}x}}{2}$), es por esto por lo que la inversión de los perfiles de velocidad de ambos ensayos se extendió hasta 50 m de profundidad, con la finalidad de identificar el notorio aumento de la velocidad, a la cual se registra la roca granítica en sondajes (Figura 3.8). Para el ensayo E-1, se observa un notorio aumento de velocidad a partir de 21 m de profundidad aproximadamente, mientras que para el ensayo E-2, el contraste de velocidad se detecta a 42.2 m de profundidad, siendo completamente compatible con lo detectado en el sondaje S-1. Los perfiles de velocidad de ambas mediciones fueron verificados y validados, con mediciones de la frecuencia fundamental de vibración del suelo y la comparación directa con la función de transferencia obtenida del perfil de velocidad de ondas de corte, tal como se detalla en el cuerpo del estudio.



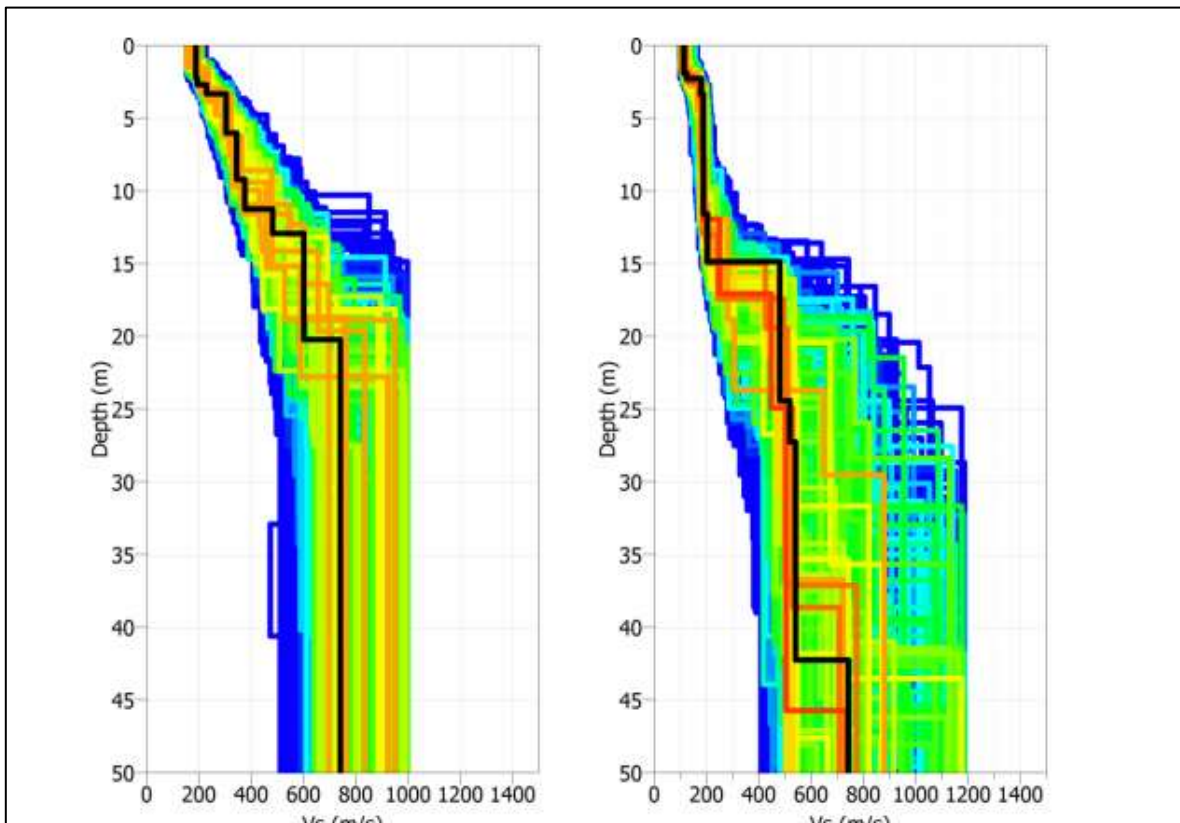


Figura 3.8: Gráficos de velocidades vs profundidad hasta 50 m de los ensayos E-1 (izquierda) y E-2 (derecha).

En función del análisis y resultados presentados, se generan 2 esquemas representativos con perfiles transversales de velocidad de ondas de corte, cuya ubicación se muestra en la Figura 3.9. Estos permiten observar de manera estimada que los estratos detectados no poseen una conformación homogénea, sino que poseen distintas inclinaciones dentro del sitio, encontrándose los estratos de mayor competencia (mayor velocidad), a mayor profundidad en la zona frontal del terreno (Figura 3.10).



Figura 3.9: Ubicación y orientación de perfiles de velocidad.

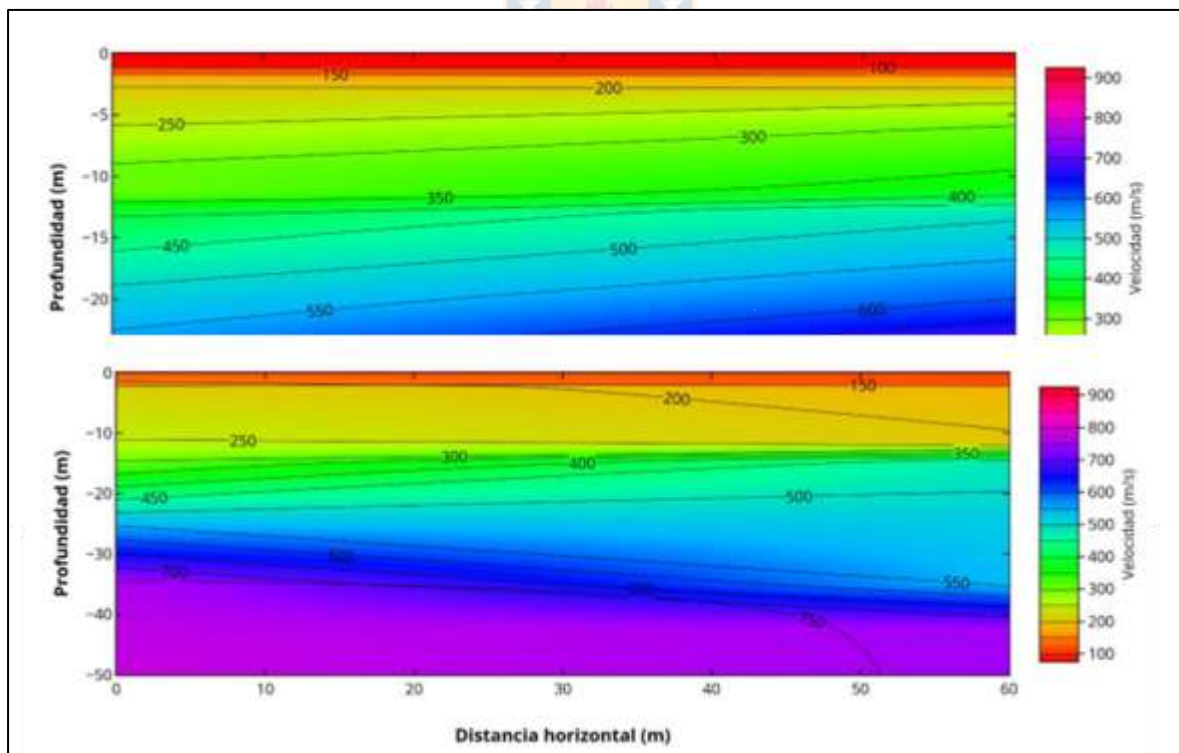


Figura 3.10: Perfiles de velocidad interpretados a partir de E-1 y E-2. P-1 (arriba) y P-2 (abajo).

3.4.4 Resultados

De los antecedentes obtenidos en terreno, producto de la exploración geotécnica, es posible destacar los siguientes aspectos:

El terreno en estudio posee una conformación estratigráfica de estratos no horizontales, granulométricamente heterogéneos, presentándose arenas, limos y arcillas. El estrato de mayor competencia geotécnica, descrito como “maicillo” (material residual derivado de la meteorización de roca granítica), se profundiza desde el fondo del sitio en dirección a Avda. Roosevelt, siendo detectado aproximadamente a 20 m de profundidad en el sondaje S-1 y 2 m de profundidad en sondaje S-2, lo cual confirma la inclinación o pendiente que presenta este estrato. Como se indicó anteriormente en el ítem de geología, esta disposición corresponde al contacto entre depósitos coluviales y rocas intrusivas del batolito costero. El perfil gravimétrico presentado en el apartado de geología estructural, indica que el estrato de depósitos sedimentarios podría tener espesores del orden de 20 m, lo que es bastante similar a lo observado en terreno mediante las prospecciones. Por otro lado, la campaña de exploración geofísica permite volver a confirmar estos antecedentes, validando los contrastes de impedancia (profundidad a la roca), perfiles de velocidad de ondas de corte y mediciones de periodo fundamental del suelo, demostrando que el suelo de mayor rigidez (mayor velocidad), se encuentra inclinado y se detecta a mayor profundidad en la zona frontal del edificio existente. Las mediciones de periodo fundamental del suelo muestran un comportamiento similar bajo gran parte de la planta del edificio, con valores del orden de 0.3 s, en contraste con la medición del fondo del sitio que indica un periodo de 0.16 s. Se atribuye esta variación a la presencia de los estratos blandos no consolidados que se distribuyen de

manera heterogénea en espesor, dentro del terreno. Las observaciones anteriormente realizadas se ilustran en la Figura 3.11.

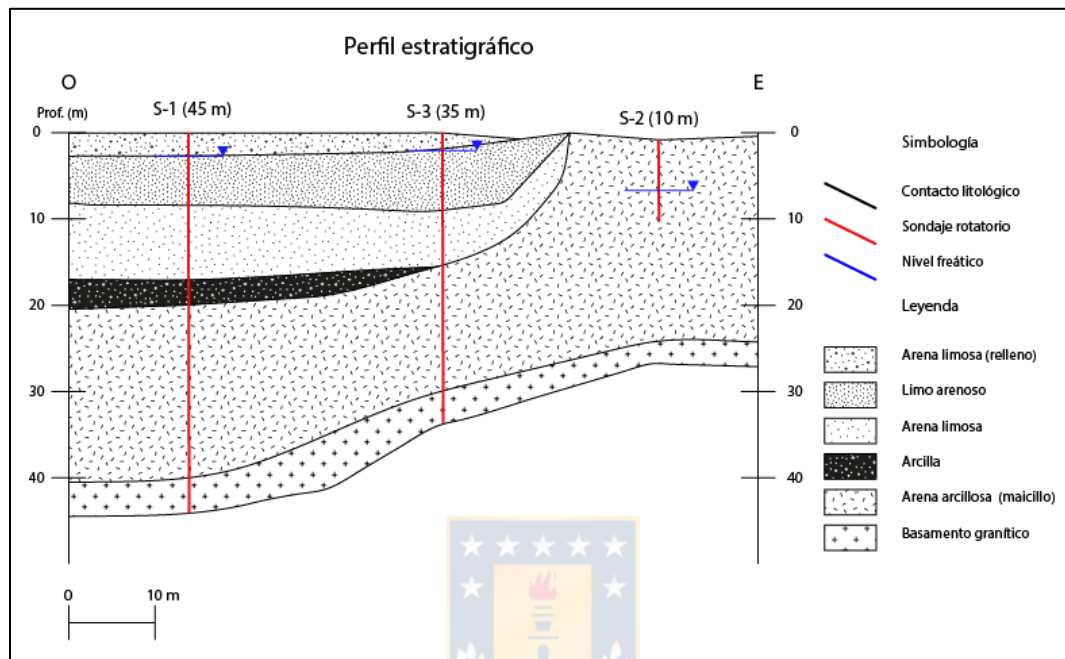


Figura 3.11: Perfil estratigráfico del terreno del ex hospital traumatológico. Interpretación realizada en base a sondajes, calicatas y ensayos geofísicos.

4 HIDROLOGÍA

En este capítulo se presentan los antecedentes hidrológicos del área de estudio con el objetivo de entender el comportamiento del agua dentro del sistema durante un año hídrico. Para dicho análisis se establecen límites físicos que, en base a topografía del terreno y la distribución de las redes de drenaje superficial, constituyen una cuenca hidrológica. Dicha delimitación es realizada a partir del análisis del modelo de elevación digital facilitado por la administración nacional de aeronáutica y espacio (NASA) y la agencia nacional de inteligencia geoespacial (NGA) de los EE. UU.), por medio del software libre QGIS en su versión 3.8.2 (Figura 4.1). La microcuenca analizada posee una extensión superficial de 9 km², y su elevación y pendiente media es de 71 m s.n.m. y 15% respectivamente. Esta cuenca tiene una forma elongada, con su eje mayor orientado en dirección NNO-SSE. El régimen hídrico es netamente pluvial, con un promedio cercano a los 1200 mm de precipitación anual. Esta cuenca posee dos zonas claramente diferenciables en base a su geomorfología y uso de suelo. La primera zona, ubicada al norte, corresponde a una terraza fluvial, de muy baja pendiente (inferior al 10%), donde se asienta la ciudad de Concepción. La segunda zona, ubicada al sur, abarca la cordillera de la costa con mayores elevaciones y pendientes; ahí el principal uso de suelo es forestal. Dentro de la cuenca no existen redes de drenaje natural activas, sin embargo, el análisis del modelo de elevación muestra un curso principal, que nace en el cordón montañoso, se dirige al norte, y luego gira hacia el este, donde desagua hacia el río Andalién. Antecedentes históricos mencionan la existencia de antiguos cursos que tenían un comportamiento similar, y la red de alcantarillados que se extiende en esta zona también se

distribuye siguiendo esta tendencia topográfica. Los principales rasgos de esta cuenca son resumidos en la Tabla 4.1.

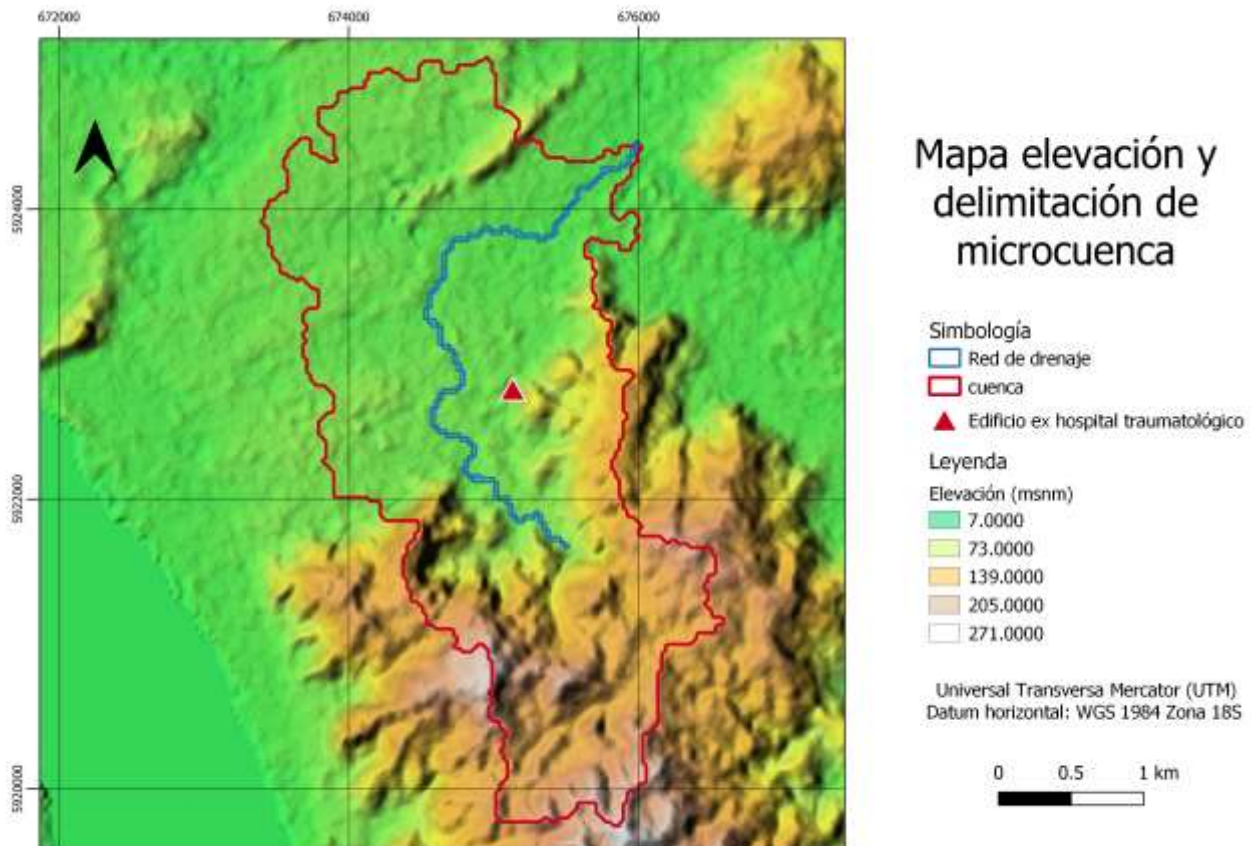


Figura 4.1: Modelo de elevación digital de la cuenca estudiada (USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global). Delimitación de cuenca trazado con algoritmo 'r.watershed', a través de la plataforma de GRASS en QGIS 3.8.2. Elaboración propia.

Tabla 4.1: Caracterización de la cuenca hidrológica en estudio.

Área (km ²)	Elevación media (m s.n.m.)	Pendiente media (%)	Orientación general	Régimen hidrológico	Pp media anual (mm)	Uso de suelo
9	71	15	NNO-SSE	Pluvial	1200	Urbano- forestal

4.1.1 Hidrología superficial

En este apartado se resumen las características de los principales cuerpos de agua que se encuentran dentro del área de estudio, detallando las características relevantes para la confección del modelo conceptual de la cuenca.

4.1.1.1 Río Biobío

La cuenca del Río Biobío se encuentra situada entre las latitudes 36°48,2' – 38°21,5'. Se extiende desde la Cordillera de los Andes hacia el Océano Pacífico sur con una orientación aproximada SE-SO abarcando una superficie estimada de 24.371 km², que corresponde a un 3% de la superficie continental del país (DGA, 1987). El río Biobío nace en la Cordillera de los Andes, en los lagos Galletué e Icalma (Región de la Araucanía) a 1.160 m s.n.m. y en su recorrido de cerca de 380 km recibe numerosos afluentes, entre los cuales se destacan los ríos Ranquil, Lonquimay, Villucura, Lolco, Huequecura, Duqueco, Bureo, Laja y Vergara. Dentro del área de estudio se desarrolla la zona baja del río Biobío, donde éste desemboca al oeste de la ciudad de Concepción, en el extremo norte del golfo de Arauco. En esta zona, el

río Biobío posee un régimen pluvial, donde registra precipitación media anual de 1.200 mm, con la ocurrencia de escurrimientos e inundaciones periódicas en varios sectores ribereños la cuenca. Cabe destacar, que su régimen es marcadamente estacional, con un caudal máximo medio de 1.600 m³/s en invierno y un caudal medio mínimo de 200 m³/s en verano, mientras que su caudal medio anual fluctúa entre los 731 y 1.024 m³/s (Parra, 1996). Sedimentológicamente, el curso inferior del río Biobío está caracterizado por un amplio del cauce con baja pendiente y, por lo tanto, una baja capacidad de transporte de material detrítico. Producto de lo anterior, en temporadas secas se observa gran cantidad de depósitos no consolidados que rellenan el cauce del río, cuyo trazado es meandriforme y anastomosado. Dichos sedimentos de la parta baja del río Biobío se caracterizan por su homogeneidad y por estar constituidos, principalmente, por arenas gruesas, con excesos de partículas finas y ausencia de material transportado por el mecanismo de suspensión (Cisternas, 1993).

4.1.1.2 Río Andalién

El río Andalién es el cauce de mayor extensión y relevancia en el interfluvio Itata-Bío Bío. Nace al norte de la región del Biobío, de la unión entre los esteros Poñén y Curapalihue, y se extiende hacia el oeste para desembocar en la bahía de Concepción, al norte de dicha ciudad. Su cuenca cubre 780 km² de superficie y 36 km de longitud. Dentro del área de estudio, el río Andalién se desarrolla en amplias llanuras y terrazas de bajas pendientes, inferiores al 0.5%. Dentro de este sector, la red de drenaje exhibe una morfología meandriforme, que en su porción final se ensancha en un estuario con numerosos canales. Dicho estuario de desarrolla abarcando la llanura de inundación del río, donde se constituyen además marismas y humedales. El río Andalién posee un régimen netamente pluvial, con un promedio anual

de 1.200 mm de precipitación, y que en invierno registra importantes subidas que a veces devienen en desbordes e inundaciones. Sedimentológicamente, este río se caracteriza por transportar material erosionado de los cordones montañosos de la cordillera de la costa, donde en su porción terminal, que se desarrolla dentro del área de estudio, se encuentra ampliamente representado por arenas finas con limos y arcillas, de coloración castaño amarillento, dispuestas en capas que alcanzan los 3 m de potencia.

4.1.1.3 Lagunas y humedales

En la porción terminal de la cuenca hidrográfica del río Biobío, se emplazan 7 cuerpos de aguas continentales, de las cuales 2 se encuentran ubicadas en San Pedro (Laguna Grande y laguna Chica), y 5 en la ciudad de Concepción, (las lagunas: Redonda, Tres Pascualas, Lo Galindo, Lo Méndez y Lo Custodio). Se registra además la existencia de otras lagunas que actualmente se encuentran rellenas: las lagunas Los Negros y Gavilán, que se ubicaban en el sector norte del centro de la ciudad. El origen de las lagunas se encuentra ligado a antiguos cauces del río Biobío, cuyos drenajes han sido bloqueados por diversos procesos, desde eólicos hasta tectónicos. A continuación, se detallan brevemente las principales características de las 5 lagunas encontradas en la ciudad de Concepción, y que forman parte del sistema hidrogeológico que es analizado en el presente estudio.

4.1.1.3.1 Laguna Redonda

La laguna Redonda es de forma circular y se encuentra aproximadamente a 1 km del río Biobío (36° 48' 50" S, 73° 02' 40" W), al oeste de la serranía baja que se extiende entre el cerro Chepe y los cerros situados al noroeste de la laguna Lo Galindo, en el sector de Lorenzo Arenas. Tiene una superficie de 41.000 m², con una profundidad máxima de 19 m y un

volumen de 374.000 m³. Actúa como cuerpo receptor de aguas lluvias, pero solo recibe los aportes de dos pequeñas descargas que drenan parte del sector Tucapel - Laguna Redonda. Esta laguna no posee ningún desagüe. Por ser la más profunda es la única laguna que presenta estratificación térmica en primavera y verano. De edad cercana a los 7.000 años, su origen es considerado tectónico (Parra, 2009).

4.1.1.3.2 Laguna Tres Pascualas

Se localiza junto al Cerro Isla de la Pólvora (36°48'50'' S, 73°02'30'' W). Es la laguna de mayor tamaño, posee forma arriñonada. En sus riberas se ubica un área verde que colinda con la avenida Paicaví y también la casa central de la Universidad San Sebastián. El origen del nombre está ligado a una leyenda. "Las Tres Pascualas". Esta laguna registra una superficie de 58.950 m², con una profundidad máxima de 8 m y un volumen de 300.135 m³. Gracias a su ubicación, actúa como cuerpo receptor de aguas lluvias, recibiendo los aportes de los colectores 5 y 32, que drenan parte del sector centro - oriente de Concepción. Esta laguna posee además un desagüe que llega al colector 86, el cual llega a través del colector 17 al canal Las Pocitas. El origen de esta laguna es fluvial, considerado un meandro abandonado de un cauce antiguo del río Biobío, con una edad de formación aproximada de 6.400-8.000 años (Parra, 2009). Aunque es posible que también corresponda a un antiguo curso del río Andalién, como sugieren mapas del siglo XIX de la ciudad de Concepción.

4.1.1.3.3 Laguna Lo Méndez

Está situada en el límite norte de la ciudad de Concepción (36°48'03'' S, 73°03'03''W), en sector Barrio Norte, en un sector aledaño a la Av. Alonso de Rivera. Se extiende sobre el valle perpendicular a la serranía baja que se extiende entre el cerro Chepe y los cerros situados

al noroeste de la laguna Lo Galindo. Esta laguna tiene una superficie de 52.000 m², con una profundidad máxima de 6,41 m y un volumen embalsado de 87.000 m³. Es de forma circular-ovalada con un diámetro medio aproximado de 400 m. Actúa como cuerpo receptor de aguas lluvias, recibiendo aguas provenientes del colector 75 y aportes provenientes del sector Santa Sabina. Además, forma un sistema con la laguna Lo Galindo, con la cual se encuentra unida a través de un desagüe natural, que actualmente se encuentra artificialmente canalizado (colector 130). Su origen se asocia a canales antiguos del río Biobío que han sido bloqueados por depósitos eólicos hace 6.400 – 8.000 años, mismo proceso al que se encuentran ligadas las 2 lagunas que se describen a continuación.

4.1.1.3.4 Laguna Lo Galindo

Esta laguna se encuentra ubicada en las faldas del cerro la Pólvora (36°48'01'' S, 73°02'31''W), tiene una superficie de 40.000 m², con una profundidad máxima de 3 m y un volumen de 55.000 m³. La laguna Lo Galindo descarga en un colector que termina en el río Andalién. Este colector también recoge aguas lluvias que llegan a la laguna Lo Custodio y las descargadas durante su trayecto entre la laguna y el río Andalién. En la actualidad es además a un espacio de esparcimiento.

4.1.1.3.5 Laguna Lo Custodio

Esta laguna se localiza en las cercanías del cerro La Pólvora (36°48'26''S, 73°02'29''W). Con respecto a las otras lagunas urbanas, es la de menor tamaño, con una superficie de 3,4 ha y 80 m de largo, de forma pseudo- circular y una profundidad máxima inferior a 1,5 m, es la única laguna que posee un fondo arenoso. Actúa como cuerpo receptor de aguas lluvias,

pero solo recibe los aportes de un pequeño colector. Esta laguna posee un desagüe conectado a través del colector 71 a la laguna Lo Galindo.

4.1.1.4 Cursos antiguos

Registros históricos de la ciudad de Concepción relatan la presencia de numerosos cursos de aguas que han desaparecido por el avance del desarrollo urbano y otras actividades antrópicas. De relevancia para este estudio es un antiguo curso llamado estero ‘Las Pocitas’, cuyo cauce fluía desde la quebrada donde actualmente se emplaza el Barrio Universitario, desde donde se desviaba hacia el noreste, bordeando el cerro Lo Pequeño en dirección al río Andalién donde desembocaba. En torno a este cauce se encontraban extensas vegas y humedales, que en períodos invernales se encontraban usualmente inundados. Actualmente este cauce se encuentra intervenido y corresponde a un canal de desagüe de aguas lluvias (canal ‘Las Pocitas’).

4.1.2 Balance hídrico

Con el objetivo de estimar la **recarga** se realiza un balance hídrico, que es un método aplica el principio de conservación de la masa dentro de un sistema (aunque en este caso se calcula en volumen ya que la densidad de agua se puede considerar constante). Este balance contempla un dominio espacial (unidades hidrográficas e hidrogeológicas) y temporal (variables que representan un período de largo plazo). El principio general del balance queda expresado en la siguiente ecuación:

$$\textit{Entradas} = \textit{Salidas} \pm \Delta\textit{Almacenamiento}$$

Siendo:

$$\textit{Entradas} = \textit{Precipitación} + \textit{agua de otras cuencas}$$

$$\textit{Salidas} = \textit{ET} + \textit{Esc. Superficial} + \textit{Recarga} + \textit{aguas a otras cuencas}$$

Donde ET es la suma del agua evaporada más el agua transpirada por las plantas (evapotranspiración).

La distribución de las divisorias de agua y su naturaleza impermeable, determinada a partir de la geología del basamento cristalino, permite considerar la cuenca bajo análisis como un sistema cerrado, por lo que la interacción con otras cuencas no es tomada en cuenta. Así el balance resulta:

$$\textit{Precipitación} = \textit{ET} + \textit{Esc. Superficial} + \textit{Recarga} \pm \Delta\textit{Almacenamiento}$$

El término $\Delta\textit{Almacenamiento}$ considera la variación del volumen de agua almacenado dentro de la cuenca durante el año hidrológico. Sin embargo, si el análisis abarca un período de muchos años (en general, más de 20 años), es posible simplificar la expresión del balance así:

$$\textit{Precipitación} = \textit{ET} + \textit{Esc. Superficial} + \textit{Recarga}$$

La metodología presentada los siguientes subcapítulos utiliza herramientas de análisis geoespacial para el cálculo de los términos que componen el balance hídrico, donde datos de precipitación, uso de suelo, tipo de suelo, entre otros; se representan en modelos digitales tipo mosaico o ráster. Esta aproximación permite que los cálculos hechos, y los resultados obtenidos, sean realizados para un píxel o cuadrángulo dentro del área de estudio, otorgando resolución espacial a los datos y por lo tanto haciendo que estos sean más precisos. La

exactitud del modelo realizado depende directamente de la calidad de las mediciones utilizadas que, en ese caso, corresponden a datos de acceso público encontrados en línea; por lo que no es posible garantizar un cálculo totalmente ajustado a la realidad. Sin embargo, esta primera aproximación es de gran utilidad en miras a etapas de terreno de mayor exactitud, pero que requieren un costo significativamente mayor de inversión.

4.1.2.1 Precipitación

De todos los elementos de la ecuación de balance hídrico, la precipitación es la que es más fácil de obtener de manera directa por medio de mediciones en terreno. Los datos de pluviometría utilizados en este apartado son obtenidos de la página <https://www.worldclim.org>, que facilita un ráster a escala mundial (con resolución de 30 segundos por píxel) de datos de precipitación y temperaturas (entre otros) a partir de registros del año 1970 al 2000. Estas mediciones se presentan en forma de promedio **mensuales** en archivos ráster independientes. Éstos valores son resumidos en la Figura 4.2, y los cálculos posteriores consideran a su vez **estos promedios**, para obtener un balance del año hidrológico. El valor de precipitación anual utilizado para el balance es de **1.122** milímetros.

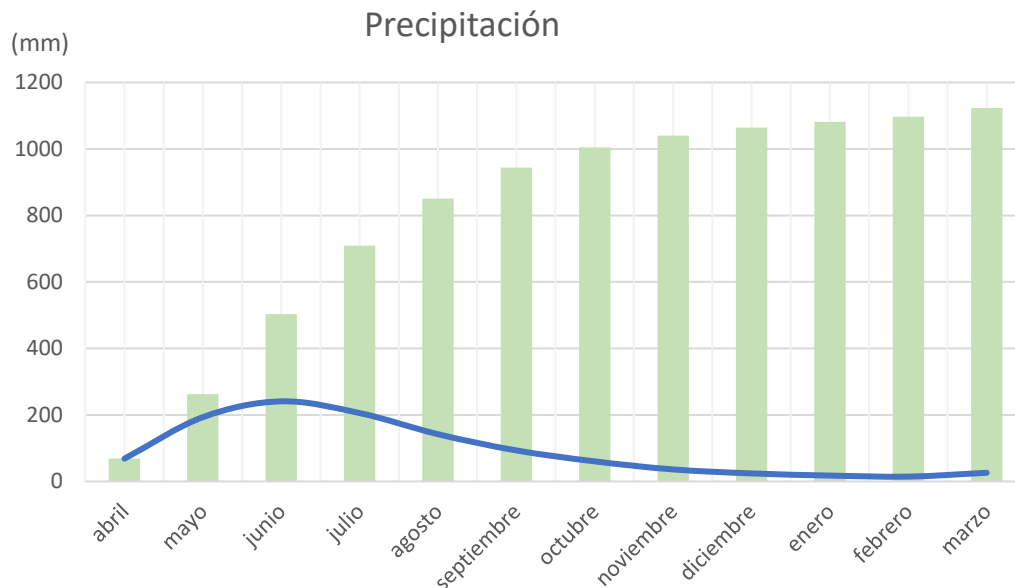


Figura 4.2: Gráfico de precipitación anual (en mm) de la ciudad de Concepción. En azul, curva con valores de precipitación mensual; en verde, columnas con cantidades acumuladas. Datos extraídos de modelos ráster mundiales de precipitación, con información desde 1970 al 2000, obtenidos de la base de datos *WorldClim* (<https://www.worldclim.org>). Valores mensuales corresponden a promedio de cada ráster.

4.1.2.2 Escorrentía superficial

Luego de determinar la cantidad de agua caída sobre la superficie de la cuenca, es necesario calcular cuánto de esa agua ha generado escorrentía directa. El método empleado para esto se denomina método del número de curva, formulado y empleado por el servicio nacional de conservación de recursos naturales de EE. UU. (*National Resources Conservation Service, NRCS*).

Este método, establecido de manera empírica por Mockus (1964), utiliza datos de tipo de suelo y cobertura de suelo para separar la fracción de la precipitación que genera escorrentía directa (de aquí en adelante llamada precipitación efectiva, P_e) de la que no genera escorrentía

(que es retenida en la superficie o se infiltra a través del suelo para luego evaporarse o llegar a la escorrentía subterránea, como muestra la Figura 4.3). Este volumen de agua precipitada, que no genera escorrentía superficial, se denomina abstracción.

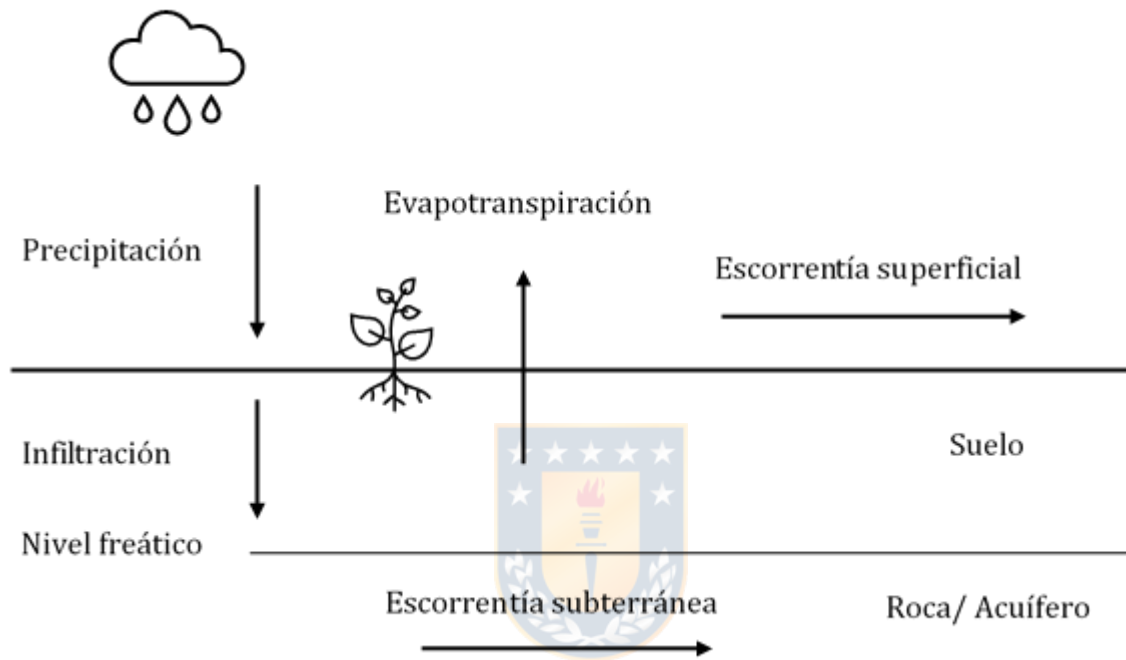


Figura 4.3: Esquema conceptual del ciclo hidrológico. Elaboración propia.

Parte de estas abstracciones es aquella que se infiltra de manera inmediata hacia el suelo, denominada abstracción inicial (I_a). La otra fracción de las abstracciones es la retención (F_a), que ocurre simultáneamente a la escorrentía. Se ha establecido de manera empírica que la abstracción inicial corresponde al 20% de la máxima abstracción posible (S). La relación de estas variables se puede ver representada en el a Figura 4.4.

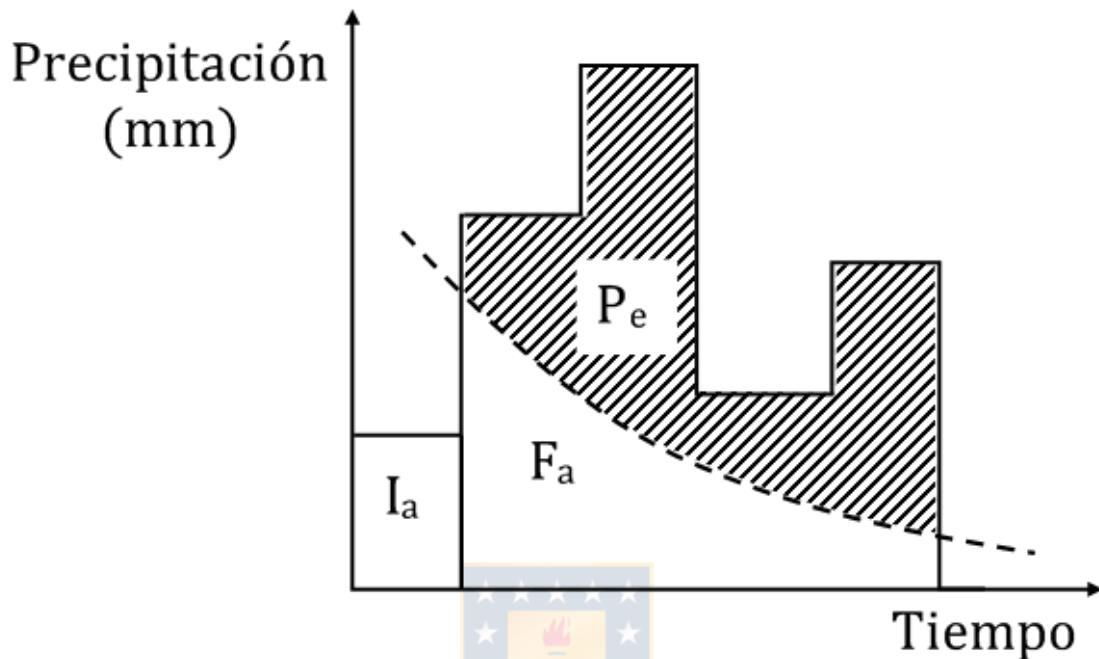


Figura 4.4: Hietograma esquemático que representa la relación entre Precipitación total, precipitación efectiva o escorrentía superficial (P_e), abstracción inicial (I_a) y retención (F_a). El volumen de las abstracciones va disminuyendo con el tiempo, dada la reducción de la capacidad de infiltración del suelo. Tras la abstracción inicial, la fracción de precipitación efectiva aumenta progresivamente.

La hipótesis fundamental del método es la validez de la idea que sugiere que, si durante el transcurso de una precipitación, la retención alcanza un 30% del máximo de abstracción posible, entonces el volumen de escorrentía corresponderá al 30% de la precipitación caída (ecuación 1).

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad \text{ecuación (1)}$$

Despejando P_e en (1), se obtiene:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{S + (P - I_a)} \quad \text{ecuación (2)}$$

Además, el método considera, a partir de observaciones empíricas, que la abstracción inicial corresponde a un 20% de la abstracción máxima posible:

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad \text{ecuación (3)}$$

La máxima abstracción posible (S) se relaciona con el tipo de suelo y su cobertura respectiva mediante el número de curva (CN). CN tiene un rango entre 0 y 100, y se relaciona de manera matemática según la siguiente expresión:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \text{ [mm]} \quad \text{ecuación (4)}$$

Soluciones para las ecuaciones (3) y (4) son graficadas en la Figura 4.5, para un rango de distintos números de curva y precipitación.

A superficies impermeables o cuerpos de agua, les corresponde un CN igual a 100, puesto que toda la precipitación caída se transformará en escorrentía. Así, para la mayoría de las superficies naturales el CN es inferior a 100 ya que en estas será sustraída parte de la precipitación, pasando a formar parte de las abstracciones. Los factores principales que determinan el CN son el grupo hidrológico del suelo (tipo de suelo) y la cobertura (uso de

suelo). La Tabla 4.2 muestra la combinación de estos dos factores y su respectivo número de curva.

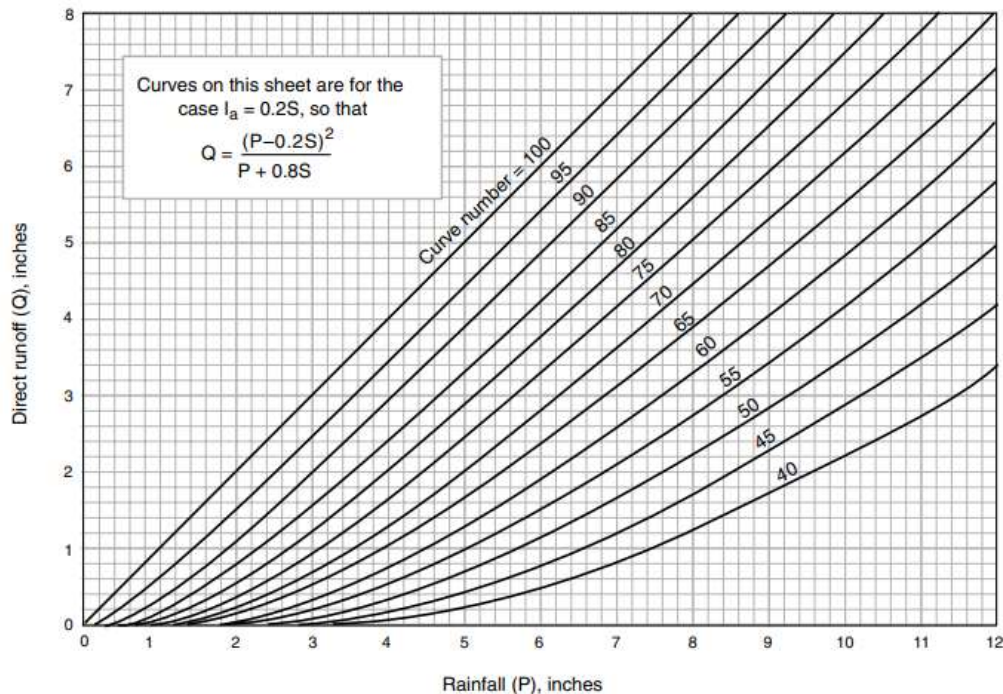


Figura 4.5: Solución de la ecuación de precipitación neta (escorrentía). Tomado de Cronshey (1986).

El tipo de suelo corresponde a una clasificación textural que divide los suelos en cuatro categorías o grupos hidrológicos (A, B, C y D; del más permeable al más impermeable) según sus porcentajes de arcilla, limo y arena. Los datos de granulometría utilizados en ese trabajo son obtenidos del estudio agrológico para la VIII región realizado por el centro de información de recursos naturales (CIREN, 1999). A partir de la información textural de los suelos, y su respectiva distribución espacial, fueron definidos dos series de suelo dentro de la microcuenca analizada: Series San Esteban y Curanipe (Figura 4.6).

Tabla 4.2: Número de curva en función del grupo hidrológico del suelo y uso de suelo. Tomado de Chow (1994).

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada ¹ : sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,	45	66	77	83
cubierta buena ²	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.				
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial ³ :				
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable ⁴			
1/8 acre o menos	65	77	85	90
1/4 acre	38	61	75	83
1/3 acre	30	57	72	81
1/2 acre	25	54	70	80
1 acre	20	51	68	79
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. ³	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados ⁵	98	98	98	98
grava	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

La clasificación del suelo sigue la metodología indicada por el manual de muestreo de suelos de la USDA (*Soil Survey Manual, SSM*), que permite asignar cada tipo textural a un determinado grupo hidrológico según su posición dentro del triángulo arena – arcilla – limo

(Soil Survey Staff, 1993), como se observa en la Figura 4.7, que incluye los datos de las series de suelo del área de estudio, cuyas características se resumen en la Tabla 4.3.

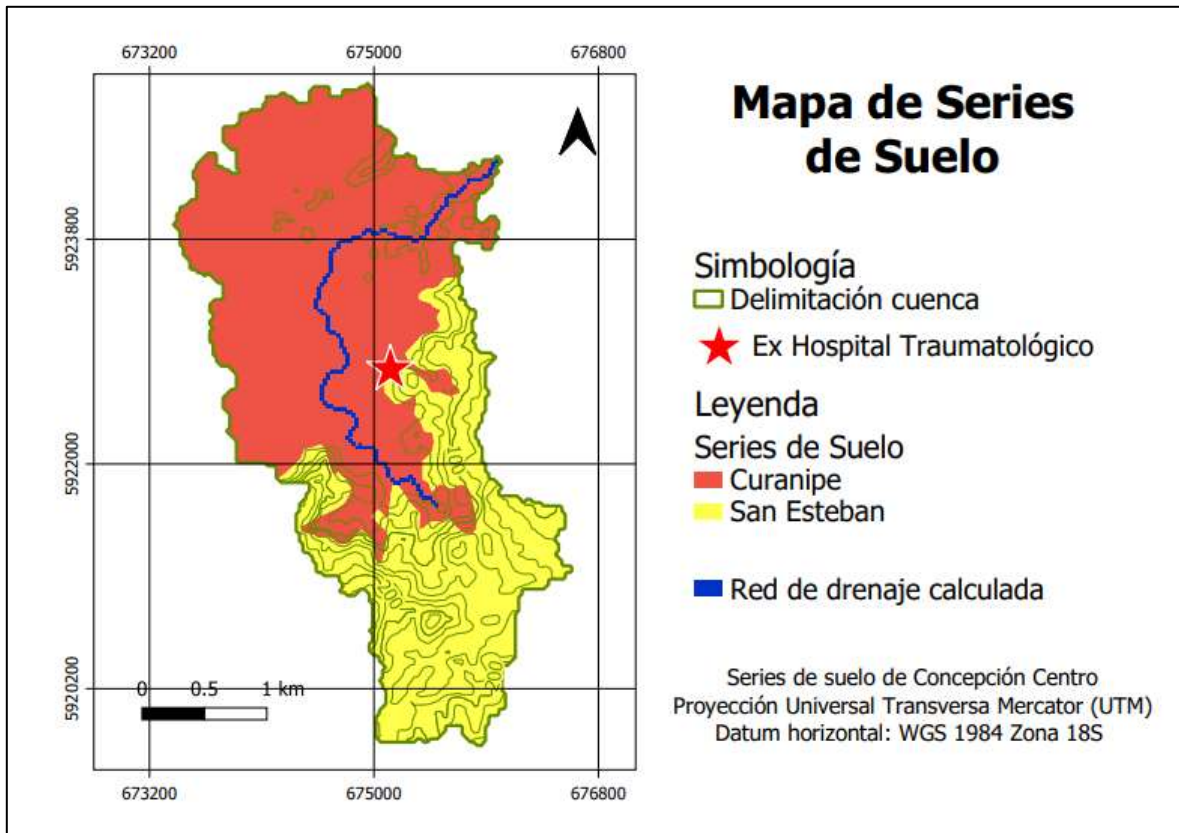


Figura 4.6: Mapa de distribución de series de suelo, con resolución de 50 x 50 metros. En rojo, la serie Curanipe corresponde al grupo hidrogeológico D y la serie San Esteban, en amarillo, al grupo C. Datos tomaos de CIREN (1999). Elaboración propia.

Tras determinar la calificación hidrológica de los suelos que cubren la cuenca analizada, el siguiente rasgo del terreno a considerar es la cobertura del suelo. La cobertura de suelo utilizada es la indicada por la ráster digital facilitada por Hernández *et al.* (2016) (Figura 4.8).

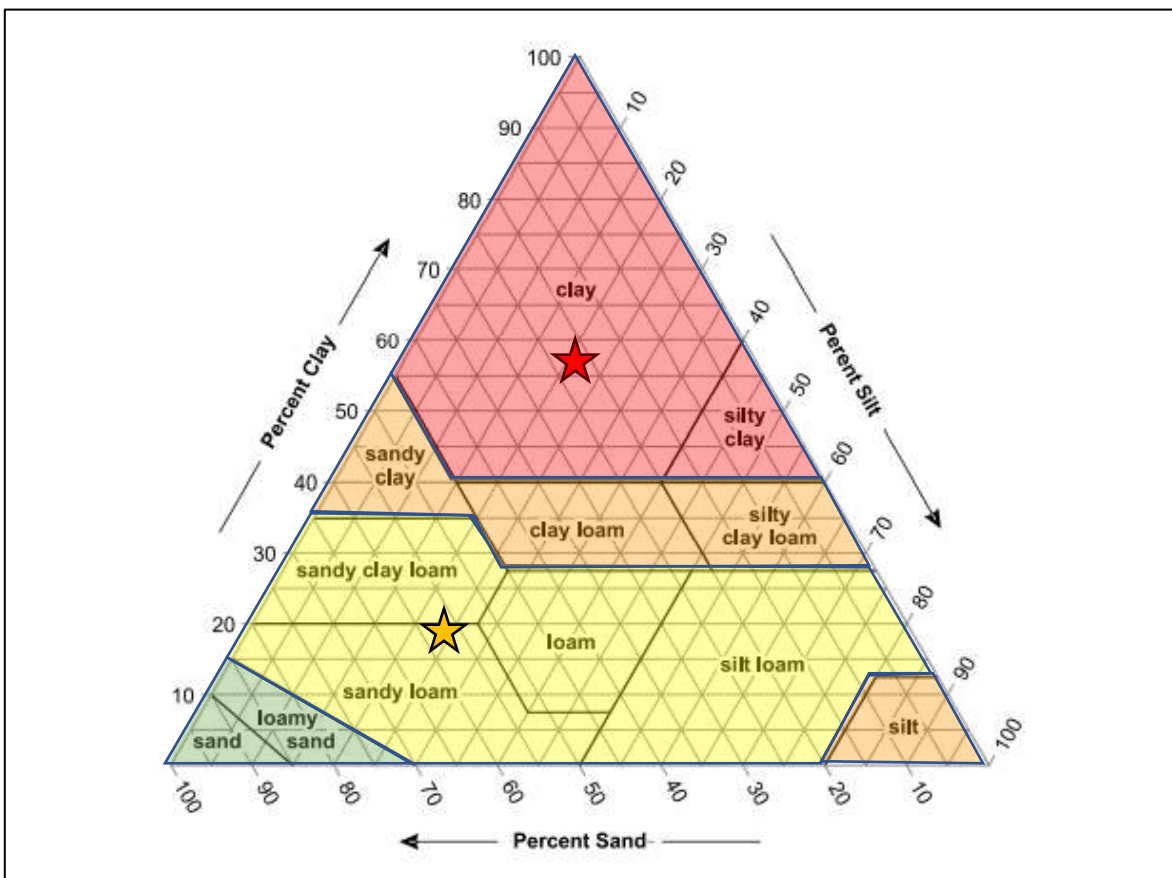


Figura 4.7: Triángulo textural para la clasificación de suelos según grupo hidrológico. Grupo A, B, C y D con color verde, amarillo, naranja y rojo, respectivamente. Datos tomados de CIREN (1999).

Tabla 4.3: Características granulométricas para cada grupo de suelo encontrado en la cuenca analizada. Información extraída de CIREN (1999).

Serie	Espesor máximo de la serie (cm)	Granulometría (%)			Grupo de suelo	Textura
		Arena	Limo	Arcilla		
Curanipe	113	21.6	21.8	56.5	D	Arcillosa
San Esteban	135	57.1	23.8	19.1	B	Franco-arenosa

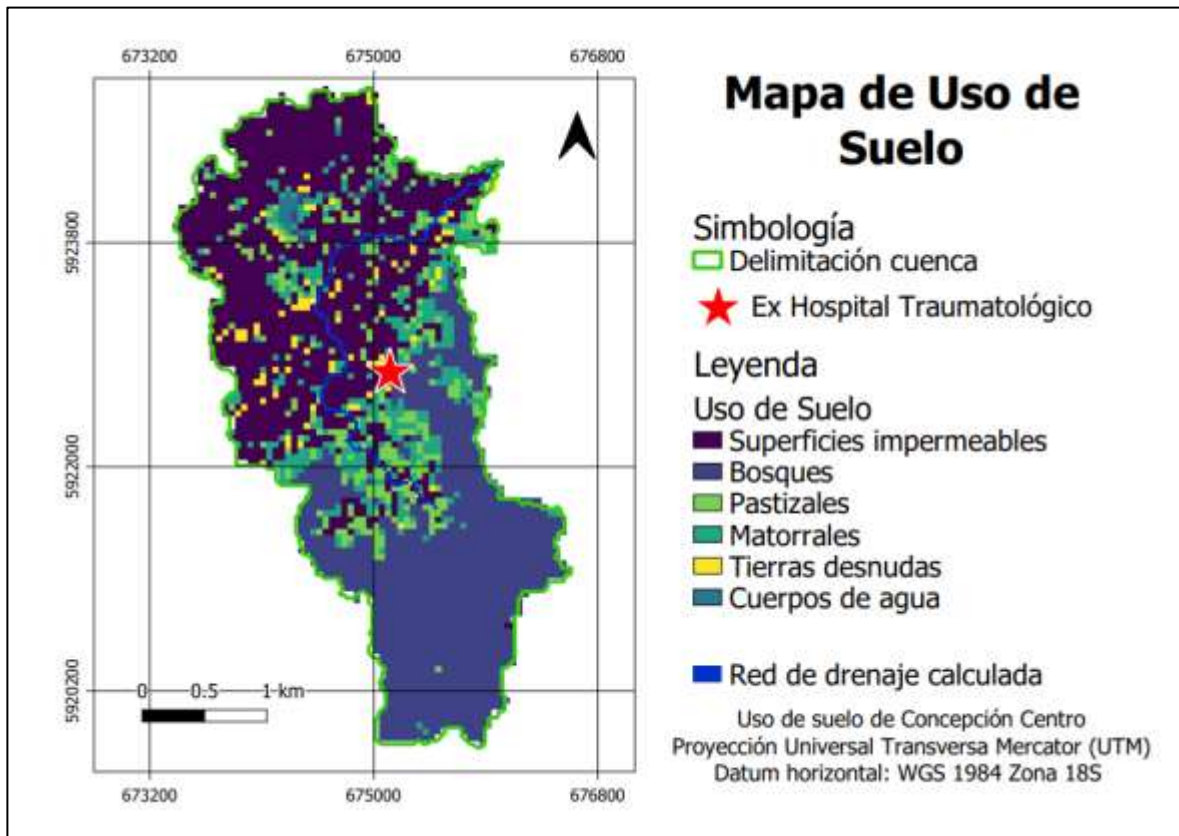


Figura 4.8: Mapa de uso de suelo, con resolución de 50 x50 metros. Datos tomados de Hernández *et al.* (2016).

Elaboración propia.

Los ráster de grupo hidrológico de suelo y de uso de suelo corresponden a mosaicos con la misma extensión, con una resolución de 50 x 50 metros. La asignación del número de curva corresponde a la combinación resultante de la superposición de ambas capas (Figura 4.9 y Tabla 4.4).

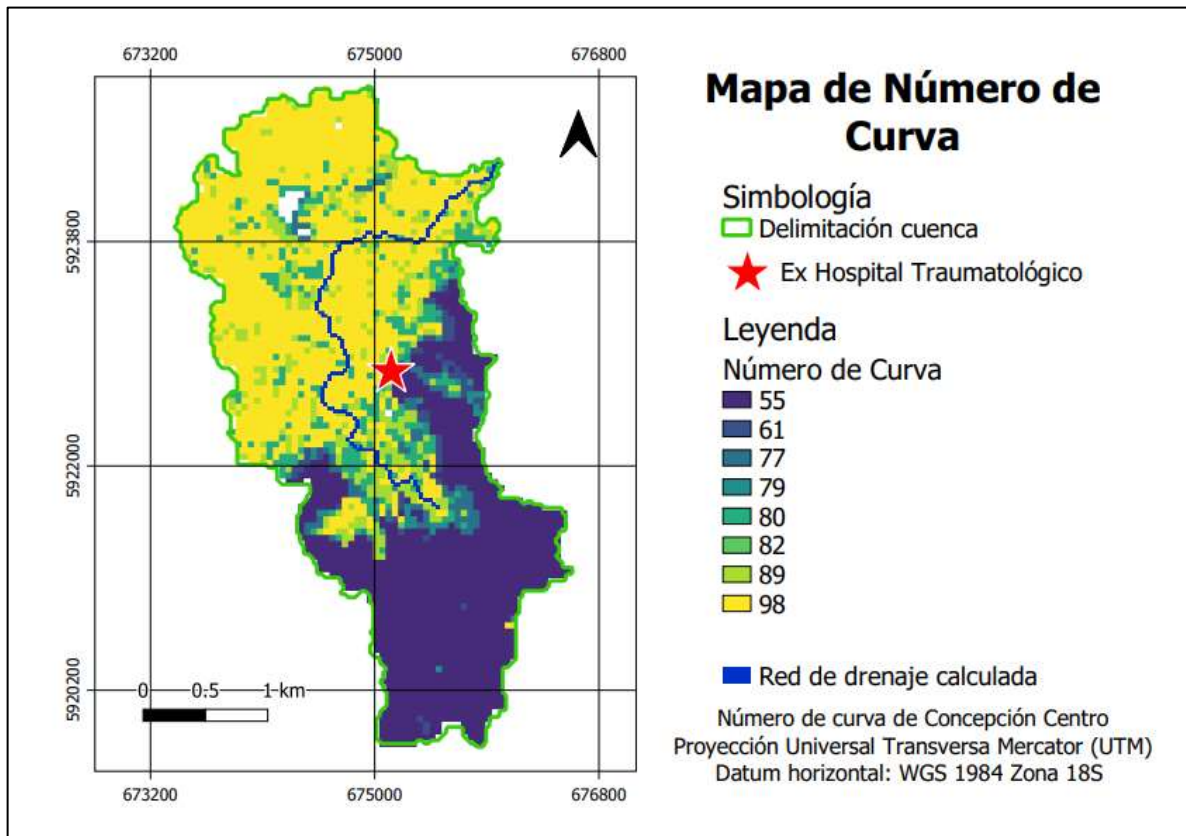


Figura 4.9: Mapa de número de curva. Elaboración propia.

Tabla 4.4: Asignación de número de curva según grupo hidrológico de suelo y uso de suelo.

Uso de Suelo	Grupo hidrológico y NC	
	B	D
Bosques	55	77
Cuerpos de Agua	0	0
Matorrales	61	80
Pastizales	79	89
Superficies impermeables	98	98
Tierras desnudas	82	89

Una vez establecido un número de curva para cada píxel de la cuenca, se determina la máxima abstracción posible (S) según lo indicado en la ecuación 4. Posteriormente, con el empleo de los datos de precipitación, se estima la escorrentía superficial por medio de la ecuación 3. Estos cálculos son realizados con la calculadora de ráster del *software* QGIS, y entrega una imagen para cada mes con valores de precipitación neta para cada píxel de información. Estos valores se resumen en las Figuras 4.10 y 4.11. Para efectos del balance global, se emplea un valor de **708** milímetros de escorrentía superficial anual.

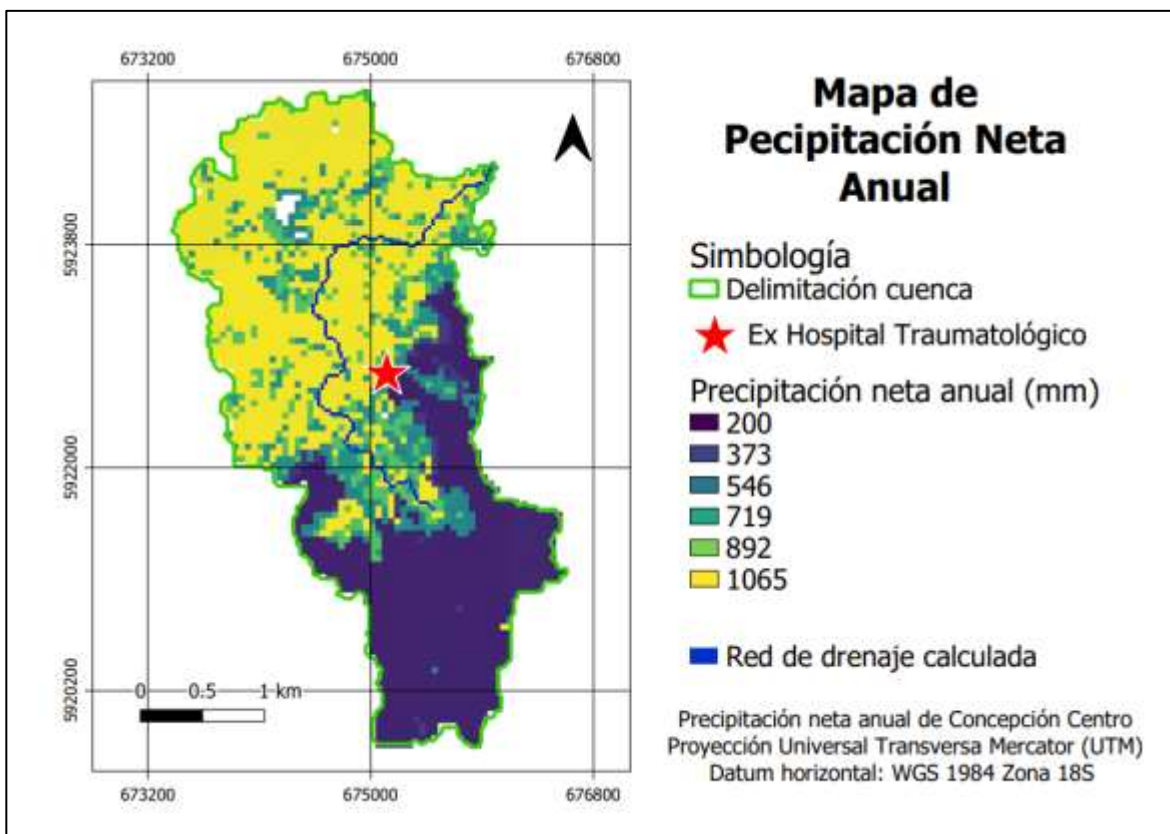


Figura 4.10: Mapa de precipitación neta anual promedio.

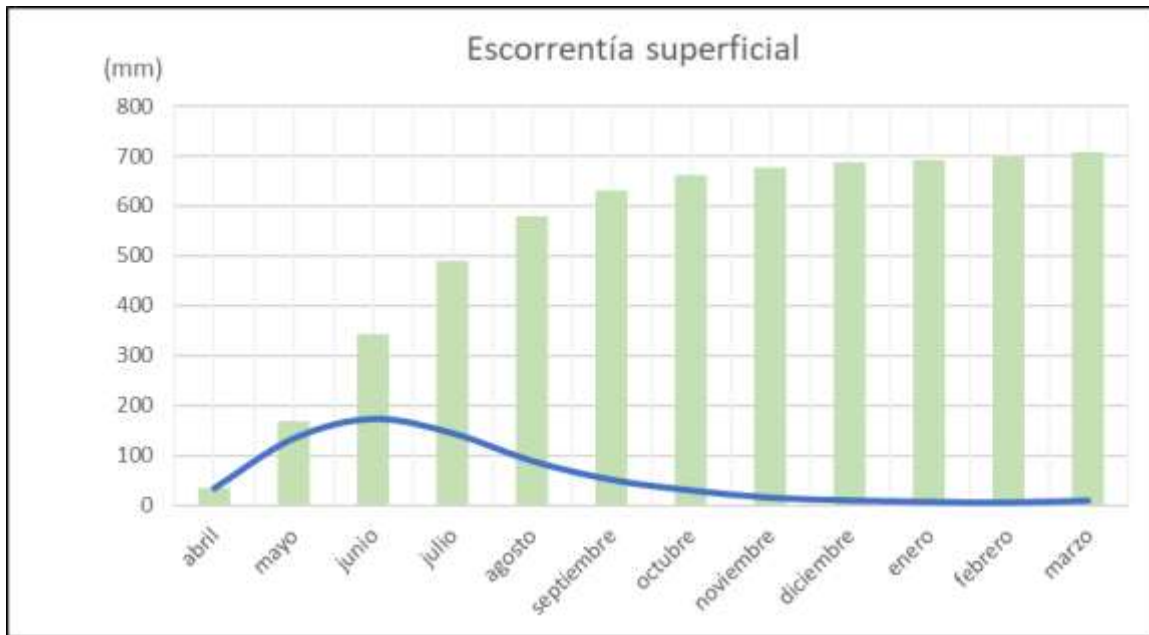
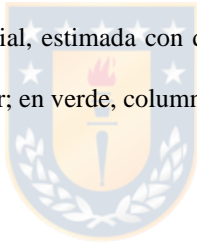


Figura 4.11: Gráfico de escorrentía superficial, estimada con datos desde 1970 al 2000. En azul, curva con valores mensuales promediados de cada ráster; en verde, columna con cantidades acumuladas.



4.1.2.3 Evapotranspiración

El agua precipitada que no ha formado escorrentía y que por lo tanto ha quedado retenida en el suelo ha de abandonar la cuenca en forma de evaporación directa o por medio de la transpiración asociada a la actividad de la cobertura vegetal. Ambos términos, evaporación y transpiración se unen bajo el concepto de evapotranspiración.

El cálculo de esta variable se realiza por medio de la fórmula de Thornthwaite, que emplea datos de temperaturas y horas de sol para obtener la evapotranspiración potencial (ETP) para cada mes. Posteriormente, con la ETP mensual, precipitaciones y propiedades de almacenamiento de agua del suelo, se realiza un balance que permite evaluar la evapotranspiración real (ETR).

La aplicación de la fórmula de Thornthwaite es detallada a continuación:

1. Cálculo del índice de calor mensual (i), a partir de la temperatura media mensual (t):

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$$

2. Cálculo del índice de calor anual (I):

$$I = \sum i$$

3. Cálculo de la ETP 'sin corregir':

$$ETP_{\text{sin corr.}} = 16 \left(\frac{10t}{I}\right)^a$$

Donde:

$ETP_{\text{sin corregir}}$ = ETP mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol.

t = temperatura media mensual, °C.

I = índice de calor anual.

$$a = 675 \times 10^{-9} \times I^3 + 771 \times 10^{-7} \times I^2 + 1792 \times 10^{-5} \times I + 0,49239$$

4. Corrección para el n° de días del mes y el n° de horas de sol:

$$ETP = ETP_{\text{sin corr.}} \cdot \frac{N}{12} \cdot \frac{d}{30}$$

Donde:

ETP = evapotranspiración potencial corregida.

N = número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y la latitud (Tabla 4.5).

d = número de días del mes.

Tabla 4.5: Número máximo de horas de sol, para los 36° de latitud sur. Datos obtenidos de Doorenbrot & Pruitt (1977).

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Horas	14.2	13.4	12.2	11.1	10.1	9.6	9.8	10.7	11.7	12.9	13.9	14.4

El resultado obtenido de la fórmula de Thornwaite corresponde a un valor potencial que sólo considera variables climáticas. Para estimar un valor real (evapotranspiración real, ETR), es necesario considerar los parámetros hidráulicos del suelo, ya que el volumen de agua que será evapotranspirada debe encontrarse como humedad en el suelo previamente. De lo anterior se concluye que $ETR \leq ETP$. El agua que es capaz de almacenar el suelo recibe el nombre de **reserva máxima**, y es estimada en base a las características granulométricas del suelo, en conjunto con parámetros relacionados al uso de este. En este caso, el volumen que corresponde a la reserva máxima se estima a partir del volumen de agua utilizable por las plantas (RAU), que corresponde a la diferencia entre la capacidad de campo (humedad del suelo tras haber perdido su contenido de agua por acción de la gravedad, CC) y el punto de marchitez (grado de humedad mínimo que debe existir en un suelo para que las plantas puedan extraer agua de él, PM). Además, es necesario conocer la densidad aparente del suelo (DA) y la profundidad de la zona radicular (PZR). Las tres primeras variables (CC, PM y DA) se obtienen por medio de la metodología señalada por Saxton *et. al* (1986), que estima las características hidráulicas del suelo en base a los porcentajes de arena y arcilla (Tabla 4.6). El cuarto parámetro, profundidad de la zona radicular, se asigna según el uso del suelo, ponderando un valor para cada serie de suelo según el área que ocupa cada tipo de cobertura. Dichos valores son extraídos de CIREN (1999), y se resumen en la Tabla 4.7.

Tabla 4.6: Parámetros hidráulicos de las series de suelo estimados a partir de la granulometría, según la metodología propuesta por Saxton *et. al* (1986).

Serie	Granulometría (%)		Textura	P. marchitez permanente	Capacidad de campo	Densidad aparente
	Arena	Arcilla				
Curanipe	21,6	56,5	Arcillosa	0,33	0,46	1,22
San Esteban	57,1	19,1	Franco-arenosa	0,12	0,23	1,45

Para estimar la **reserva máxima** se calcula, en primer lugar, el volumen total de suelo que contiene raíces de las plantas que puedan transpirar el contenido de agua, utilizando el área correspondiente al tamaño de píxel del modelo ráster (2500 m²) y la profundidad de la zona radicular. A continuación, se determina el porcentaje de humedad que efectivamente puede ser aprovechado el volumen de suelo con raíces, según las características granulométricas del suelo. Dicho porcentaje es la reserva utilizable por las plantas (RAU) y es la diferencia entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PM). Finalmente, la reserva máxima será equivalente a la masa en agua correspondiente a la RAU, expresada en milímetros (litro por metro cuadrado). El procedimiento anterior queda resumido en la siguiente expresión y se resume en la tabla 4.8:

$$R_{m\acute{a}x} = Vol. zona radicular \times píxel * RAU * DA$$

Tabla 4.7: Profundidad de zona radicular ponderada para cada serie suelo, a partir de superficies de uso de suelo.

Serie de suelo	Área (m ²)	Uso de suelo	Área x uso (m ²)	Ponderado	PZR por uso (m)	PZR ponderada (m)	PZR ponderada por serie (m)
San Esteban (B)	3.322.500	Bosques	2.992.500	0,90	0,3	0,270	0,283
		Cuerpos de agua	2.500	0,00	0	0,000	
		Matorrales	162.500	0,05	0,15	0,007	
		Pastizales	100.000	0,03	0,15	0,005	
		Impermeable	57.500	0,02	0,05	0,001	
		Tierras desnudas	7.500	0,00	0,05	0,000	
Curanipe (D)	5.577.500	Bosques	237.500	0,04	0,3	0,013	0,086
		Cuerpos de agua	42.500	0,01	0	0,000	
		Matorrales	752.500	0,13	0,15	0,020	
		Pastizales	680.000	0,12	0,15	0,018	
		Impermeable	3.665.000	0,66	0,05	0,033	
		Tierras desnudas	200.000	0,04	0,05	0,002	

Tabla 4.8: Estimación de la reserva máxima de cada píxel del área de estudio, considerando tipo y cobertura de suelo.

uso	Prof. Rad (m)		Vol. zona rad x píxel (m ³)		Reserva agua utilizable		Densidad aparente		Reserva máxima (mm)	
	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D
bosques	0.3	0.3	750	750	0.11	0.13	1.45	1.22	119.63	118.95
cuerpos de agua	0	0	0	0	0.11	0.13	1.45	1.22	0	0
matorrales	0.15	0.15	375	375	0.11	0.13	1.45	1.22	59.81	59.48
pastizales	0.15	0.15	375	375	0.11	0.13	1.45	1.22	59.81	59.48
superficies impermeables	0.05	0.05	125	125	0.11	0.13	1.45	1.22	19.94	19.83
tierras desnudas	0.05	0.05	125	125	0.11	0.13	1.45	1.22	19.94	19.83

A partir de este valor, la ETR se determina considerando dicho volumen como la cantidad máxima de agua que es posible evapotranspirar en cada mes en un determinado píxel. Dicho cálculo es un balance realizado mes a mes y se efectúa según la siguiente expresión:

Si $ETP < Precipitación + Reserva\ mes\ anterior,$

$$ETR = ETP$$

Si $ETP \geq Precipitación + Reserva\ mes\ anterior,$

$$ETR = Precipitación + Reserva\ mes\ anterior$$

Donde 'Reserva mes anterior' corresponde al volumen almacenado en el período de tiempo previo a la precipitación de dicho mes, y se considera 0 al inicio del año hidrológico (abril).

Los valores finales de ETR mensual se resumen en la Figura 4.12, sumando un valor anual de **307 mm**



Figura 4.12: Evapotranspiración real. estimada con datos desde 1970 al 2000. En azul, curva con valores mensuales promediados de cada ráster; en verde, columna con cantidades acumuladas.

4.1.2.4 Recarga

Ya estimados todos los términos del balance, es posible cuantificar la recarga anual, como muestra la siguiente expresión:

$$\text{Precipitación} = ET + \text{Esc. Superficial} + \text{Recarga}$$

$$1122 \text{ mm} = 307 \text{ mm} + 708 \text{ mm} + \text{Recarga}$$

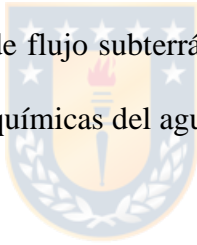
$$\text{Recarga} = 107 \text{ mm}$$

Considerando este valor y un área de 8.984.224 m² se estima que anualmente ingresan 961.311.968 litros de agua al acuífero.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Generalidades

El objetivo de este capítulo es identificar y caracterizar las unidades geológicas según su capacidad para retener y/o ceder agua. Esto se logra por medio de la incorporación de la información estratigráfica, perfiles geofísicos, datos de niveles freáticos y parámetros hidráulicos obtenidos a partir de bibliografía y de datos de terreno. Cada uno de estos elementos son detallados para cada componente de la geología del área de estudio, que son agrupados bajo el término de unidad hidrogeológica. Adicionalmente, se incorporan datos de niveles piezométricos y direcciones de flujo subterráneo, identificando zonas de recarga y descarga, además de las propiedades químicas del agua.



5.2 Unidades Hidrogeológicas

En base a todos los antecedentes presentados en los capítulos previos, se definen 4 unidades hidrogeológicas para el área de estudio. Para cada una es descrita su geometría, distribución y propiedades hidráulicas; estas últimas estimadas preliminarmente a partir de la clasificación geotécnica propuesta por McCook (1991), resumida en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Permeabilidad relativa de los tipos de suelo. Modificado de McCook (1991).

cm/s	10 ¹	10	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Perm. Relat.	Extremadamente Alto	Muy Alto	Alto		Medio	Bajo	Muy Bajo	Prácticamente impermeable			
Tipo de Suelo	Grava limpia (GP)	Arenas limpias, mezclas de arenas y gravas limpias (GW, GP, SW, SP, SM)		Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena limo y arcilla, etc. (GM, SM, ML, GC, CL)			Suelos 'impermeables' modificados por efectos de la vegetación y meteorización (MH, ML, CL)		Suelos 'impermeables'. Arcillas homogéneas bajo la zona de meteorización (CL, CH)		

5.2.1 Granito Basal

Roca granítica inalterada, correspondiente a la unidad intrusiva del Batolito costero del Sur, se distribuye en la porción suroriental de la cuenca, abarcando los sectores de mayor relieve. Constituyen la base impermeable de la cuenca, subyacente al resto de unidades no consolidadas, además de ser la unidad predominante en las zonas de recarga. Lo anterior, sumado a su alta competencia geotécnica proporciona estabilidad a los cursos intermitentes de agua superficial y favorecen la infiltración y flujo de agua meteórica hacia las unidades encontradas aguas abajo. Su profundidad varía hacia el noroeste, desde sectores de relieve positivo (donde alcanza alturas de 250 m s.n.m.) hasta los 160 m bajo la superficie, como muestran los sondeos y ensayos gravimétricos realizados en el centro de concepción. En el terreno donde se emplaza el edificio del ex hospital traumatológico, esta unidad profundiza desde el borde del cerro, donde se encuentra aproximadamente a 25 metros bajo la superficie, hacia la calle Roosevelt, donde alcanza los 40 metros. Esta unidad no es de interés como objetivo explotación de agua subterránea.

5.2.2 Arenas arcillosas (maicillo)

Roca granítica alterada, con características litológicas autónomas y emplazado como un estrato yuxtapuesto, con relación al basamento granítico. La meteorización del regolito comienza en zonas de debilidad estructural, aislando distintas porciones de este. Seguidamente, la alteración de los minerales más frágiles (feldespatos y micas) conduce a una reducción del material macizo, dando paso a una capa densa y muy poco permeable que, si bien se satura fácilmente, no tiende a ceder agua hacia otras unidades. A nivel de microcuenca, sus espesores varían entre 8 a 50 m (Mardones & Brito, 1978), mientras que dentro del área del ex hospital traumatológico circunda los 20 m. Este nivel aparece en superficie en los taludes del macizo granítico costero, y profundiza hacia sectores occidentales (aparece a los 20 m en las cercanías de la calle Roosevelt, y a los 107 m hacia el centro de Concepción). Esta unidad no presenta características favorables para su explotación como fuente de agua subterránea.

5.2.3 Arenas Limosas

Corresponde a arenas finas a medias con contenido variable de limos, genéticamente ligadas a procesos coluviales. Se encuentran en cercanías de laderas, desde donde se extienden, en promedio, unos 200 m desde el pie de los cerros. Su espesor varía dentro de la microcuenca, aumentando desde el centro de la ciudad, donde aparecen capas intermitentes intercaladas con depósitos fluviales del Biobío, hacia zonas ribereñas y cercanas a laderas, alcanzando profundidades cercanas a los 100 m. Del mismo modo, sus características granulométricas varían ampliamente a lo largo de toda su extensión, siendo más elevado su contenido en finos en las proximidades de altos topográficos. Dentro del terreno del ex hospital traumatológico,

esta unidad yace sobre todas las demás (a excepción de los rellenos artificiales), y su espesor aumenta desde niveles superficiales en dirección a la calle Roosevelt, alcanzando los 10 m donde entra en contacto con el acuífero arenoso. El alto contenido de arcillas y limo en el sedimento, que además aumenta considerablemente en este sector de la microcuenca, disminuye drásticamente las características de esta unidad como buen acuífero, haciendo su explotación no viable económicamente.

5.2.4 Arenas fluviales

Corresponde a depósitos fluviales del río Biobío constituidos por arenas medias a gruesas, con cantidades menores de limos. Esta unidad alcanza grandes espesores que en sectores céntricos de la ciudad puede alcanzar los 126 m, donde entran en contacto con el basamento rocoso, y disminuyen hacia las cercanías de las laderas. El expediente de la DGA ND-0803-2349, señala que la transmisibilidad estimada para esta unidad es de $13.6 \text{ m}^2/\text{día}$ para un pozo habilitado a los 20 m, donde los ensayos practicados no mostraron una disminución del nivel freático. Así mismo el expediente ND-0803-1383 contempla un valor de 0.27 para la porosidad efectiva. En general, los grandes espesores y la alta permeabilidad hacen de esta unidad un buen objetivo para la extracción de agua; sin embargo, la heterogeneidad y presencia de lentes esporádicos de arcilla y limo hacen que estas propiedades disminuyan considerablemente, ya que adquieren propiedades cada vez más similares a los sedimentos intercalados, sobre todo en sectores aledaños a altos topográficos. Particularmente, en el terreno del ex hospital traumatológico, esta unidad aparece cubierta por un acuitardo arenoso, y su espesor es inferior a los 10 m; adicionalmente, sus porcentajes de arcilla y limo se

encuentran entre el 13 y 59 %, haciendo que la permeabilidad sea subóptima en miras a su aprovechamiento como acuífero.

5.3 Piezometría y direcciones de flujo

Según datos presentados en Poblete & Dobry (1968), a nivel de cuenca, la cota del nivel freático oscila entre los 0 y 10 metros y responde fundamentalmente a la configuración topográfica y geomorfológica del área de estudio. Las cotas más altas de la napa, pero a la vez su mayor profundidad, se sitúan entre las calles Cochrane- Avenida Manuel Rodríguez y Calles Tucapel-- Rengo, en la parte más elevada de la terraza superior del Biobío. Las isolíneas (Figura 5.1) describen pendientes fuertes del nivel freático hacia el río Biobío, Pajonal de Chepe y antiguo Pajonal del Barrio Universitario; sin embargo, su pendiente es relativamente suave hacia el Andalién. La posición casi superficial del nivel freático en los lechos abandonados del Andalién o del río Bío-Bío hace suponer que los dos ríos que limitan la terraza sirven de receptáculos al drenaje subterráneo; además de indicar que la recarga proviene exclusivamente de las aguas lluvias y drenaje de los cerros cercanos, sin existir aportes desde los ríos al acuífero.

Por otra parte, columnas litológicas presentadas en Mardones & Brito (1978) destacan una cierta correlación entre la profundidad del nivel freático y ciertas facies en los bancos de sedimento, observándose que su posición está estrechamente vinculada a horizontes limosos o arcillosos más impermeables. En la columna correspondiente a perforaciones hechas en el barrio Universitario (columna 1a), la napa está aproximadamente a 2,5 m sobre un banco de limo interstratificado en las arenas finas, negras y limosas. En otra perforación realizada al

noroeste de la anterior (su ubicación no es especificada), el relleno artificial actúa como estrato permeable y el nivel freático se dispone sobre arenas finas puras menos permeables que el relleno. En la columna 5a (ubicada en Colo-Colo con Bulnes), en cambio, las arenas de los depósitos fluviales del Biobío con una granulometría gruesa a mediana proporcionan una gran permeabilidad y presentan un nivel freático a más de 8 metros de profundidad. Así mismo, en el mismo la variación anual del nivel freático oscila entre 0.3 m para suelos arenosos permeables hasta más de 1 m en suelos orgánicos impermeables.

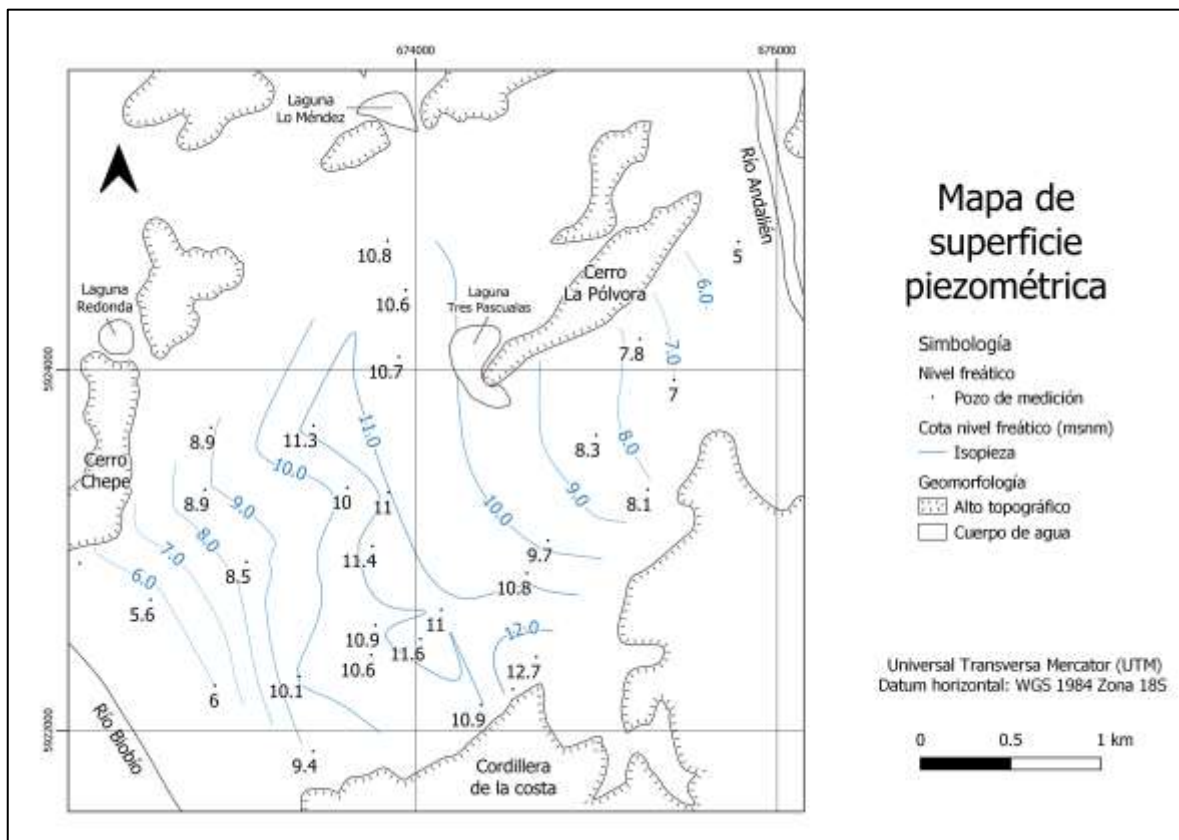


Figura 5.1: Mapa de isopiezias de la ciudad de Concepción. Datos de cota de nivel freático tomados de Poblete & Dobry (1968)

Los antecedentes permiten deducir que, para el terreno del ex hospital traumatológico, la dirección de flujo de agua subterránea es de este a oeste, comenzando desde la ladera del cerro, que es la zona de recarga, continuando hacia la calle Roosevelt, donde sigue su curso hacia el principal curso de drenaje. El perfil observado en la Figura 3.11 muestra una particular diferencia del nivel freático dentro del terreno, donde en la zona frontal aparece a los 2 m de profundidad (S-1, S-3, C-1 y C-2). Mientras que en sondaje S-2, se detectó a 6.6 m de profundidad. Esta variación se debe a diferencias estratigráficas, donde que el estrato más rico en arcillas y limos encontrado en la zona frontal del terreno se encuentra saturado y posee agua acumulada proveniente de infiltración, mientras que el estrato de maicillo que se encuentra hacia el fondo del terreno corresponde a un material ligeramente más grueso y homogéneo en profundidad. Este rasgo es observado en otros sectores de la microcuenca, donde niveles más superficiales de agua subterránea se presentan ante la ocurrencia de estratos de materiales arcillo-limosos, y los niveles más profundos se asocian a estratos más permeables.

5.4 Análisis de Vulnerabilidad

El agua subterránea es susceptible a ser contaminada por actividades antrópicas, por lo tanto, el mapeo de vulnerabilidad es un aspecto fundamental para la administración de este recurso. El objetivo de este subcapítulo es estimar la vulnerabilidad de forma cuantitativa, aplicando el modelo GOD, ampliamente utilizado y validado en numerosos proyectos.

5.4.1 Método GOD

GOD es un método de evaluación de vulnerabilidad realizado en capas que utiliza índices numéricos para mapear un área en base a tres parámetros: G, confinamiento del agua subterránea; O, estrato suprayacente y D, profundidad del nivel freático (las letras corresponden a abreviaciones de los conceptos en inglés). A cada categoría se asignan puntajes que luego son multiplicados para obtener un valor final, como muestra la Figura 5.2.

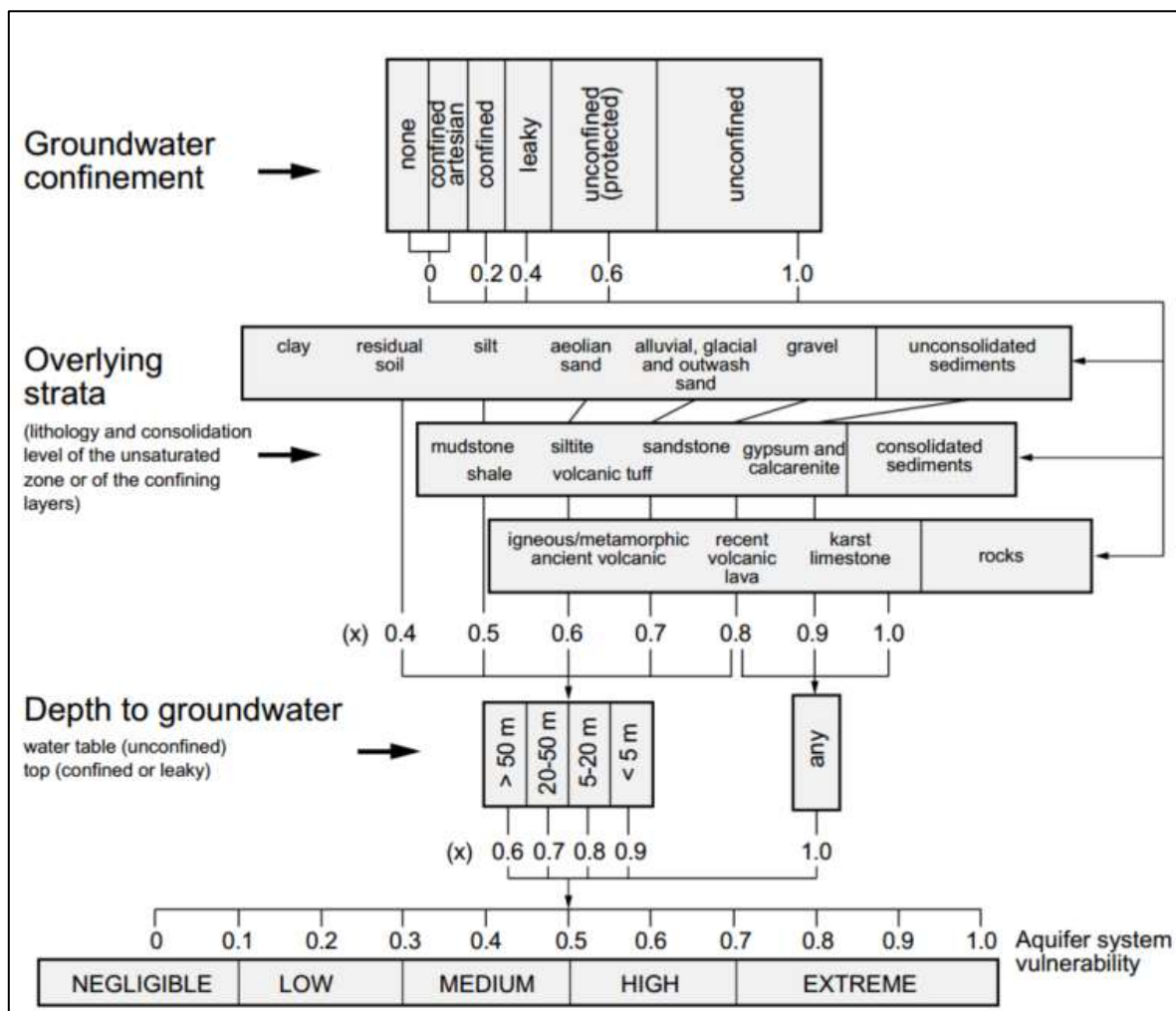


Figura 5.2: Diagrama de flujo de cálculo de índice GOD para la estimación de la vulnerabilidad del acuífero.

Tomado de (Foster *et al.*, 2002)

El índice GOD se divide en 5 categorías: despreciable (0-0.1), baja (0.1-0.3), moderada (0.3-0.5), alta (0.5-0.7) y muy alta (0.7-1) (Foster *et al.* 2002). En la Tabla se detallan cada una de las asignaciones y el resultado final del índice GOD, y en la Figura 5.3 se ilustra la distribución del índice en base a la interpolación de los datos tomados en terreno.

		O			
		Arena fluvial (0.7)	Limos (0.5)		
G	Acuífero libre (1.0)	Vulnerabilidad Alta (0.56)	Vulnerabilidad Media (0.4)	5-20 m (0.8)	D

Tabla 5.2: Cálculo de índice GOD. “G” corresponde a un acuífero libre para toda el área de estudio (valor 1). “O” toma dos valores: 0.7 para los depósitos fluviales del Biobío y 0.5 para depósitos coluviales. “D” toma el valor de 0.8, considerando la profundidad del nivel freático en meses secos (febrero).

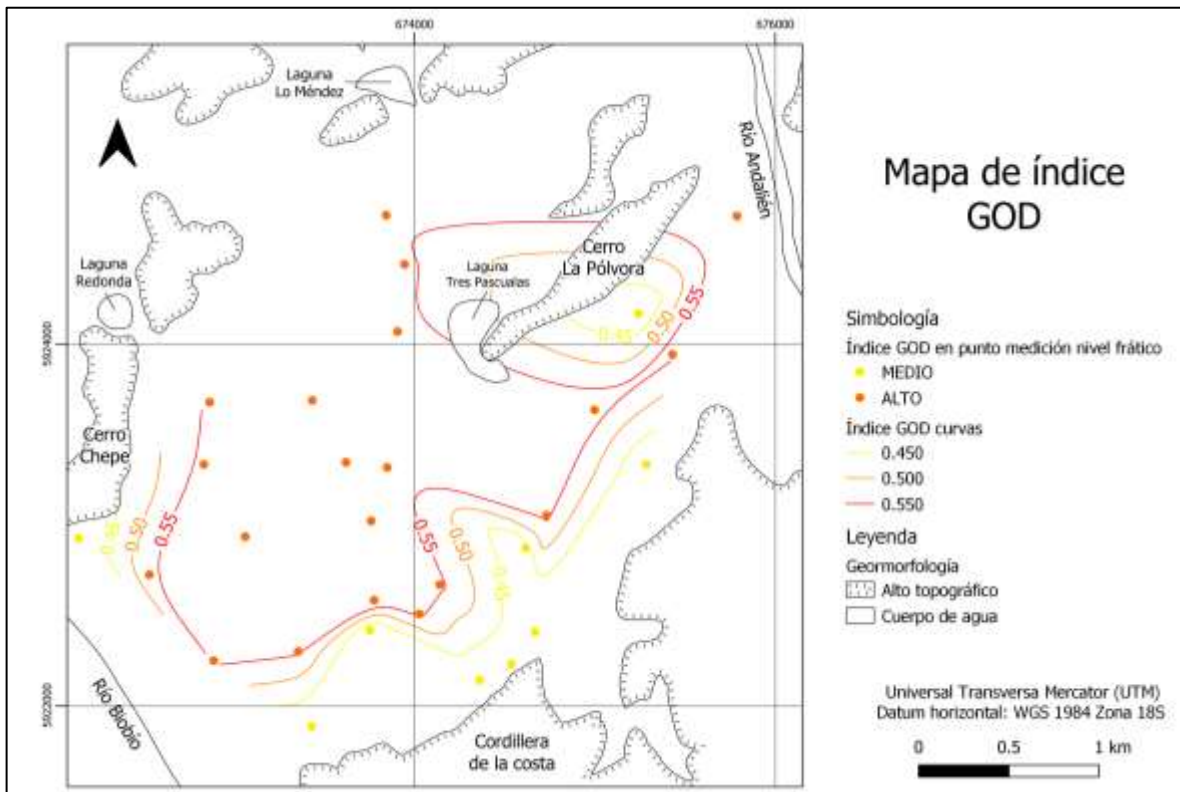


Figura 5.3: Mapa de índice GOD para acuífero de la ciudad de Concepción. Datos de profundidad tomados de Poblete & Dobry (1968). Elaboración propia.

De los resultados anteriores se desprende que la vulnerabilidad del acuífero se encuentra entre Media y Alta, sin embargo, los datos de profundidad del nivel freático corresponden a mediciones hechas en meses secos. En meses de lluvia, es de esperar que los índices indiquen una vulnerabilidad Alta a Extrema.

6 CONCLUSIONES

Los resultados del modelo confeccionado han mostrado que la explotación de agua subterránea como medio caloportador es preliminarmente no viable dentro del terreno del ex hospital traumatológico debido a las propiedades hidráulicas del medio geológico en el que se encuentra. Además, se documenta la existencia de una falla normal cercana a la ladera del cerro, cuya presencia puede influir en la dinámica del flujo subterráneo, y es de importancia identificar si esta influencia es positiva o negativa.

Una evaluación definitiva de la factibilidad hidrogeológica debe ser realizada por medio de ensayos de bombeo, mediciones de temperatura y análisis de la composición química del agua; los dos primeros para determinar caudales de extracción, área de influencia de la captación y potencial calórico, y lo tercero para determinar la influencia que pueda tener en el funcionamiento de los equipos de bombeo y calefacción. El principal objetivo de los ensayos de bombeo es la unidad compuesta por arenas limosas, detectada a una profundidad de 10-15 m, en el sector frontal del sitio. Mediciones de temperatura deben ser realizadas a diferentes profundidades y durante varios momentos del año hidrológico.

Según lo anterior, es de interés estimar la factibilidad de implementar un sistema geotérmico cerrado. Para ello debe ser caracterizado el comportamiento del calor dentro del suelo.

7 REFERENCIAS

- Agencia Chilena de Eficiencia Energética. (2018). *Balance nacional de Energía*. Obtenido de Energía abierta: <http://energiaabierta.cne.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>
- Aguirre, L., Hervé, F., & Godoy, E. (1972). Distribution of metamorphic facies in Chile: an outline. *Krystallinikum*, 9, 7-19.
- Biró, L. (1982). *Revisión y redefinición de los "Estratos de Quiriquina", Campaniano-Maastrichtiano, en su localidad tipo en la Isla Quiriquina, 36°35' Lat. S, Chile, Sudamérica, con un perfil complementario en Cocholgüe*. Concepción: Congreso Geológico Chileno N°3. Actas 1: 29-64.
- Börgel, J. (1983). Geomorfología y Geografía de Chile. *Instituto Geográfico Militar*, 373.
- Brüggen, J. (1950). El volcanismo en Chile. *Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas* (7), 61-68.
- Cabezas, A. M. (2012). *Eficiencia energética a través de utilización de pozos canadienses con el análisis de datos de un caso real 'Casa Pomaret'*. Barcelona.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica*.
- Chow, V., Maidment, D., Mays, L., & Saldarriaga, J. (1994). *Hidrología aplicada*. Santa Fe de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- CIREN. (1999). *Estudio agrológico VIII región: Descripciones de suelos, materiales y símbolos*.

- Cisternas, M. A. (1993). *Descripción sedimentológica (granulometría) en sedimentos del curso superior e inferior del río Biobío*. Concepción: Serie Monografías Científicas Centro EULA - Chile.
- Collao, S., Alfaro, G., Cecioni, A., Gonzáles, A., & Quinzio, A. (2000). Evaluación de los Recursos Metálicos de la Región del BioBío, Chile. *Universidad de Concepción*, 207 p.
- Cozzi, L., Arsalane, Y., McGlade, C., Vass, T., & Crow, D. (4 de Diciembre de 2019). IEA. Obtenido de <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ebf178cc-b1c9-4de9-a3aa-51a080c0f8c3/SDS-webinar-2019-draft06.pdf>
- Creixell, C. (2001). *Petrología y Geotermobarometría del las Rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36° 30'S y 38° 00'S*. Memoria para optar a título de Geólogo. Concepción: Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción.
- Cronshey, R. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division.
- Deckart, K., Hervé, F., Fanning, M., Ramírez, V., Calderón, M., & Godoy, E. (2014). U-Pb Geochronology and Hf-O Isotopes of zircons from the Pennsylvanian Coastal Batholith, South-Central Chile. *Andean Geology* 41 (1), 49-82.
- Deere, D. U. (1963). Technical description of rock cores for engineering purpose. *Rock Mechanics and Engineering Geology* 1(1), 17-22.

DGA. (1987). *Balance Hídrico de Chile*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas, Dirección General .

Dirección meteorológica de Chile. (2011). *Anuario Climatológico 2010*. Santiago, Chile.

Dirección meteorológica de Chile. (2019). *Reporte Climático 2019*. Santiago, Chile.

Doorenbrot, J., & Pruitt, W. O. (1977). Crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper No. 24*, 34-37.

Erices, J. A. (2018). *Estratigrafía e Icnología de los estratos de la formación Quiriquina que afloran en el área costera de la Provincia de Concepción, Región del BioBío, Chile: Evolución ecosedimentaria del sustrato*. Concepción.

Ferraris, F. (1981). *Mapas geológicos preliminares de Chile. Hoja Los Ángeles-Angol, escala 1:250.000*. Instituto de Investigaciones Geológicas.

Florides, G., & Kalogirou, S. (2007). Ground heat exchangers - A review of systems, models and applications. *Renewable energy* , 2461 - 2478.

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., Elia, M., & Paris, M. (2002). Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies. *The World Bank*, 103.

Foti, S., Lai, C. G., Rix, G. J., & Strobbia, C. (2015). Surface wave methods for near-surface site characterization. *CRC press*.

Frutos, J., Mencarini, P., Pincheira, M., Bourret, Y., & Alfaro, G. (1982). Geología de la isla Quiriquina. III Congreso Geológico Chileno. *Actas III, F307-F338*. Concepción.

- Gajardo, A. (1981). *Avance geológico hoja Concepción - Chillán. Rregión del Biobío. Escala 1:250.000*. Recuperado el 6 de 8 de 2020, de <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/13280>
- Galli, C. (1967). *Geología urbana y suelo de fundación de Concepción y Talcahuano, Chile*. Concepción: Universidad de Concepción, Departamento de Geología y Mineralogía .
- Gehring, M., & Loksha, V. (2012). *Manual de Geotermia*. Washington D.C.
- Glodny, J., Gräfe, K., Echtler, H., & Rosenau, M. (2008). Mesozoic to Quaternary continental margin dynamics in South-Central Chile (36–42S): the apatite and zircon fission track perspective. *International journal of earth sciences*, Vol. 97: 1271-1291.
- Hernández, H., Galleguillos, M., & Estades, C. (2016). *Mapa de Cobertura de Suelos de Chile 2014: Descripción del Producto*. Laboratorio GEP, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile.
- Hervé, F., Godoy, E., Del Campo, M., & Ojeda, J. (1976). Las metabasitas del basamento metamórfico de Chile central y austral. *Primer Congreso Geológico Chileno, Actas* , Vol. 2, pp. 175-187.
- Hervé, F., Godoy, E., Parada, M. A., 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 Evolution of the Pacific Ocean Basin*, 18, 97-113.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (Junio de 2008). Obtenido de Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía: www.idae.es

Lo Russo, S., Gnani, L., Rocca, E., Taddia, G., & Verda, V. (2014). Groundwater Heat Pump (GWHP) system modeling Thermal Affected Zone (TAZ) prediction reliability: Influence of temporal variations in flow discharge and injection temperature. *Geothermics*, 103-112.

Lucassen, F., Trumbull, R., Franz, G., Creixell, C., Vásquez, P., Romer, R., & Figueroa, O. (2004). Distinguishing crustal recycling and juvenile additions at active continental margins: the Paleozoic to recent compositional evolution of the Chilean Pacific margin (36–41° S). *Journal of South American Earth Sciences*, 17(2), 103-119.

Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 66-93.

Mardones, F., & Brito, M. (1978). *El sitio geomorfológico de las ciudades de Concepción y Talcahuano*. Concepción: Instituto de antropología, historia y geografía. Departamento de geografía. Universidad de Concepción .

Martin, M., Kato, T., Rodriguez, C., Godoy, E., Duhart, P., McDonough, M., & Campos, A. (1999). Evolution of the late Paleozoic accretionary complex and overlying forearc-magmatic arc, south central Chile (38°–41° S): Constraints for the tectonic setting along the southwestern margin of Gondwana. *Tectonics*, 18(4), 582-605.

- McCook, D. (1991). *Measurement and estimation of permeability of soils for animal waste storage facility design*. Washington, DC: Technical note 717, US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service.
- Mendoza, J. (2001). Distribución, caracterización, génesis y características tectónicas de los yacimientos de arenas silíceas del área costera de la Octava Región, entre Coliumo y Los Álamos. *Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito)*. , 181.
- Mockus, V. (1964). Estimation of direct Runoff from storm rainfall . En *National Engineering Handbook*. Washington DC: Soil Conservation Service.
- Munizaga, F., Aguirre, L., & Hervé, F. (1973). Rb/Sr ages of rocks from the Chilean metamorphic basement. *Earth and Planetary Science Letters*, 18(1), 87-92.
- Muñoz-Cristi, J. (1946). Estado actual del conocimiento sobre la geología de la provincia de Arauco. *Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile*, 3, 30-63.
- Nielsen, S. (2005). The Triassic Santa Juana Formation at the lower Biobío River, south central Chile. *Journal of South American Earth Sciences* , 19(4), 547-562.
- Parra, O. (1996). El río Biobío: Elemento base del desarrollo de la ciudad Región. *Cuadernos del Biobío, Ediciones Universidad de Concepción*, 1-83.
- Parra, O. (2009). Situación ambiental de las lagunas de Concepción. *Seminario: "Recuperemos las lagunas para los habitantes de concepción"*. Concepción: Municipalidad de Concepción, ESSBIO, Universidad de Concepción, Centro EULA.

- Poblete, M., & Dobry, R. (1968). Modelo dinámico del subsuelo de Concepción. *Revista IDIEM*, 7(3), 111.
- Quezada, J. (1996). Geología urbana y Ambiental de la Ciudad de Concepción. *Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito)*, 143.
- Russo, S. L., Gvani, L., Emanuele, R., Glenda, T., & Verda, V. (2014). Groundwater Heat Pump (GWHP) system modeling and Thermal Affected Zone (TAZ) prediction reliability: Influence of temporal variations in flow discharge and injection temperature. *Geothermics*, 103-112.
- Salazar, C. (2004). *Ammonites del Maastrichtiano de la Formación Quiriquina, VIII Región del Bío-Bío, Chile: sistemática, y afinidades paleobiogeográficas. Memoria para optar al título de Geólogo*. Departamento Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción.
- Saxton, K. E., Rawls, W., Romberger, J. S., & Papendick, R. I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil science society of America Journal*, 50(4), 1031-1036.
- Self, S. J., Reddy, B. V., & Rosen, M. A. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy*, 341-348.
- Soil Survey Staff. (1993). *Soil survey manual*. Washington DC.: U.S. Department of Agriculture Handbook No. 18.

- Stinnesbeck, W. (1986). Zu den faunistischen und palökologischen Verhältnissen in der Quiriquina Formation (Maastrichtium) zentral-Chiles. *Palaeontographica. Abteilung A, Paläozoologie, Stratigraphie*, 194(4-6), 99-237.
- Tavera, J. (1960). El Triásico del valle inferior del río Biobío. *Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Anales Universidad de Chile*, Vol. 17: 321-349.
- Vásquez, P. (2001). Petrología y geotermobarometría del basamento metamórfico de la Cordillera de la Costa de Chile, entre los 36°30'S y 38°00'S. Memoria para optar al título de Geólogo. *Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito)*.
- Vivallos, J., Ramírez, P., & Fonseca, A. (2010). *Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Concepción, Región del Biobío*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geoambiental 12, 3 mapas en un hoja escala 1:20.000. Santiago.
- Willner, A. (2005). Pressure–temperature evolution of a Late Palaeozoic paired metamorphic belt in North–Central Chile (34–35 30' S). *Journal of Petrology*, 46(9), 1805-1833.