



## **CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS DUNAS DE CONCÓN, CONCÓN, REGIÓN DE VALPARAÍSO**

Cristóbal Machuca D.V., Cecilia Donoso B., Luis López V.



**INFORME TÉCNICO**

**SUBDIRECCIÓN NACIONAL DE GEOLOGÍA**

**2024**

---

## **CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS DUNAS DE CONCÓN, CONCÓN, REGIÓN DE VALPARAÍSO**

### **INFORME TÉCNICO, 2024**

© Servicio Nacional de Geología y Minería. Av. Santa María 0104, Casilla 10465, Santiago, Chile.  
Director Nacional: Patricio Aguilera P.  
Subdirectora Nacional de Geología: Alejandra Ávila N.

Este informe se puede difundir o reproducir libremente, siempre y cuando se cite la fuente.

**Tipo de Informe Técnico:** Emergencia geológica-minera.

**Unidad Ejecutora:** Unidad de Hidrogeología, Santiago.

**Revisado por:** Carolina Espinoza C., Encargada de la Unidad de Hidrogeología

Francisca Falcón H., Encargada de unidad de Peligros Geológicos. Constanza Hoffmann P., Jefa de departamento de Geología Aplicada y Recursos Geológicos.

#### **Referencia bibliográfica:**

Machuca, C.; Donoso, C.; López, L. 2024. Caracterización Hidrogeológica de las dunas de Concón, Concón, Región de Valparaíso. Informe Técnico Inédito, 28p.

**Portada:** Vista aérea de las cárcavas producidas por la falla del sistema de drenaje de aguas lluvia, vista hacia el este.

**Fotografía:** Felipe Fuentes.

Este Informe inédito está disponible en Biblioteca del Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago:  
<http://www.biblioteca.sernageomin.cl>

## RESUMEN EJECUTIVO

Las dunas de Concón corresponden a un elemento del paisaje característico del sector ubicado entre Reñaca y Concón en la región de Valparaíso. Su valor escénico y patrimonial han motivado el desarrollo de proyectos inmobiliarios incluso sobre zonas que han sido definidas como de alto peligro geológico. En agosto y septiembre de 2023 ocurrieron lluvias intensas en la zona, asociadas a un evento hidrometeorológico en Chile central en el contexto del ENOS (El Niño oscilación del sur), tras años de bajas en las precipitaciones. Esto tuvo como consecuencia el colapso de la red de colectores de aguas lluvia y la formación de cárcavas por hiper erosión en el talud de la terraza costera.

Lo anterior, exige poner en discusión cómo el diseño y desarrollo urbano modifican algunos procesos hidrogeológicos y la relevancia que tiene en la gestión de peligros geológicos. En ese sentido, el presente trabajo tiene por objetivo caracterizar la componente hidrogeológica en el sector aterrizado entre Concón y Viña del Mar y proponer una evaluación conceptual de soluciones alternativas para el manejo de aguas lluvias basadas en métodos de recarga artificial de acuíferos.

La urbanización impuso un aumento progresivo a la demanda del sistema red de aguas lluvias que descarga hacia Av. Borgoño. La conexión de un nuevo ramal, denominado Foresta de la Costa III, duplicó el área de drenaje descargada a través de la zona de ruptura, lo que sumado a las altas pendientes y velocidades de flujo del agua al interior de las cañerías de cemento terminó con la ruptura del colector y gatilló la formación de las cárcavas en 2023.

Los principales resultados de este trabajo muestran que el desarrollo urbano se aceleró a partir de 1985 y como consecuencia el suelo disminuyó su capacidad de retener e infiltrar agua, pasando de un umbral de escorrentía de 110 mm a tan solo 15 mm. Consecuentemente, la infiltración se redujo en un 37% para eventos de recurrencia como el de 2023. Por otra parte, del análisis de los registros históricos de estaciones meteorológicas cercanas se desprende que una precipitación como la de 2023 tiene un 45% de probabilidad de ocurrir cada año.

Finalmente, el cambio de uso de suelo ha provocado una disminución relevante en la capacidad de recarga del acuífero local. Esto disminuye la disponibilidad de aguas subterráneas para usuarios de pozos y vertientes en Av. Borgoño. El uso de parques y bandejoneras centrales para acumular e infiltrar agua se presenta como una alternativa posible y económicamente viable para el manejo de aguas lluvia, mientras que paralelamente, mejoraría la disponibilidad de agua en el sector de las dunas de Concón.

## TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción .....	1
2. Metodología .....	3
2.1 Fuente de información.....	5
3. Levantamiento cartográfico del área de estudio.....	7
4. Geología del sector del campo dunar entre Concón y Reñaca .....	9
4.1 Geología regional .....	9
4.2 Estratigrafía detallada del sector afectado por el deslizamiento .....	11
5. Hidrología y uso de suelo del sector de las dunas de Concón. ....	13
5.1 Análisis estadístico de estaciones cercanas .....	20
5.2 Análisis de recurrencia de tormentas como la ocurrida en agosto de 2023. ....	22
5.1 Evapotranspiración.....	25
6. Campaña Geofísica Gravimétrica.....	28
6.1 Análisis.....	32
7. Caracterización Hidrogeológica .....	36
7.1 Unidades hidrogeológicas .....	36
7.1 Geometría del Acuífero y Caracterización de niveles .....	45
7.2 Balance hídrico .....	47
7.3 Modelo Conceptual.....	53
8. Sugerencias y mejoras para el control de escorrentía y disponibilidad de agua subterránea .....	57
8.1 Generación de infraestructura de infiltración .....	58
8.2 Disminución de carga del sistema de colectores.....	60
9. Conclusiones y recomendaciones .....	61
10. Referencias .....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1. Mapa de ubicación área de estudio.....	3
FIG. 2. Ubicación de los puntos con información geológica respecto a las cárcavas generadas en 2023 y la extensión del Modelo de Elevación Digital de Terreno (MDT) levantado por la unidad de cartografía del Sernageomin.....	6
FIG. 3. Modelo de Elevación Digital de Terreno generado para la estimación del volumen de material desplazado. ....	7
FIG. 4. Avance del borde del talud de las cárcavas hasta el 8 de noviembre de 2023. La imagen de fondo corresponde a una ortofoto tomada el 15-09-2023. ....	8
FIG. 5. Columna estratigráfica del sector de Cárcava 1. Tomado de Gonzáles, en preparación.....	13
FIG. 6. Serie temporal de imágenes satelitales en donde se observa la evolución de la urbanización en el sector de las dunas de Concón.....	14
FIG. 7. Distribución del Uso de Suelo en el área de estudio y la Subcuenca Concón-Reñaca. ....	15
FIG. 8. Mapa de pendientes y área de drenaje de los colectores que conforman la red en la subcuenca Reñaca Concón. ....	17
FIG. 9. Ubicación de estaciones meteorológicas analizadas durante este trabajo. ....	20
FIG. 10. Distribución de valores mensuales de precipitación acumulada para la estación Rodelillo.....	22
FIG. 11. Precipitaciones horarias para las estaciones Torquemada y Rodelillo durante la tormenta en agosto de 2023. En el recuadro negro se identifica una ventana de 24 horas para el evento principal de precipitación.....	24
FIG. 12. Curvas IDF método escalamiento estadístico para la estación Rodelillo. Tomado de DOH, 2019. Las intensidades del evento de agosto de 2023 se presentan como estrellas rojas. ....	25
FIG. 13. Subcuenca de disponibilidad de información de EVP diaria en Camels-CR2.....	27
FIG. 14. Temperatura histórica entre 2013 y 2024 en estación Torquemada. Tomado de <a href="http://www.climatologia.meteochile.gob.cl">www.climatologia.meteochile.gob.cl</a> . ....	27
FIG. 15. Área de levantamiento de perfiles gravimétricos. Imagen: Esri, Maxer, Earthstar geographics, and the GIS User Community. ....	29
FIG. 16. Estación de enlace gravimétrico Reñaca. ....	30
FIG. 17. Estación de gravedad absoluta SHOA .....	31
FIG. 18. Anomalía de Bouguer. ....	34

FIG. 19. Anomalía residual.....	35
FIG. 20. Modelo 2D perfil gravimétrico 2, calle los Pellines .....	36
FIG. 21. Esquema de pozos hidrogeológicos construidos en la subcuenca Reñaca-Concón. .....	39
FIG. 22. Diagrama de pozo ND-0505-4729, con nivel en la unidad UH-A2. ....	40
FIG. 23. Esquema de pozos con pruebas hidráulicas en la unidad UH-C1.....	42
FIG. 24. Esquema de pozo y sondaje geotécnico en el área de estudio.....	43
FIG. 25. Relación entre transmisividades y caudales específicos obtenidos de la reinterpretación de pruebas de bombeo llevadas a cabo en el área de estudio .....	44
FIG. 26. Límites de la cuenca hidrogeológica y extrapolación de anomalías gravimétricas residuales. ....	45
FIG. 27. Piezometría inferida del sector Reñaca-Concón a partir de información de niveles disponible en expedientes de solicitud de aprovechamiento de aguas subterráneas.....	46
FIG. 28. Perfil Hidrogeológico SE-NO. ....	55
FIG. 29. Perfil Hidrogeológico N-S.....	56
FIG. 30. Propuesta de zonas para el diseño de infraestructura de retención e infiltración. .....	60

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Volúmenes de deslizamientos. ....	7
Tabla 2. Descripción de los ambientes depositacionales definidos. ....	12
Tabla 3. Detalle en la distribución del uso de suelo en el área de estudio y la subcuenca Concón-Reñaca.....	16
Tabla 4. Cobertura de suelo para la subcuenca utilizando método de “Clasificación Supervisada” de una imagen satelital (satélite KOMPSAT-3A) con resolución de 40cm (PAN) 1,6m (MX) por píxel en la subcuenca Las Dunas. Tomado de DOH (2019). ....	16
Tabla 5. Extracto del resumen de resultados análisis infraestructura de colectores existentes t=2 años, duración 12 horas. Tomado de DOH, 2019.....	19
Tabla 6. Estaciones utilizadas para la caracterización de las precipitaciones. *La estadística de precipitaciones medias anuales de la estación Torquemada se obtuvo de los datos publicados por la DGAC y no se filtró por completitud del registro de datos.....	21
Tabla 7. Precipitación media anual (mm) para las distintas estaciones según el trabajo. *La estación Torquemada solo cuenta con información entre 2013 y 2023.....	21
Tabla 8. Estadística de precipitaciones mensuales para la estación Rodelillo. El valor Q80% representa al cuantil del 80% o al cuarto quintil de la distribución de datos.....	22
Tabla 9. Resumen de eventos de precipitación relacionados con los deslizamientos ocurridos en 2023. Información recopilada de Naranjo (en preparación) y Vismet. (*) Al considerar una duración de 24 horas para la tormenta del de 22 de agosto, el monto acumulado alcanza 80,2 mm y una intensidad media de 3,34 mm/h. ....	23
Tabla 10. Análisis de frecuencia de precipitación máxima en 24 h. para estaciones cercanas al área de estudio. Tomado de DOH (2019).....	25
Tabla 11. Distribución de datos de EVP diaria según mes. Fuente. Camels-CR2.....	26
Tabla 12. Distribución de valores de EVP acumulada según mes. Fuente. Camels-CR2. ....	26
Tabla 13. Ensayos de Permeabilidad Porchet realizados en el área de estudio.....	37
Tabla 14. Catastro de expedientes de derechos de aguas subterráneas concedidos y denegados con parámetros hidráulicos obtenidos de la reinterpretación de los registros de pruebas hidráulicas presentadas. ....	44
Tabla 15. Catastro de puntos de agua con niveles piezométricos.....	46
Tabla 16. Valor del coeficiente CN por tipo de cobertura en áreas urbanas. ....	49
Tabla 17. Valor del coeficiente CN por tipo de cobertura en áreas no urbanas. ....	49
Tabla 18. Estimación de valor CN ponderado por uso de suelo. ....	50

Tabla 19. Almacenamiento y umbral de escorrentía obtenidos mediante el método Curva Numero para la subcuenca Concón-Reñaca.....	50
Tabla 20. Estimación de escorrentía directa, y estimación de la disminución en la infiltración efectiva respecto al caso sin urbanización para eventos como el de agosto 2023 y eventos de recurrencia centenaria.....	51
Tabla 21. Estimación de la recarga por precipitaciones en la condición pre- urbanización, condición actual en escenario optimista, y condición actual considerando la disminución de precipitaciones de los últimos 15 años (mega sequia).....	51
Tabla 22. Derechos subterráneos solicitados en la subcuenca hidrogeológica. ....	52
Tabla 23. Caudales y derechos superficiales otorgados en vertientes de la subcuenca hidrogeológica. ....	52
Tabla 24. Estimación del Balance Hídrico de la cuenca hidrogeológica. ....	53

## 1. INTRODUCCIÓN

En la región de Valparaíso, las dunas de Concón corresponden a elementos geomorfológicos característicos del paisaje existente entre punta Concón y Punta Montemar, al norte de la ciudad de Viña del Mar. Paskoff *et al.*, (2002), describe a las dunas de Concón como un campo de dunas colgadas en una terraza litoral solevantada, que presentan la originalidad de “*no estar siendo alimentadas en arena desde una playa, sino que están separadas del mar por un acantilado y un estrán rocoso*”. Las condiciones climáticas dominantes desde los 4.000 años A.P, favorecieron la estabilización de las dunas bajo una cubierta vegetal de tipo matorral (Paskoff *et al.*, 2002). Las actividades humanas son las principales responsables de la reactivación parcial de los procesos eólicos que originan dunas vivas, y le dan un valor escénico singular al paisaje litoral. Los aportes de diversos estudios (Castro y Andrade, 1990; Araya, 1997) han servido de fundamentación para declarar santuario de la naturaleza a dos sectores de estas dunas por el DS 481 del 5 de agosto de 1993.

A partir de antecedentes paleoclimáticos se ha planteado la posibilidad de que el campo dunar haya sido completamente estabilizado por vegetación debido a condiciones climáticas favorables previo al inicio de la intervención antrópica en tiempos de la colonia (Paskoff *et al.*, 2002). A través de fotografías aéreas e imágenes satelitales es posible establecer un significativo aumento de la urbanización del sector a partir de 1990. Tal aumento de la población impulsa la demanda de servicios públicos y la consecuente construcción de calles, red de agua potable, alcantarillados, y de colectores de aguas lluvia.

La progresiva urbanización del territorio ha tenido como consecuencia un rápido cambio en las características de la cobertura del suelo. Esto ha producido una alteración significativa a los beneficios ambientales de las dunas descritos por Falcón y Valdés (2012) y sobre la componente hidrológica e hidrogeológica al modificar la escorrentía superficial alterando los procesos de recarga de las aguas subterráneas.

Por otra parte, la expansión urbana también se ha desarrollado sobre el límite occidental de la terraza formado por un pronunciado escarpe. En el estudio de caracterización de los peligros geológicos el borde costero entre Valparaíso y Concón (Lépez *et al.*, 2005), se categoriza al sector de dunas activas como zona de alto peligro de remociones en masa, mientras que el resto sector de escarpado fue clasificado en zonas de peligro moderado y alto según la pendiente topográfica existente. En los últimos años, la infraestructura construida en estos sectores ha sido afectada por desplazamiento de grandes volúmenes de arena que causaron grandes pérdidas

económicas y han tenido el potencial de poner en riesgo la vida de los habitantes (Gajardo *et al.*, 2010). En un informe de Asistencia Técnica elaborado por Gajardo *et al.*, (2010) se indica que algunos casos de deslizamientos de volúmenes importantes de arena durante el terremoto del Maule (2010) fueron causados por la saturación de la arena debido a la ruptura de matrices de agua potable.

Durante dos eventos meteorológicos ocurridos en agosto y septiembre de 2023, se producen fallas en la tubería de descarga principal de la red de aguas lluvia sobre el escarpe de la terraza. El flujo de agua sin contención generó la movilización de cerca de 25.000 m<sup>3</sup> de arena lo que obligó a emitir una alarma de evacuación en 3 edificios residenciales del sector e inhabilitó durante meses el tránsito por Avenida Borgoño, una de las vías principal que conecta Viña del Mar y Concón.

Estos eventos ponen en evidencia la necesidad de diseñar soluciones urbanas que potencien la resiliencia de los asentamientos costeros frente a fenómenos naturales. Para analizar con mayor profundidad los efectos de la intervención urbana es indispensable un mayor conocimiento sobre las componentes ambientales, específicamente el cambio en el régimen hidrológico e hidrogeológico, y la identificación y caracterización de los peligros geológicos.

El presente trabajo tiene por objetivo caracterizar la componente hidrogeológica en el sector aterrizado entre Concón y Viña del Mar y proponer una evaluación conceptual de soluciones alternativas para el manejo de aguas lluvias basadas en métodos de recarga artificial de acuíferos.

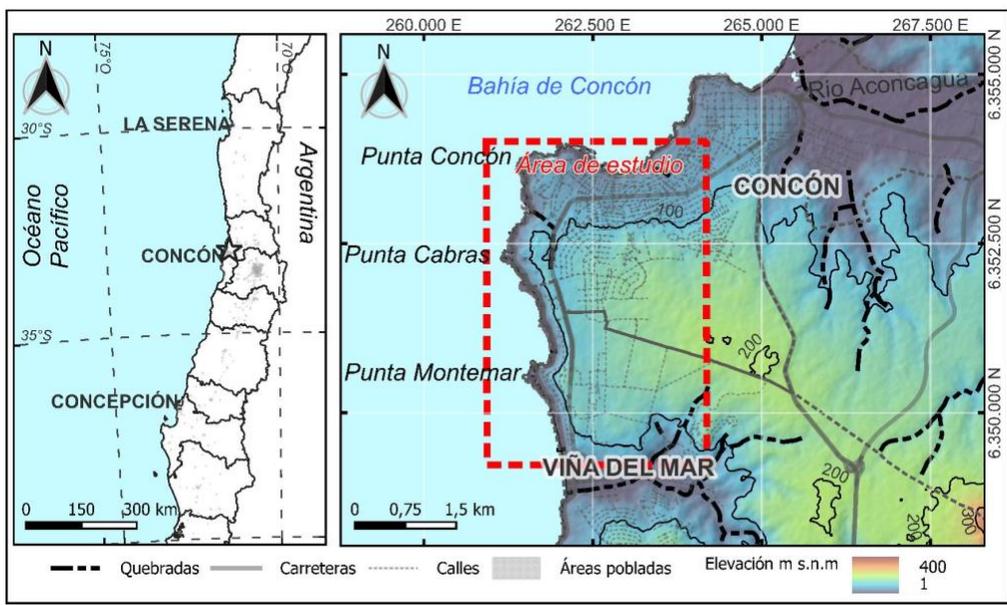


FIG. 1. Mapa de ubicación área de estudio.

## 2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo la caracterización hidrogeológica del sector de las dunas de Concón (Fig. 1) se llevaron a cabo numerosas campañas de terreno por parte de diferentes unidades que componen la Subdirección Nacional de Geología del Sernageomin.

En primera instancia, y como labores propias de la unidad de asistencias técnicas y emergencias geológicas, se realizó una primera inspección en terreno de la cual se derivan minutas técnicas para cada evento ocurrido. Posteriormente, se desarrolla un informe que integra la información recopilada durante las primeras semanas de la emergencia, denominado “Informe Socavones Concón-Reñaca, agosto-septiembre 2023” (Naranjo, en preparación).

Luego, con el uso de equipos cartográficos tales como drones y estaciones totales GPS se llevó a cabo un levantamiento fotogramétrico detallado y recurrente en el tiempo sobre el área afectada por los deslizamientos de material. Además, se confeccionó un modelo de elevación digital de terreno mediante la misma técnica, la cual abarcó un área de 7,65 km<sup>2</sup>, logrando una resolución de hasta 15 cm/pp.

A partir de los modelos construidos fue posible generar nueva cartografía sobre los límites de las áreas de drenaje, redes de drenaje superficial y zonas de acumulación de agua. Además, a partir de este modelo de elevación fue posible determinar la cota de pozos y sondajes presentes en las diferentes fuentes de información.

Por otra parte, el departamento de geología regional del Sernageomin, llevó a cabo una descripción estratigráfica detallada de los taludes expuestos en las cárcavas resultantes de los eventos de deslizamiento ocurridos en agosto y septiembre de 2023, identificando unidades estratigráficas correlacionables a las unidades formales definidas en la literatura. Esta caracterización fue utilizada para definición de unidades hidrogeológica en este trabajo.

Finalmente, este estudio incluye información geofísica levantada por Sernageomin utilizando gravimetría para la caracterización de unidades según la densidad del material que compone la geología del sector. Tal información es incluida como un capítulo del presente informe. A partir de los perfiles gravimétricos construidos fue posible modelar las unidades gravimétricas y mejorar la interpretación de las secciones hidrogeológicas construidas.

## 2.1 Fuente de información

Para caracterizar hidrogeológicamente los depósitos presentes en el sector comprendido entre Concón y Reñaca se utilizaron estudios de mecánica de suelos elaborados en el contexto del desarrollo inmobiliario. Estos estudios son visados y archivados por la Dirección de Obras Municipales correspondiente, y es posible solicitarlos mediante ley de transparencia.

Los informes de mecánica de suelos incluyen una descripción de cada sitio constructivo donde se caracteriza la estratigrafía, granulometría, nivel de compactación, densidad, conductividad hidráulica, profundidad del nivel freático, para diferentes horizontes estratigráficos. Muchos de estos parámetros son medidos in situ a través de exploración directa en calicatas, sondajes geotécnicos, ensayos de cono dinámico, test de penetración estándar (SPT) y ensayos de permeabilidad tipo Porchet.

Por otra parte, se consideró información contenida en los expedientes de solicitud de aprovechamiento de aguas subterránea que se encuentran disponibles en la base de datos pública de la Dirección General de Aguas (DGA). Esta información incluye estratigrafía, habilitación, niveles piezométricos y registro de ensayos de bombeo de gasto constante y gasto variable. En general los pozos de agua subterránea corresponden a las obras de prospección más profundas en el sector y en la mayoría de los casos alcanzan las unidades de roca bajo los depósitos sedimentarios.

En la FIG. 2 se presenta la ubicación de las exploraciones geotécnicas recopiladas en este estudio a partir de las cuales fueron caracterizadas las unidades hidrogeológicas de este estudio.

Por otra parte, la recopilación de información consideró el análisis y tratamiento de la información de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio. Adicionalmente, para este informe se utilizó información estadística y georreferenciada presentada en el informe “Plan maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias de Concón, Región de Valparaíso” (DOH, 2019) solicitado por la Dirección de Obras Hidráulicas a una empresa consultora especialista.

Para el análisis cartográfico se utilizó información levantada en diferentes campañas de vuelo de dron realizadas por Sernageomin, en conjunto de modelos de elevación digital de uso público e información georreferenciada disponible en IDE y otras plataformas públicas.

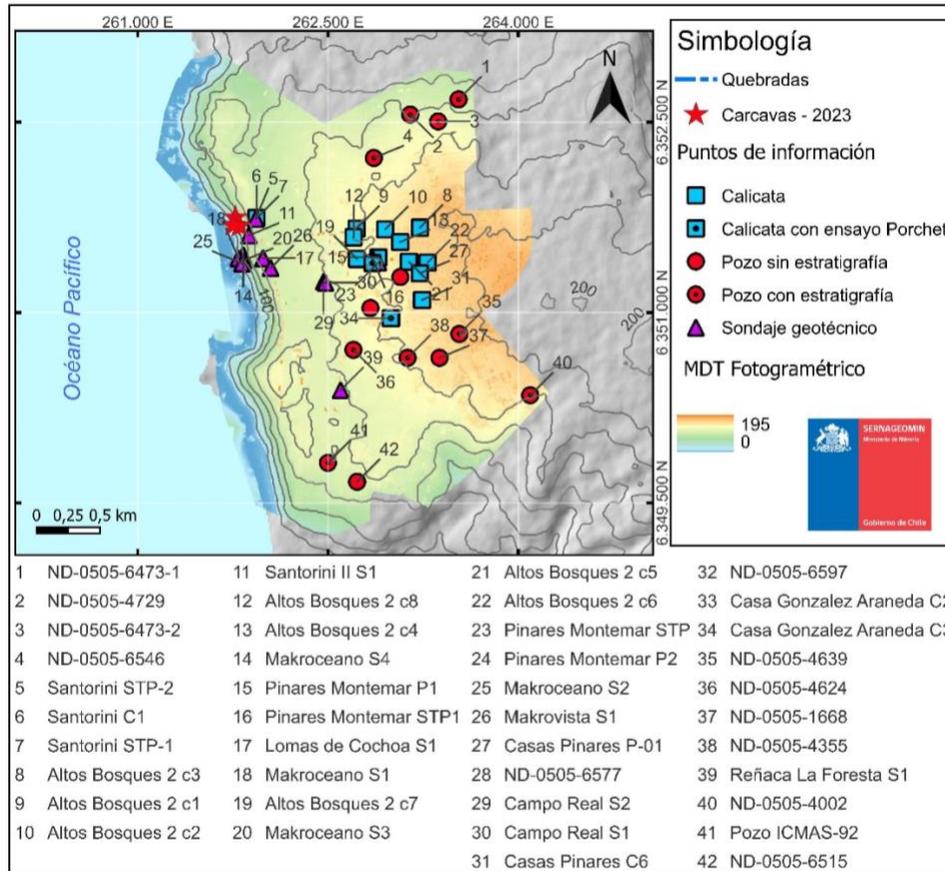


FIG. 2. Ubicación de los puntos con información geológica respecto a las cárcavas generadas en 2023 y la extensión del Modelo de Elevación Digital de Terreno (MDT) levantado por la unidad de cartografía del Sernageomin.

### 3. LEVANTAMIENTO CARTOGRÁFICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

La creación de un modelo de elevación digital de terreno detallado del área de estudio responde a la necesidad de contar con una topografía lo suficientemente detallada para generar la delimitación de la cuenca. Por otro lado, el análisis de este insumo fue necesario para cubicar los volúmenes desplazados a raíz de los eventos de agosto y septiembre de 2023, además de permitir el seguimiento temporal de las cárcavas y la evolución de los bordes del talud generado.

Mediante el vuelo de drones conectados a una red GPS local, definida por una estación total GNS, y el pos-procesamiento de las imágenes se generó un modelo de elevación digital de terreno que alcanzó 15 cm/pp de resolución y de una extensión de 7,65 km<sup>2</sup> (FIG. 2). En el sector de los deslizamientos, se desarrolló un modelo a menor escala que permitió estimar en 24.240 m<sup>3</sup> el volumen total de material desplazado entre las tres cárcavas generadas (Tabla 1).

Tabla 1. Volúmenes de deslizamientos.

Forma	Volumen (m <sup>3</sup> )
Cárcava Norte	14.865
Cárcava Sur 1	531
Cárcava Sur 2	2.042
Cárcava Sur 3	6.801
<b>Total</b>	<b>24.239</b>

#### MODELOS DIGITALES DE TERRENO DEL SECTOR AFECTADO

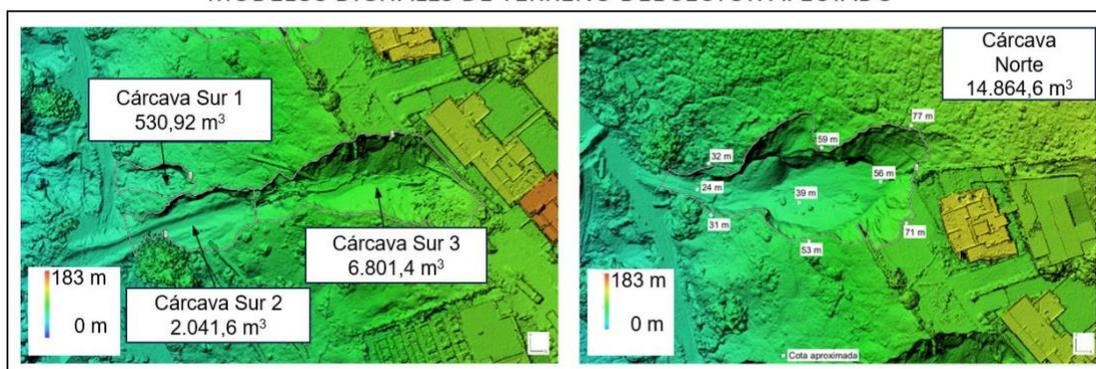


FIG. 3. Modelo de Elevación Digital de Terreno generado para la estimación del volumen de material desplazado.

Por otra parte, el análisis temporal de los modelos fotogramétricos permitió definir la evolución del coronamiento de los taludes generados. Así fue posible determinar que

hasta el 8 de enero de 2024 los bordes de las cárcavas continuaban avanzando pendiente arriba (FIG. 4), mostrando la que el talud aún no se ha estabilizado.

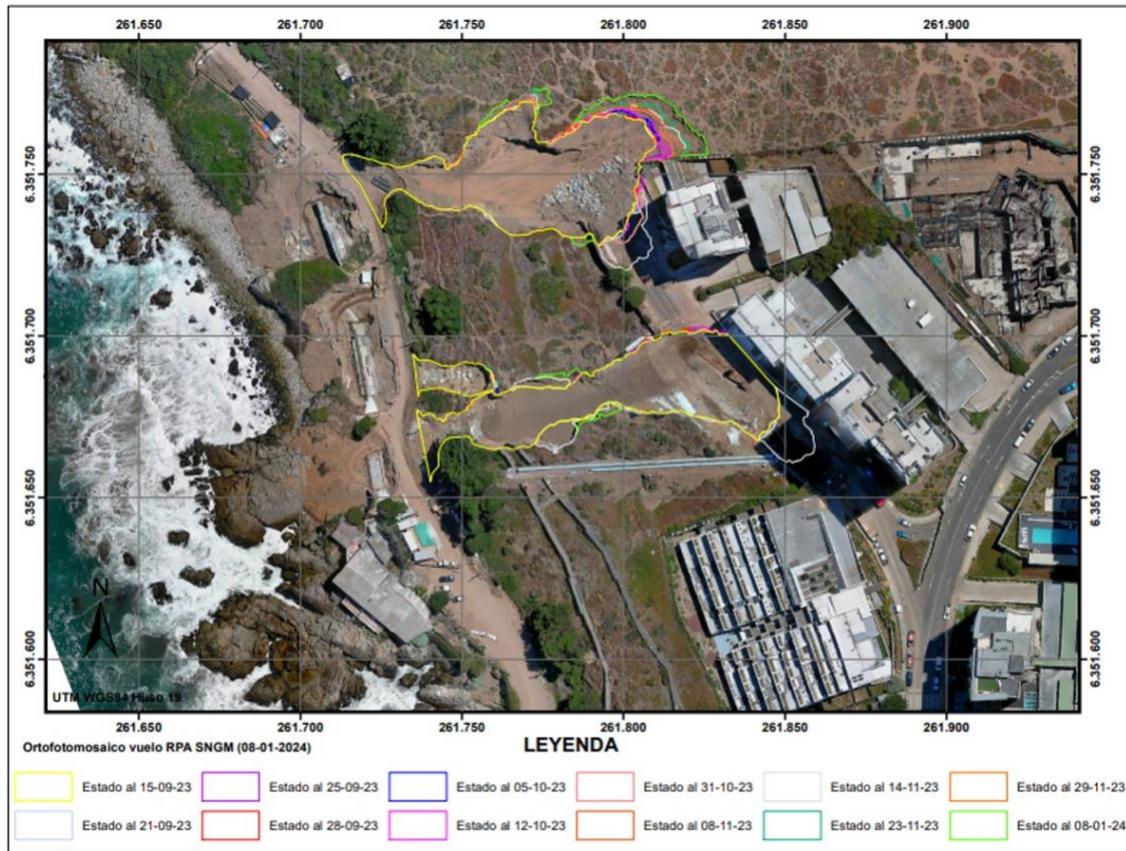


FIG. 4. Avance del borde del talud de las cárcavas hasta el 8 de noviembre de 2023. La imagen de fondo corresponde a una ortofoto tomada el 15-09-2023.

Finalmente, mediante el procesamiento del modelo de elevación digital de terreno fue posible definir un límite de la subcuenca, área de drenaje y la red de drenaje que evacúa a través del sector donde se produjo el deslizamiento. Para esto se re muestreó a una resolución de 1 m/píxel para disminuir el tiempo de procesamiento. El área de drenaje para efectos de este trabajo se denominó Subcuenca Reñaca-Concón.

## **4. GEOLOGÍA DEL SECTOR DEL CAMPO DUNAR ENTRE CONCÓN Y REÑACA**

La geología del sector aterrazado entre Concón y Reñaca condiciona el comportamiento geotécnico e hidrogeológico del área. El registro estratigráfico de los sedimentos expuestos en los taludes de la terraza ha permitido interpretar los ambientes sedimentarios y asignar los depósitos arenosos a las formaciones geológicas definidas en la literatura. A grandes rasgos, los depósitos sedimentarios se disponen sobre la Unidad Cochoa (Rivano, 1993) las que corresponden a rocas intrusivas de edad paleozoica. Los depósitos sedimentarios fueron clasificados en dos grupos con contenido de finos muy diferentes y correlacionadas a la formación Horcón y a la unidad de sedimentos eólicos y litorales actuales o recientes (González, en preparación).

### **4.1 Geología regional**

#### **SEDIMENTOS EÓLICOS Y LITORALES ACTUALES O RECIENTES (Qel) Cuaternario**

(Rivano *et al.* 1993, emend. Cuevas, 2017, modificado de González (en preparación)).

En el área de estudio las dunas de Concón corresponden a la unidad de dunas recientes o dunas colgantes definida por Rivano *et al.* (1993) cuya base se encuentra a una altura aproximada de 45 m s.n.m (Gonzalez, en preparación). Rivano *et al.* (1993) incluyen las dunas de Concón dentro de la unidad Sedimentos eólicos antiguos o paleodunas (PQd) mientras que Cuevas (2017) las incluye dentro de los Sedimentos eólicos y litorales actuales o recientes (Qel) (Gonzalez, en preparación).

Las dunas de Concón se extienden desde Punta Concón por el norte, hasta poco más al sur de Punta Montemar, con una longitud máxima de 3,74 km, y un ancho promedio de 0,3 km. Actualmente, la mayor parte de su superficie se encuentra urbanizada, mientras que solo el campo dunar activo al este de Punta Cabras se encuentra sin intervención urbanística (Falcón y Valdés, 2012).

En el área de estudio, esta unidad sobrepasaría los 80 m de espesor, alcanzando alturas de hasta 128 m s.n.m. en el sector del campo dunar activo, disminuyendo progresivamente su espesor hacia los límites de su extensión. Los depósitos arenosos forman la superficie actual del terreno y sobreyacen en contacto erosivo a depósitos asignados a la Formación Horcón (González, en preparación). Esta unidad corresponde a arenas pobremente consolidadas, con aparentemente buena selección y estratificación cruzada (posiblemente de bajo ángulo). Hacia los niveles inferiores no se observa un cambio sedimentológico, pero sí de disposición de los estratos, con

estratificación cruzada de alto ángulo en sets de 2 a 4 m de espesor y cambios direccionales (González, en preparación).

Geológicamente, las dunas de Concón corresponden a depósitos de arenas pardas de grano medio, bien seleccionadas y poco consolidadas (Gonzalez, en preparación). Paskoff *et al.* (2002) indica un tamaño de grano fino con una mediana de (0,12 a 0,13 mm) con una muy buena clasificación, presentado curvas granulométricas con valores de  $S_0$  próximos a 1,1-1,2. Petrográficamente, los depósitos corresponden a arenas feldespáticas con proporción similar de líticos y granos monominerales, entre los que predominan el cuarzo y las plagioclasas con menor cantidad de ortoclasa, microclina, anfíbolos, piroxenos, epidota y clorita. Los granos de cuarzo se presentan con bordes angulosos a sub angulosos (Paskoff *et al.*, 2002)

Paskoff *et al.*, (2002) sugiere una proveniencia local de las arenas que forman las dunas, sin embargo, Rivano *et al.* (1993) atribuye el principal aporte sedimentario al río Aconcagua, ubicado 4 km al norte del campo dunar.

### **FORMACIÓN HORCÓN (Mioceno Medio-Pleistoceno Inferior)**

(Thomas, 1958, modificado de Gonzales, en preparación)

Definida originalmente por Thomas (1958) como un conjunto de sedimentos compactados estratificados, que afloran en los acantilados costeros entre Caleta Horcón y Maitencillo y que se extienden hasta los pies de los cerros de Puchuncaví (Thomas, 1958; Cuevas, 2017). Posteriormente Rivano *et al.* (1993) sugieren incluir dentro de esta formación a los sedimentos litorales que forman parte del acantilado costero entre Viña del Mar y Concón. Esta unidad se encuentra depositada en inconformidad sobre los granitoides paleozoicos pertenecientes a la Unidad Cochoa (Pzc) y engrana lateralmente con la Formación Confluencia (Mioceno-Plioceno) (Rivano *et al.*, 1993). El techo subyace en discordancia erosiva a depósitos aluviales y paleodunas de edad pleistocena/holocena (Thomas 1958; Álvarez, 1963).

En el área de estudio, los depósitos asociados a esta formación subyacen a los depósitos de las dunas de Concón, su extensión mínima es a lo menos equivalente a la de las dunas y descansan en discordancia sobre las rocas de la Unidad Cochoa (González, en preparación). Al sur de Punta Cabras los depósitos alcanzan un espesor de 40 m y están compuestos por intercalaciones de arenas de tamaño de grano medio a grueso poco a semi consolidadas de composición cuarzo feldespática y, bien a moderadamente seleccionadas. Las arenas presentan intercalaciones centimétricas de

arenas finas a limosas, graduando hacia el techo a arenas finas a medias con intercalaciones de arenas limosas o arcillosas (González, en preparación).

### **Unidad Cochoa (Carbonífero superior)**

(Rivano *et al.*, 1993 en Cuevas, 2017)

Las rocas intrusivas que afloran entre Concón y Reñaca corresponden a tonalitas gnéissicas, granodioritas, monzogranitos y granitos de anfíbola y biotita, granitos, sienogranitos y pegmatitas de microclina, con inclusiones dioríticas a diorítica-cuarcíferas y enclaves máficos que están intruidos por abundantes filones máficos afaníticos o de grano medio de orientación NO y sub paralelos o sub verticales de composición diorítica. Las rocas tienen carácter calcoalcalino con 65-80% de SiO<sub>2</sub>, metaluminosas a peraluminosas, principalmente tipo I y tipo S en menor proporción.

## **4.2 Estratigrafía detallada del sector afectado por el deslizamiento**

De las paredes de la cárcava norte y de un afloramiento de areniscas en avenida Borgoño, se logró agrupar los niveles observados en 4 asociaciones de facies, posteriormente interpretadas como 4 ambientes depositacionales, que en conjunto corresponden a un ambiente regresivo que gradúa desde depósitos de frente de playa en la base, a un ambiente deltaico y posteriormente a un ambiente continental eólico en la parte alta (González, en preparación). La descripción detallada de cada ambiente depositacional se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de los ambientes depositacionales definidos.

Ambiente depositacional	Descripción
AD1	Conformado por un mínimo de 20 m (niveles I, J y K; FIG. 5), de intercalaciones de areniscas de color pardo grisáceo a pardo anaranjado, poco a semi consolidadas de composición cuarzo feldespática y tamaño de grano medio a grueso, bien a moderadamente seleccionadas. Estos paquetes de areniscas presentan estratificación plana, ondulosa y cruzada de bajo ángulo, y presentan en su base intercalaciones de 5-10 cm de arenas gravosas con guijarros de hasta 1 cm. Están depositadas por sobre los granitoides paleozoicos de la Unidad Cochoa. Para esta unidad se interpreta un ambiente de plataforma continental de mediana energía, posiblemente asociado al frente playa superior y se correlaciona con la Asociación de Facies 1 descrita por Fernández (2020).
AD2	Conformado por 8,5 m de areniscas medias a gruesas, de color gris oscuro (niveles G y H; FIG. 5), presenta estratificación cruzada de bajo ángulo en el techo y estratificación cruzada sigmoidal en la base. En la parte basal presenta intercalaciones centimétricas de areniscas finas a limosas, que representan intermitencia de periodos de baja energía, laminación convoluta y calcos de carga. En este contexto, la laminación convoluta es atribuible a niveles finos subyacentes que actúan como planos de despegue y altas pendientes para la formación de esta. Debido a la presencia de laminación sigmoidal y periodos de poca descarga intermitentes (laminas finas de limos), esta unidad es interpretada como depósitos distales de frente deltaico y se correlaciona con la Asociación de Facies 3 descrita en Fernández (2020).
AD3	Arenas finas a medias, con intercalaciones de arenas limosas (o arcillosas), estratificación plana a cruzada de bajo ángulo y laminación ondulosa. Posee una potencia de 5 m (Nivel F; FIG. 5) y es interpretado como depósitos de llanura deltaica. Posiblemente asociados a un <i>lagoon</i> o llanura de inundación. Se correlaciona lateralmente con los depósitos de <i>backshore</i> descritos por Fernández (2020) en la localidad de Playa Luna Norte.
AD4	Conformada por un mínimo de 13 m, y corresponder a la parte alta de la sucesión e incluye a los niveles A, B, C, D y E (FIG. 5), que subyacen a las dunas activas del campo dunar de Concón. Este nivel se caracteriza por la presencia de estratos lenticulares de arenas pardas poco consolidadas de grano medio, bien seleccionadas con estratificación cruzada planar en sets de 2 a 3 m, de dirección variable. Se encuentra depositada de manera erosiva sobre AF2 y es interpretado como un ambiente continental de dunas eólicas y asociado a la unidad Depósitos eólicos y litorales actuales o recientes (Cuevas, 2017).

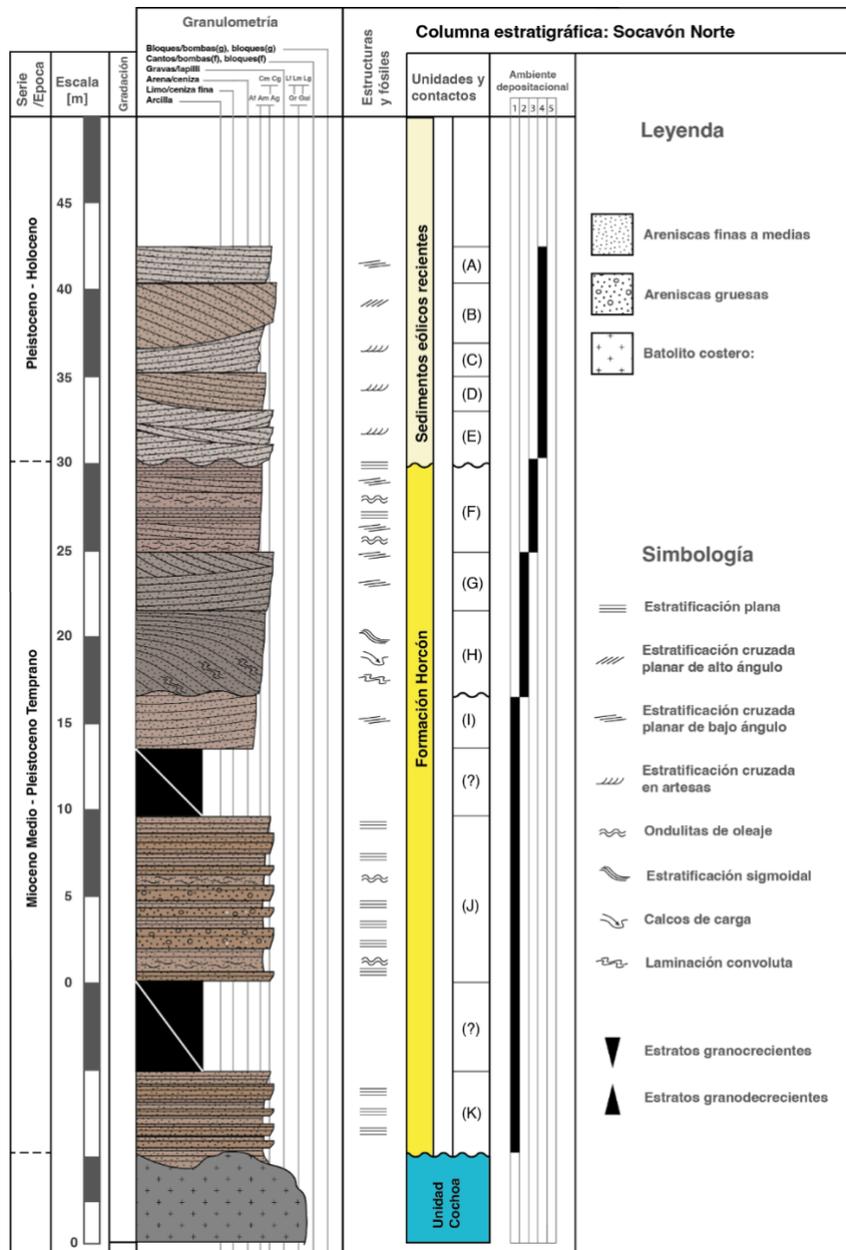


FIG. 5. Columna estratigráfica del sector de Cárcava 1. Tomado de Gonzáles, en preparación.

## 5. HIDROLOGÍA Y USO DE SUELO DEL SECTOR DE LAS DUNAS DE CONCÓN.

El sector aterrizado entre Reñaca y Concón se ha visto sujeto a una urbanización acelerada a partir del año 1985. A través de imágenes satelitales históricas es posible observar que, en ese año, la mayor parte de la superficie del sector aterrizado estaba cubierta por vegetación de tipo matorral o bosques, mientras que la superficie del campo dunar activo era mayor a la actual (FIG. 5). Consecuentemente, hacia el año 2023

aumenta significativamente la superficie cubierta por calles, veredas, edificios, casas y estacionamientos afectando considerablemente la capacidad de infiltración y así el régimen hidrológico que se desarrollaba de forma natural.

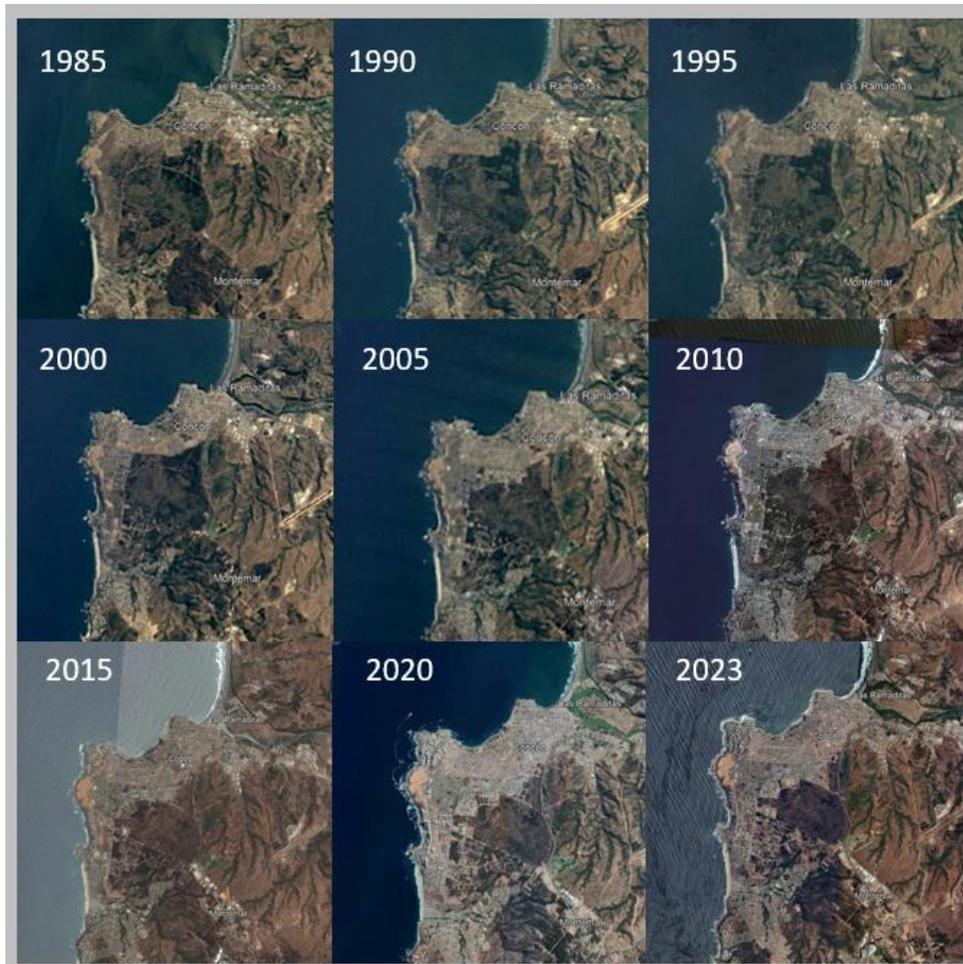


FIG. 6. Serie temporal de imágenes satelitales en donde se observa la evolución de la urbanización en el sector de las dunas de Cancún.

La ausencia de una red de drenaje bien desarrollada en el área indica que la vegetación y la geología del sector favorecía la infiltración de las precipitaciones, y un elevado umbral de capacidad de abstracción de agua antes de producirse escorrentía. Así también, es muy probable que previo a la urbanización, frente a fenómenos de precipitación de recurrencia centenaria o milenaria, el agua se acumulara en depresiones topográficas locales, para luego infiltrarse hacia las unidades que conforman el acuífero del sector. Mediante el mapeo de la superficie actual del terreno, se definieron 7 unidades de cobertura (FIG. 7): urbano, bosques y matorrales, matorrales y sin vegetación, calle, áreas verdes, afloramientos rocosos y playa. De

estas unidades la superficie urbana, calles y rocas presentan un nivel muy bajo a nulo de capacidad de infiltración.

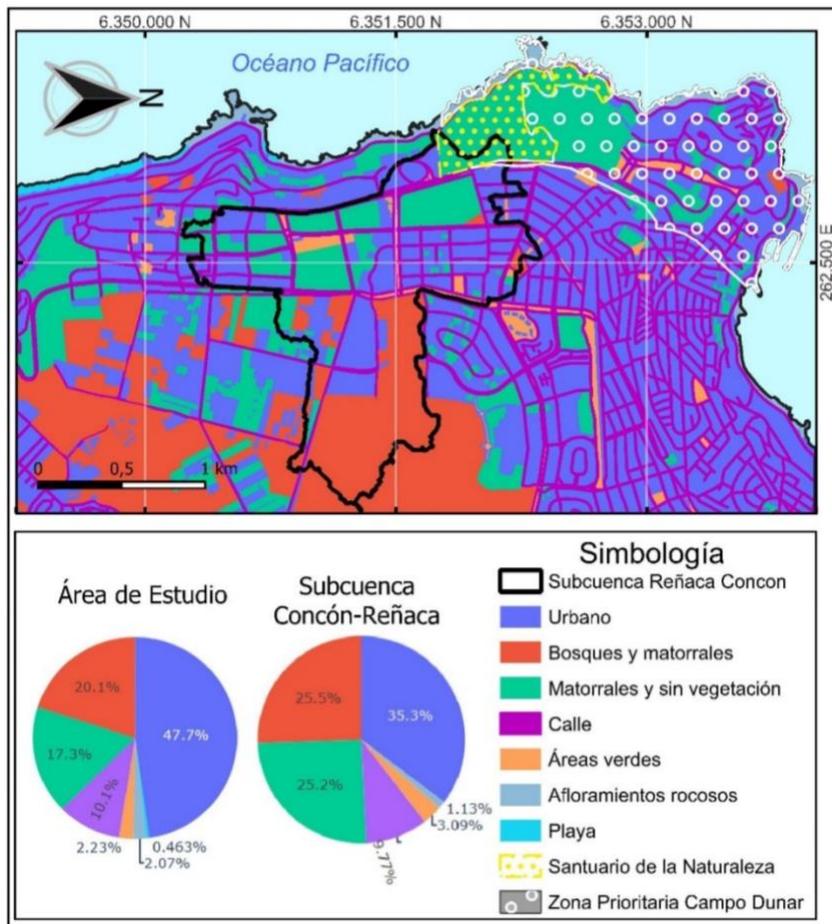


FIG. 7. Distribución del Uso de Suelo en el área de estudio y la Subcuenca Concón-Reñaca.

En el área de estudio las superficies cubiertas por las unidades menos permeables (urbano y calle) alcanzan un 57%, mientras que al reducir el dominio solo al área de la cuenca que drena hacia el sector del deslizamiento, esta cobertura se reduce a un 45% (Tabla 3). Las áreas verdes, por otra parte, apenas superan el 2 y el 3% de la cobertura respectivamente. De continuar las políticas de crecimiento actuales, el desarrollo inmobiliario en la subcuenca aún tiene potencial de seguir disminuyendo el área infiltrante y en consecuencia, aumentar la escorrentía ante fenómenos meteorológicos.

Tabla 3. Detalle en la distribución del uso de suelo en el área de estudio y la subcuenca Concón-Reñaca

Uso de suelo	Área de estudio			Subcuenca Concón Reñaca		
	Área (km <sup>2</sup> )	%	% Acumulado	Área (m <sup>2</sup> )	%	% Acumulado
Urbano	5,6	47,7	47.7	0,8	35,3	35,3
Calle	1,2	10,1	57.8	0,2	9,8	45,1
Bosques y matorrales	2,3	20,1	77.9	0,48	25,5	70,6
Matorrales y sin vegetación	2,0	17,3	95.2	0,5	25,2	95,8
Áreas verdes	0,3	2,2	97.5	0,06	3,1	98,9
Roca	0,2	2,1	99.5	0,01	1,1	100,0
Playa	0,1	0,5	100.0	-	0,0	100,0
Total	11,7	100,0	100	2,05	100,0	100

Al comparar los resultados de la clasificación del tipo de cobertura realizada en este trabajo, la cual consistió en un mapeo mediante imágenes satelitales de las distintas coberturas, con otros métodos de clasificación por imágenes satelitales como el de clasificación supervisada realizado por DOH (2019) se observa una diferencia máxima de un 5% en la cobertura de “matorrales y sin vegetación” (Tabla 4).

Tabla 4. Cobertura de suelo para la subcuenca utilizando método de “Clasificación Supervisada” de una imagen satelital (satélite KOMPSAT-3A) con resolución de 40cm (PAN) 1,6m (MX) por píxel en la subcuenca Las Dunas. Tomado de DOH (2019).

Tipo de cobertura definida en este trabajo	Clasificación supervisada (DOH, 2019)		Cobertura del grupo (%)	Este Trabajo (%)
	Tipo Cobertura	(%)		
Urbano	Techos 1	19,4	46,6	47,7
	Techos 2	27,1		
	Pasto sintético	0,1		
Calles	Pavimento	8,5	8,5	10,1
Bosques y matorrales	Bosque	13,6	18,3	20,1
	Veg. baja vigorosa	4,6		
Matorrales y sin vegetación	Veg. baja emergente	4,9	22,3	17,3
	Arena	7,4		
	Suelo desnudo B	10,1		
Roca, Playa y Áreas Verdes	Suelo desnudo A	4,2	4,2	4,8
	Agua	0,03		
<b>Total</b>		<b>100</b>	<b>100</b>	

El progresivo desarrollo urbano en la subcuenca Reñaca Concón, la ausencia de una red de drenaje natural y la poca pendiente del sector aterrizado hicieron necesaria la construcción de un sistema de evacuación de aguas lluvias (FIG. 8). En este contexto la Dirección de Obras Hidráulicas comandó el desarrollo de un estudio para estimar la capacidad hidráulica del sistema de evacuación y determinar las medidas de optimización de la red, en función del costo y el riesgo (DOH, 2019).

Uno de los alcances relevantes de este informe es la estimación de la sobrecarga del sistema de aguas lluvias solo con la infraestructura existente hasta esa fecha. Es

decir, en el sector de la subcuenca Reñaca-Concón el informe solo considera el sistema de evacuación antes de la incorporación del colector Foresta de la Costa III (FIG. 8). En este contexto, el diagnóstico realizado tras la modelación hidráulica indica que el colector Balaguer Soza con descarga hacia Av. Borgoño en el sector del deslizamiento, alcanza velocidades de flujo de hasta 15,44 m/s debido a la pendiente máxima de 72% o 0,72 según lo que se muestra en la Tabla 5. Para una tormenta de 2 años de retorno y de 12 horas de duración el colector alcanzaría un caudal de descarga de 0,98 m<sup>3</sup>/s.

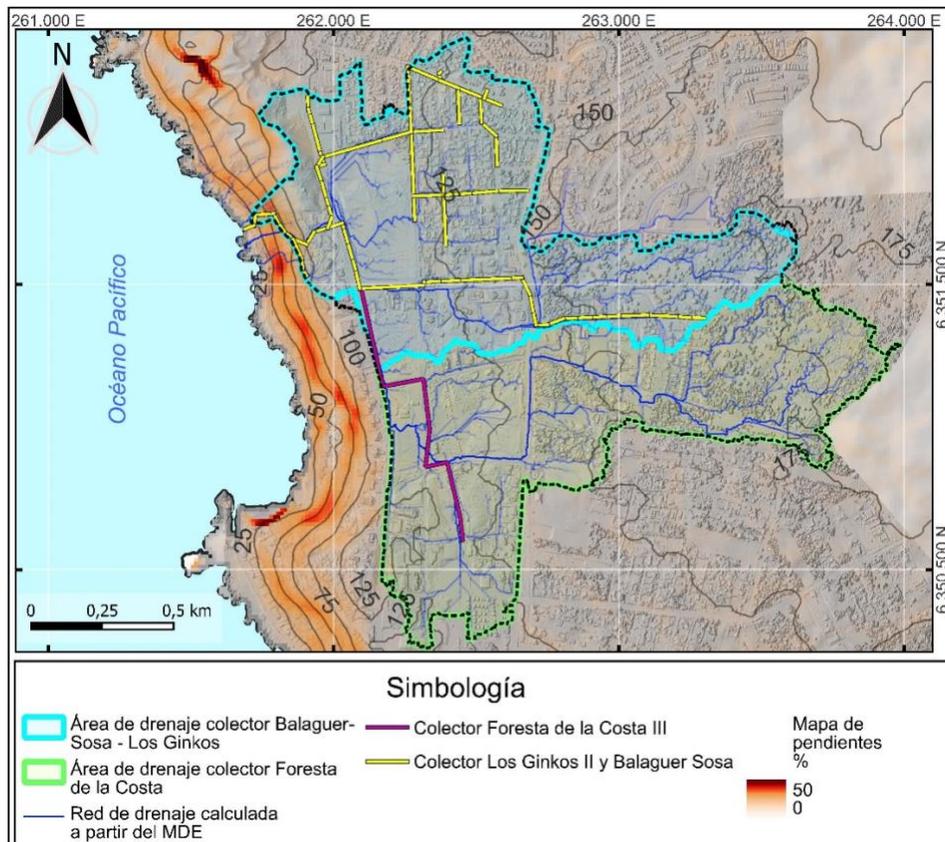


FIG. 8. Mapa de pendientes y área de drenaje de los colectores que conforman la red en la subcuenca Reñaca Concón.

Posterior al año 2019 se incorpora el colector Foresta de la Costa III, aumentando el área de drenaje de la red de aguas lluvias, pasando de 1,05 km<sup>2</sup> a 2,05 km<sup>2</sup>, duplicando la demanda de drenaje a través del colector Balaguer Soza. La red de drenaje se encontraba en condiciones de alta demanda y velocidades de flujo extremas previo a la conexión del colector Foresta de la Costa. Sin embargo, la poca pendiente detrás del campo dunar y la formación de bajos topográficos locales en el sector en donde actualmente se encuentra el supermercado Líder, limitaba la eficacia de la red para drenar las aguas lluvias. Esto generaba a su vez la recurrente inundación del área,

acumulándose una cantidad considerable de agua en calles y estacionamientos subterráneos. Esta deficiencia de la red, no obstante, disminuía el estrés sobre la red en el sector de descarga.

Tabla 5. Extracto del resumen de resultados análisis infraestructura de colectores existentes t=2 años, duración 12 horas. Tomado de DOH, 2019.

ID Modelo SWMM	Colector	Fin	Longitud (m)	Cotas (msnm)	Rango D (mm)	Caudal (m3/s)	h flujo (m)	h/D max	vmax	Rango i
CE-BS-00	Balaguer Sosa	DESCARGA	2004	160,5 - 16,6m; delta=143,9m	800 - 1,200	0,00 - 0,95	0,00 - 0,42	0,35 OK	15,44	0,001 - 0,727
CE-BS-01-01.11	Concon-Reñaca	Balaguer Sosa	496	95,4 - 92,4m; delta=3,0m	600 - 1,000	0,00 - 0,68	0,00 - 0,54	0,68 OK	3,48	0,001 - 0,025
CE-BS-01-12.15	Los Ginkos 2	Concon-Reñaca	472	117,4 - 93,4m; delta=24,0m	800 - 800	0,00 - 0,68	0,06 - 0,45	0,56 OK	3,98	0,016 - 0,111
CE-BS-01-16.17	Bosques de Montemar	los Ginkos 2	309	106,4 - 105,3m; delta=1,1m	600 - 600	0,24 - 0,31	0,37 - 0,37	0,62 OK	1,69	0,001 - 0,003
CE-BS-01-18	Bosques de Montemar Norte	Los Ginkos 2	162	108,9 - 105,3m; delta=3,6m	800 - 800	0,11 - 0,11	0,12 - 0,12	0,15 OK	2,37	0,022 - 0,022
CE-BS-01-19.20	Las Cinerarias - Las Bellotas	Bosques de Montemar	174	115,3 - 106,2m; delta=9,0m	600 - 600	0,07 - 0,07	0,13 - 0,17	0,28 OK	3,02	0,002 - 0,083
CE-BS-01-21	Las Cinerarias Sur	Las Cinerarias - Las Bellotas	174	115,4 - 115,1m; delta=0,4m	600 - 600	0,00 - 0,00	0,00 - 0,00	0,00 OK	0,00	0,002 - 0,002
CE-BS-02	Reñaca Norte	Balaguer Sosa	139	87,3 - 80,5m; delta=6,8m	600 - 600	0,00 - 0,07	0,00 - 0,11	0,19 OK	2,76	0,037 - 0,053

## 5.1 Análisis estadístico de estaciones cercanas

Para la caracterización de las precipitaciones históricas se consideraron los registros de tres estaciones que miden precipitación con frecuencia horaria: Torquemada, Rodelillo, Lago Peñuelas (FIG. 9). De estas, la más cercana corresponde a la estación Torquemada, sin embargo, esta cuenta con registro a partir de octubre de 2013. Por otro lado, las estaciones y Rodelillo Lago Peñuelas tienen un extenso registro, el cual se remontaría al año 1971 y 1974 respectivamente. Por esta razón estas dos últimas permiten tener una estadística más confiable en cuanto a la estimación de precipitaciones medias, máximas y la definición de curvas de intensidad-duración-frecuencia IDF.

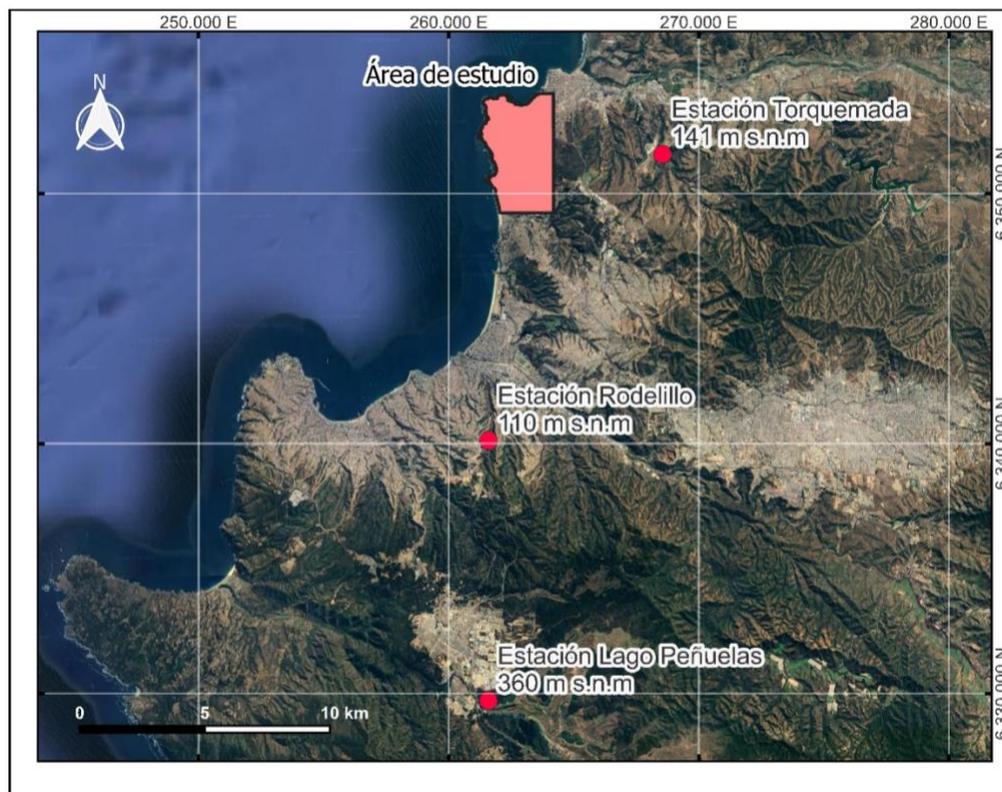


FIG. 9. Ubicación de estaciones meteorológicas analizadas durante este trabajo.

Las estaciones analizadas se ubican a diferente altitud y latitud, a una distancia de 22,01; 11,6 y 6,6 km de la zona afectada por los deslizamientos. Si bien la más cerca al área es la estación Torquemada, la estación más cercana en cota es la estación Rodelillo.

Para caracterizar el régimen de precipitaciones se descargaron los registros de precipitación diaria a partir del año 1971 hasta 2023 de las estaciones Lago Peñuelas y Rodelillo. Para la estación Torquemada se descargó directamente el informe de la estación desde la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) con las precipitaciones acumuladas mensuales entre el año 2013 y 2023. La Tabla 6 muestra la ubicación, distancia al área de estudio y cantidad de datos de precipitación diaria para cada estación si corresponde.

Tabla 6. Estaciones utilizadas para la caracterización de las precipitaciones. \*La estadística de precipitaciones medias anuales de la estación Torquemada se obtuvo de los datos publicados por la DGAC y no se filtró por completitud del registro de datos.

Estación:	Código BNA/ Código Nacional	Altitud (msnm):	UTM Norte (m):	UTM Este (m):	Distancia al área de estudio (km)	Numero de datos
LAGO PEÑUELAS	05510002-0	342	6.329.722	261.586	22,01	16.480
RODELILLO	05510001-2	110	6.340.127	258.696	11,61	15.377
TORQUEMADA	320041	141	6.351.583	268.549	6,62	DGAC*

Para estimar la precipitación media anual se seleccionaron aquellos años que contaban con un registro mínimo del 90% de días, es decir, con 329 o más días de registro en un año calendario. De esta forma la precipitación media anual calculada para la estación Rodelillo, alcanza los 478 mm/año. Considerando que la estación Rodelillo se encuentra 11,6 km al sur del área de estudio, se esperaría que la precipitación media anual fuese de 10 a 20 mm/año mayor que en el área de estudio. Estos resultados fueron comparados con aquellos publicados en el informe “Actualización de la evaluación de los recursos subterráneos de las cuencas costeras de la Vª región” (DGA, 2005). En la Tabla 7 se observa que al extender el periodo de análisis las precipitaciones medias disminuyen significativamente, debido al déficit de precipitaciones entre el 2011 y 2023.

Tabla 7. Precipitación media anual (mm) para las distintas estaciones según el trabajo. \*La estación Torquemada solo cuenta con información entre 2013 y 2023.

Ubicación	1971/74-1987/88 (Valenzuela, 1994 en DGA, 2005)	1974-2023 (Este Trabajo)	2011-2023 (Este Trabajo)
EST. RODELILLO	491	478	339
EST. LAGO PEÑUELAS	619,4	673	488
EST. TORQUEMADA	-	-	285*

El análisis de precipitaciones acumuladas mensuales para la estación Rodelillo se realizó filtrando aquellos meses que tuviesen al menos un 90% de los datos, es decir más de 28 días de registro. El análisis muestra que junio corresponde al mes con mayor precipitación media acumulada (FIG. 10), alcanzando 112,1 mm, mientras que agosto presenta una media histórica de 76,8. Las precipitaciones acumuladas en agosto de 2023

en la estación Torquemada alcanzaron un monto de 125,5 mm, lo que se encuentra por sobre el 80% de los datos históricos de la estación Rodelillo (Tabla 8).

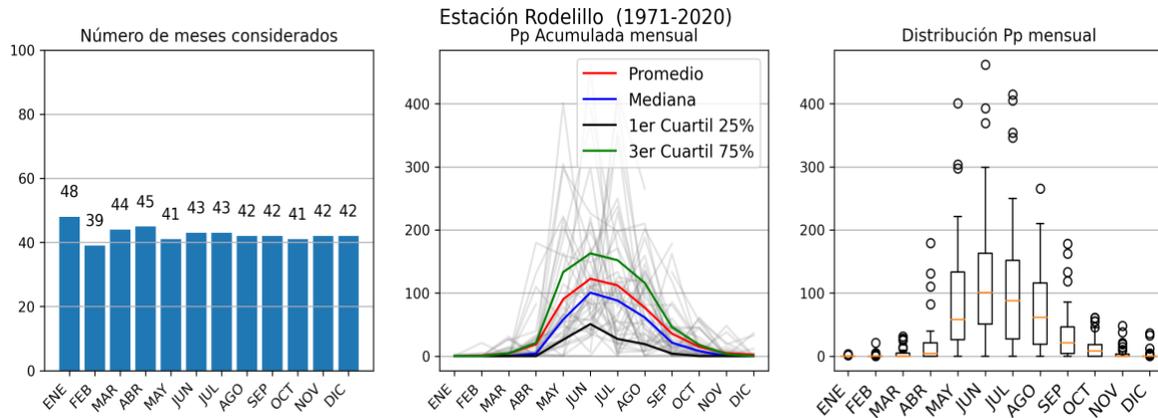


FIG. 10. Distribución de valores mensuales de precipitación acumulada para la estación Rodelillo.

Tabla 8. Estadística de precipitaciones mensuales para la estación Rodelillo. El valor Q80% representa al cuartil del 80% o al cuarto quintil de la distribución de datos.

		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
EST. RODELILLO	Promedio	0,2	0,8	4,4	18,5	90,2	122,6	112,1	76,8	35,6	14,7	4,6	2,2
	Máximo	3,0	21,0	31,0	179,5	401,0	462,0	415,0	265,5	178,0	60,6	48,1	36,0
	Q80%	0,0	0,1	7,2	26,2	159,5	171,0	187,6	127,6	48,1	24,5	6,4	0,5

## 5.2 Análisis de recurrencia de tormentas como la ocurrida en agosto de 2023.

La formación de cárcavas por los deslizamientos ocurridos en Viña del Mar, en 2023 no ocurrieron en un solo evento de precipitación. Como bien se describe en el trabajo “Informe socavones Concón-Reñaca agosto-septiembre 2023” realizado por el departamento de geología Regional de Sernageomin (Naranjo, en preparación), fueron cuatro los eventos de precipitaciones entre agosto y septiembre de 2022, que tuvieron como efecto la movilización de materia desde el escarpe que forma el sector aterrizado de las dunas de Concón. Un quinto evento ocurre el 10 de noviembre de 2023 que movilizó material de las obras de remediación llevadas a cabo por el MOP.

Las dos tormentas principales ocurrieron el 22 de agosto de 2023 y el 10 de septiembre, alcanzando intensidades máximas de 12,9 y 9,2 respectivamente (Tabla 9). Sin embargo, la precipitación acumulada en el primer evento duplicó el del segundo.

Por otro lado, el monto de lluvia acumulada durante el quinto evento fue más similar al segundo evento y alcanzó intensidades máximas de 7,5 mm/hr.

Tabla 9. Resumen de eventos de precipitación relacionados con los deslizamientos ocurridos en 2023. Información recopilada de Naranjo (en preparación) y Vismet. (\*) Al considerar una duración de 24 horas para la tormenta del de 22 de agosto, el monto acumulado alcanza 80,2 mm y una intensidad media de 3,34 mm/h.

Tormentas	Fecha	Duración (horas)	Precipitación acumulada (mm)	Intensidad máxima (mm/hr)	Intensidad media (mm/hr)	Efectos
Tormenta 1	10/08/23	6	34,2	14,9	5,7	Cierre de Av. Borgoño
Tormenta 2	19/08/23	9	5,5	1,7	0,6	Deslizamiento menor
Tormenta 3 (Principal)	22/08/23	19	79,4	12,9	4,17	Evacuación de edificio Kandinsky
		24(*)	80,2(*)	12,9(*)	3,34(*)	
Tormenta 4 (Principal)	10/09/23	9	28,5	9,2	3,16	Evacuación de edificio Miramar.
Tormenta 5	10/11/23	6	27	7,5	3,0	Movilización de material de remediación.

Al analizar la precipitación horaria del tercer evento (22 de agosto de 2023) o del primer evento principal, se observa una variación significativa entre los registros de la estación Torquemada y estación Rodelillo (FIG. 11). La intensidad máxima horaria registrada en Rodelillo fue de solo 2,6 mm/hr, evidenciando el carácter localizado de la tormenta. En ambas estaciones se observa un pulso precursor de precipitaciones, sin embargo, este se dejó fuera del evento de precipitación principal como criterio conservador para el análisis.

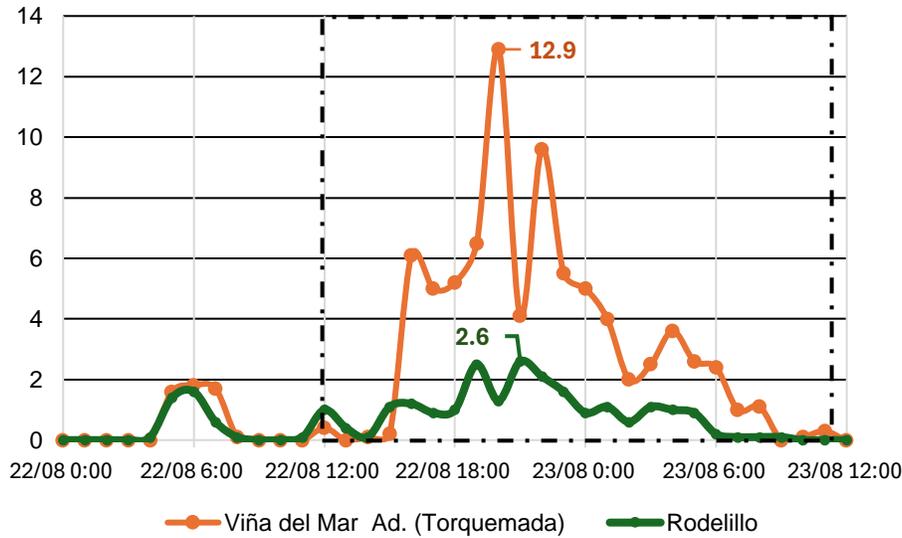


FIG. 11. Precipitaciones horarias para las estaciones Torquemada y Rodelillo durante la tormenta en agosto de 2023. En el recuadro negro se identifica una ventana de 24 horas para el evento principal de precipitación.

Si bien los registros horarios más representativos del evento de precipitación fueron tomados en la estación Torquemada, para contextualizar la recurrencia de una tormenta como esta se utilizan los datos de la estación Rodelillo. Esta estación se ubica 13 km al norte y 31 m por sobre la estación Rodelillo por lo que si bien podrían existir variaciones latitudinales en cuanto las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), la estación Torquemada no cuenta con un registro lo suficientemente extenso que permita generar dicha estadística. La cercanía y similitud de ambas estaciones permitiría asumir que las ambas presentan curvas IDF similares (FIG. 12). Este criterio fue adoptado también por los autores del informe “Plan maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias de Concón”, y validado por la DOH el año 2019.

Si se considera el análisis de frecuencia de precipitación máximo elaborado para la estación Rodelillo por DOH (2019), los 80 mm registrados en la estación Torquemada sería equivalente a una tormenta de entre 2 y 5 años de periodo de retorno (Tabla 10). Dicho de otro modo, la probabilidad de que en 2024 exista un evento de precipitación de similar intensidad es entre un 20 y 50%.

Tabla 10. Análisis de frecuencia de precipitación máxima en 24 h. para estaciones cercanas al área de estudio. Tomado de DOH (2019).

Estación	Distribución adoptada	Precipitación máxima en 24h (mm)						
		T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=20 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años
Rodelillo DGA	Gumbel	73	112	137	161	169	193	216
Lago Peñuelas	Log-Pearson	112,0	159,0	192,0	225,0	235,0	268,0	303,0

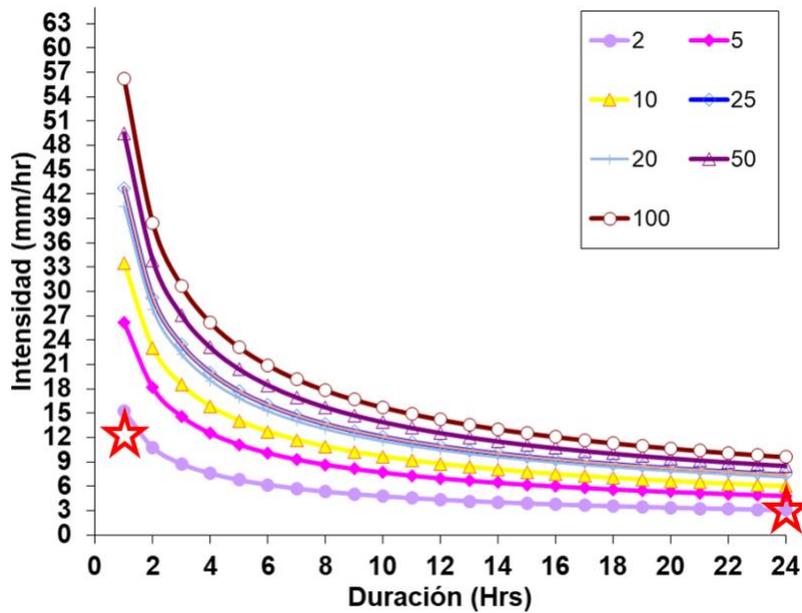


FIG. 12. Curvas IDF método escalamiento estadístico para la estación Rodelillo. Tomado de DOH, 2019. Las intensidades del evento de agosto de 2023 se presentan como estrellas rojas.

### 5.1 Evapotranspiración

La evapotranspiración es la consideración conjunta de los procesos de evaporación y de transpiración. La evaporación ocurre desde la superficie del suelo inmediatamente después de la precipitación, desde las superficies de agua y desde el agua infiltrada que se evapora desde la parte más superficial del suelo. Por otra parte, la transpiración es el fenómeno biológico a través del cual las plantas liberan agua hacia la atmósfera. La evapotranspiración puede ser estimada como evapotranspiración real (ETR) o potencial (ETP). Mientras que la ETR es la que se produce realmente en las condiciones existentes en cada caso, la ETP es la evapotranspiración que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuviesen en condiciones óptimas.

La Evapotranspiración Potencial diaria se obtuvo de los productos de Camels-CR2 (Alvarez-Garretón *et al.*, 2018). Estos cuales calculan una ETP diaria usando imágenes satelitales MODIS y PET, aplicando la fórmula de Hargreaves en los datos grillados de temperatura máxima y mínima diaria, y promediando el resultado dentro de los límites de una cuenca específica.

De las series temporales ofrecidas por la plataforma Camels-CR2, la Cuenca 5320001- Estero Quintero En Valle Alegre es la más similar y cercana en cuanto las condiciones geomorfológicas de la subcuenca Reñaca-Concón (FIG. 13). Para esta subcuenca la serie temporal abarca desde el 1/1/1979 hasta el 1/4/2020.

Tabla 11. Distribución de datos de EVP diaria según mes. Fuente. Camels-CR2

EVP diaria	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
<b>Promedio</b>	5,2	4,8	3,9	2,8	1,9	1,4	1,6	2,2	2,9	3,7	4,5	5,0
<b>Máximo</b>	6,3	6,5	5,4	4,1	3,0	2,1	2,7	3,5	4,9	5,5	6,5	6,2
<b>Mínimo</b>	4,2	4,0	2,7	1,7	1,1	0,9	1,0	1,3	1,7	2,2	2,8	3,6
<b>Desv. Estándar</b>	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,3

Tabla 12. Distribución de valores de EVP acumulada según mes. Fuente. Camels-CR2

EVP Mensual	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
<b>Promedio</b>	159,7	134,4	120,2	83,1	58,0	43,5	49,3	66,8	86,9	115,7	136,1	155,7
<b>Máximo</b>	171,9	141,0	124,2	89,9	64,9	48,9	53,5	73,5	95,9	123,8	149,5	162,4
<b>Mínimo</b>	150,5	129,4	115,0	77,2	53,4	38,1	45,5	61,2	80,4	105,4	129,2	146,0
<b>Desv. Estándar</b>	4,0	3,2	2,0	2,7	2,7	2,6	1,8	2,4	3,6	4,3	4,7	3,4



Cuenca 5320001 - Estero Quintero En Valle Alegre (Lat. -32.79, Lon. -71.42)  
 Área: 129.5 km<sup>2</sup>. Precip. anual media CR2MET: 395 mm. Índice aridez: 2.8  
 Cota (máx., media, punto salida): 1151, 314, 13 m s.n.m.

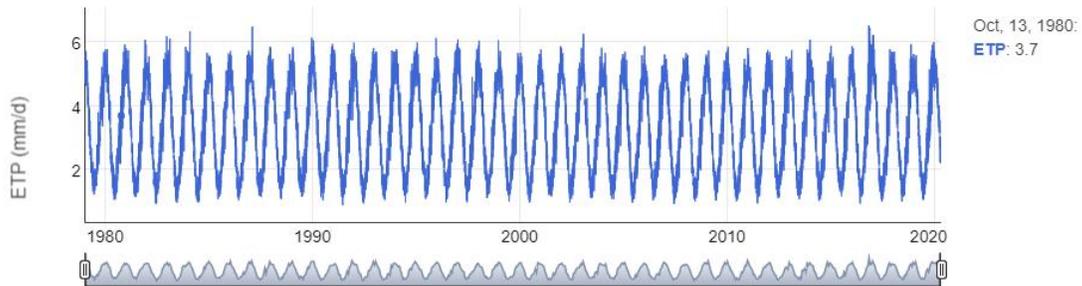


FIG. 13. Subcuenca de disponibilidad de información de EVP diaria en Camels-CR2.

Para la obtención de la evapotranspiración real es posible utilizar los métodos de Turc o de Coutagne los que se basan en fórmulas empíricas obtenidas de la comparación de las precipitaciones y la escorrentía en numerosas cuencas.

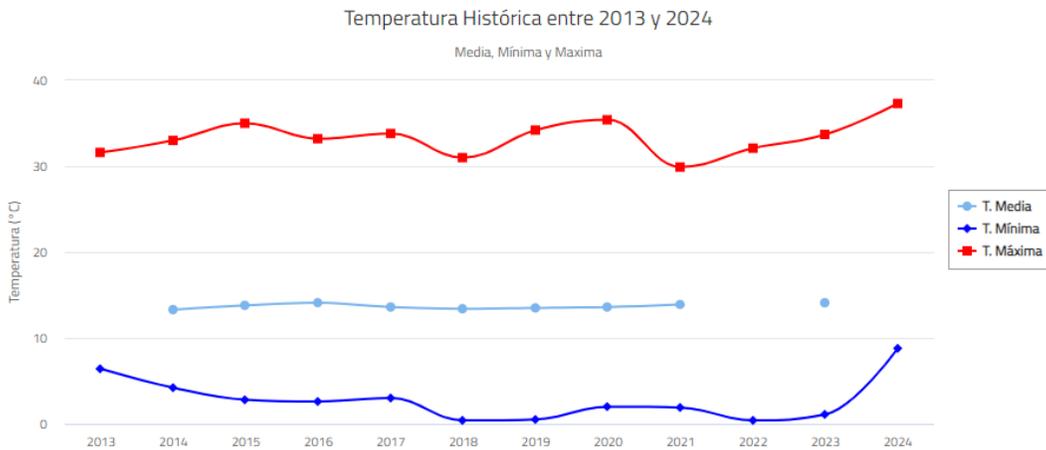


FIG. 14. Temperatura histórica entre 2013 y 2024 en estación Torquemada. Tomado de [www.climatologia.meteochile.gob.cl](http://www.climatologia.meteochile.gob.cl).

Utilizando una temperatura media anual de 13,7 °C registrada en la estación Torquemada entre 2013 y 2024, y las fórmulas de Turc (Ecuación 1) y de Coutagne (Ecuación 2), se obtiene una evapotranspiración real de 422 y 394 mm/año, respectivamente para una condición norma de precipitaciones, mientras que baja a 324 y 297 mm/año, respectivamente en condiciones de sequía.

Ecuación 1: Fórmula de Turc

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Donde:

$P =$  Precipitación en mm/año  
 $L = 300 + 25t + 0,05t^3$   
 $t =$  temperatura media anual en °C

Aplicando la fórmula:

Ecuación 2: Fórmula de Coutagne

$$ETR = P - P^2$$

Donde:

$P =$  Precipitación en m/año  
 $X = \frac{1}{0,8 + 0,14t}$   
 $t =$  temperatura media anual en °C

Aplicando la fórmula:

Condición Normal	Condición Seca	Condición Normal	Condición Seca
$P = 478$ $L = 771,1$ $t = 13,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ $ETR = 421,8\text{ mm/año}$	$P = 339$ $L = 771,1$ $t = 13,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ $ETR = 324,2\text{ mm/año}$	$P = 0,478\text{ m/año}$ $X = 0,379$ $t = 13,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ $ETR = 393,9\text{ mm/año}$	$P = 0,339\text{ m/año}$ $X = 0,379$ $t = 13,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ $ETR = 296,7\text{ mm/año}$

## 6. CAMPAÑA GEOFÍSICA GRAVIMÉTRICA

Para este trabajo, se levantó un total de 373 estaciones gravimétricas, distribuidas en 6 perfiles gravimétricos (ver FIG. 15) con espaciamiento promedio de 30 m aproximadamente. El perfil 1, de orientación norte-sur y levantado en la avenida Concón-Reñaca posee 109 estaciones gravimétricas y extensión aproximada de 3.200 m. Para el perfil 2, de orientación norte-sur, levantado en calle los Pellines, tiene un total de 86 estaciones con extensión aproximada de 2.520 m. Para el perfil 3, cuya orientación es oeste-este ubicado en calle los Ginkos, cuenta con 42 estaciones levantadas y extensión de 1.190 m. Para el perfil 4, cuya orientación es oeste-este y levantado en calle los Medhaos, se contó con 49 estaciones gravimétricas y longitud cercana a los 1.480 m. Por su parte, el perfil 5 de orientación oeste-este posee un total de 42 estaciones levantadas en calle Teresa Hamel norte y una extensión aproximada de 1.160 m. Finalmente, para el perfil 6, de orientación norte-sur se contó con un total de 31 estaciones levantadas en la avenida de Montemar cuya extensión aproximada es

de 890 m, mientras que el perfil 7 de orientación oeste-este cuenta con 14 estaciones levantadas en calle las Bellotas y posee una extensión promedio de 390 m.



FIG. 15. Área de levantamiento de perfiles gravimétricos. Imagen: Esri, Maxer, Earthstar geographics, and the GIS User Community.

El instrumental empleado en el levantamiento de las estaciones gravimétricas fue un gravímetro Scintrex CG-5 de precisión 0,001 mGal. La estación de enlace gravimétrica empleada fue la estación denominada Reñaca, ubicada en Reñaca entre las calles Vicuña Mackenna y Aníbal Pinto (ver FIG. 16) cuyo valor de gravedad relativo es de 979.603,024 mGal y fue creada a través de la transferencia de la estación de gravedad absoluta SHOA (obtenida desde la red internacional de estaciones de

gravedad absoluta BKG, FIG. 17) bajo la técnica de ciclos dobles y triples con gravímetro relativo, para facilitar el levantamiento y la corrección de los datos por deriva instrumental.



FIG. 16. Estación de enlace gravimétrico Reñaca.



FIG. 17. Estación de gravedad absoluta SHOA

Para determinar de manera precisa las componentes verticales y horizontales de la posición, se aplicó la técnica de GNSS diferencial en la obtención de las coordenadas y se consideraron como precisiones aceptables aquellas de valores submétricos. Los equipos utilizados para esta finalidad fueron receptores GNSS marca Trimble modelo R6 y R7 con antena modelo Zephyr; junto con ello se empleó el método estático rápido y frecuencia de muestreo tanto en la base como en el receptor móvil de 1 Hz. Para asegurar precisiones submétricas, los tiempos mínimos de medición para la base fue de 2 horas; en cambio para los receptores móviles fue de 2 minutos a distancias inferiores a los 5 km. En la etapa de postproceso, y para dar a la estación base GNSS la coordenada precisa, se usó el servicio de posicionamiento GNSS en línea Trimble CenterPoint RTXPost-Processing (<https://www.trimblertx.com> (última visita 16/10/2023)). El modelo geoidal empleado fue el EGM2008 (NGA, 2013).

Dado que las mediciones gravimétricas están influidas por efectos dinámicos asociados a errores instrumentales y a variaciones de periodo corto del campo de gravedad (mareas solares y lunares), estas debieron ser sometidas a una serie de correcciones para su interpretación. Las primeras de ellas fueron realizadas por el gravímetro CG-5 en tiempo real, esto es correcciones de tilt (corrige el déficit de nivelación del instrumento), variaciones de temperatura en la cámara de vacío y la corrección por mareas (Longman, 1959). Por otra parte, debido a los movimientos propios de transporte y manipulación del gravímetro, fue necesario efectuar

ajustes por deriva instrumental para lo cual se realizan mediciones de repetición sobre la estación base relativa (aquella creada cercana a la zona de trabajo) y rutinas de cálculo que entregan las diferencias de gravedad respecto de la estación base relativa. Posteriormente, se realizó el cálculo de anomalía de Bouguer la que permite inferir la distribución de las masas en el subsuelo. Esta señal contiene la respuesta de cuerpos profundos asociados a bajas frecuencias y de los cuerpos someros asociados a altas frecuencias. Este cálculo se realizó a través de correcciones estándar para los datos (Telford *et al.*, 1976). Cabe destacar, que, debido a lo acotado del área de estudio, los datos no fueron sometidos a corrección topográfica.

Finalmente se procedió al cálculo de la anomalía residual asociada a las anomalías de interés de fuentes poco profundas, las cuales, para la finalidad del estudio, pueden ser correlacionadas directamente con la geología circundante.

Una vez obtenida la anomalía residual para los perfiles, se procedió a su modelación, la que se realizó con la herramienta GM-SYS del *software* Oasis Montaj, que asigna una serie de cuerpos con geometría y parámetros de densidad definida, calcula el efecto gravimétrico de estos cuerpos, y los compara con la curva observada. El modelo más representativo será aquel que luego de una serie de iteraciones permite obtener un ajuste adecuado entre la gravedad observada y la calculada. Para ello, se confeccionó un modelo geológico sintetizado para el perfil 2, el cual fue generado con información de los pozos ND-0505-6546, ND-0505-0194 y ND-0505-4624, que permiten tener un mejor detalle de la litología presente en el sector. Para determinar el valor de densidad, el cual estuvo condicionado por la poca presencia de afloramientos en el área, se realizó un análisis de los pozos mencionados anteriormente, determinando valores de densidad *background* para la modelación de  $2,74 \text{ g/cm}^3$ , mientras que para las distintas unidades gravimétricas identificadas se utilizaron valores de  $1,76 \text{ g/cm}^3$  (color amarillo) para materiales del tipo arena no consolidada y de  $2,4 \text{ g/cm}^3$  para materiales de tipo roca meteorizada (color magenta).

## 6.1 Análisis

A continuación, se presentan la anomalía de Bouguer (FIG. 18) y anomalía residual (FIG. 19) obtenidas desde los datos totales levantados, además de la modelación del perfil gravimétrico 2 de calle los Pellines (FIG. 20).

Para el caso de la anomalía de Bouguer, que corresponde a la sumatoria de señales profundas y someras, es posible observar una variación en el gradiente en dirección NS, observándose las anomalías positivas hacia el sector Norte (rojos a magenta) y las

anomalías con menor intensidad hacia el sector Sur (azules). Por su parte, al calcular la anomalía residual, que corresponde a la señal de cuerpos más someros, es posible observar que la señal más alta, se observa tanto al norte como al sur del área de estudio, mientras que, en la parte central, se concentra la señal gravimétrica más baja.

En la modelación del perfil 2 de calle los Pellines, el valor de gravedad modelado corresponde a valores residuales con filtro polinomial de primer orden. De acuerdo con la gráfica (FIG. 20), se observa que el valor mínimo alcanza los -0,69 mGal cercano a los 1.450 m del perfil. En general, la curva observada tiene una tendencia suave, presentándose un bajo pronunciado desde los 890 m a los 1.790 m del perfil, coincidente con las potencias mayores de 2 de las capas modeladas. La capa amarilla de valor  $1,76 \text{ g/cm}^3$  asociada a arenas no consolidadas presenta espesores máximos de 50 m, mientras que la capa magenta de valor  $2,4 \text{ g/cm}^3$  asociada a roca meteorizada alcanza potencias de 35 m.

A comienzos del perfil y hasta los 1.450 m de longitud, es posible observar variaciones suaves y leves en la señal, lo cual puede asociarse, eventualmente, a señal de cuerpos más someros. Tanto la capa amarilla como la capa magenta poseen una distribución relativamente homogénea con espesores máximos de entre 25 y 30 m cada una.

A partir de los 1.790 m de perfil, la curva comienza a ascender alcanzando un *peak* máximo a los 1.930 m, cuyo valor de gravedad es de 0,763 mGal, desde aquí se observa un decaimiento suave de la curva con variaciones leves. En este sector, es posible observar un mayor afloramiento de la roca *background* de valor  $2,74 \text{ g/cm}^3$  lo que podría estar indicando algún tipo de control estructural en esta zona.

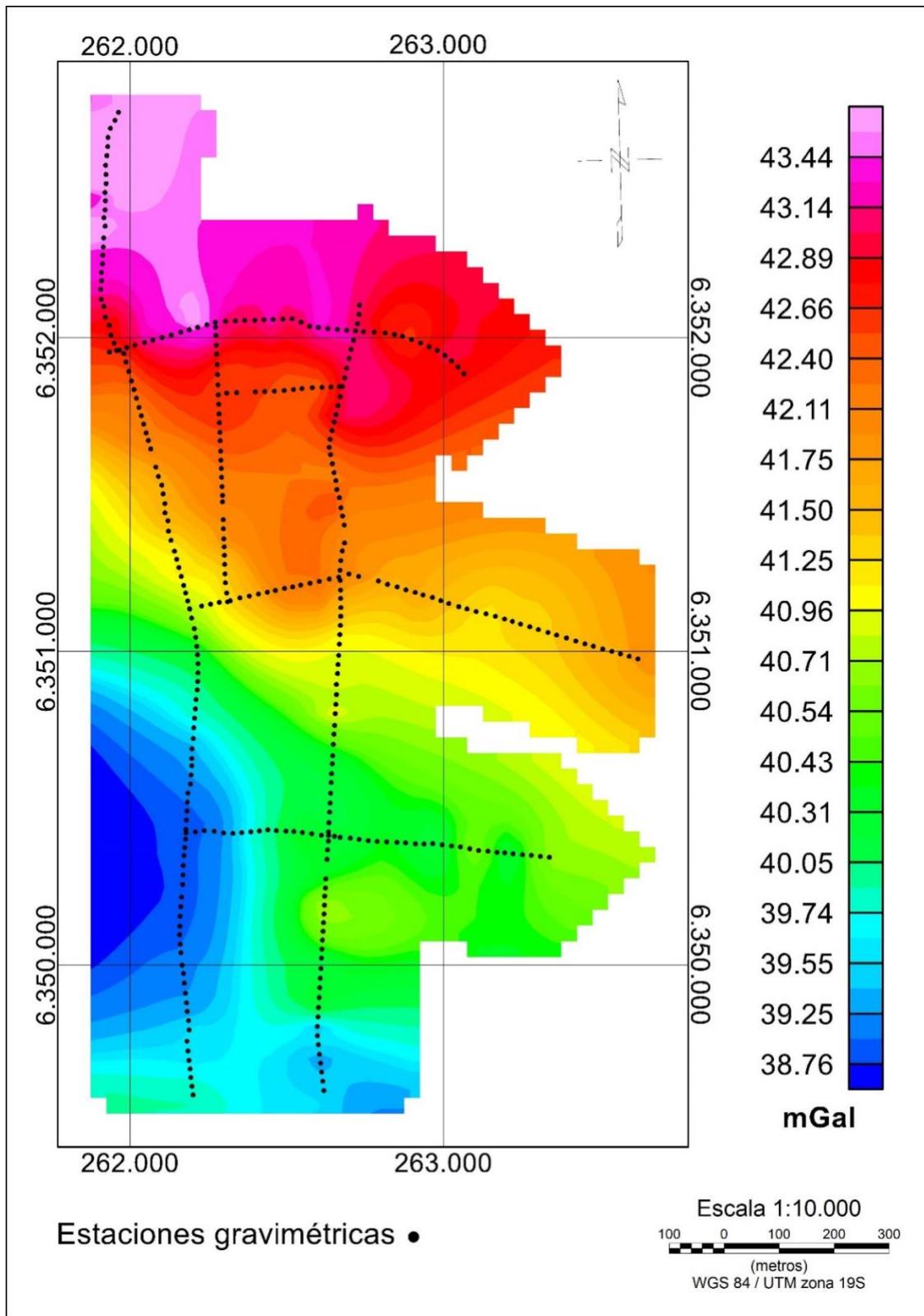


FIG. 18. Anomalia de Bouguer.

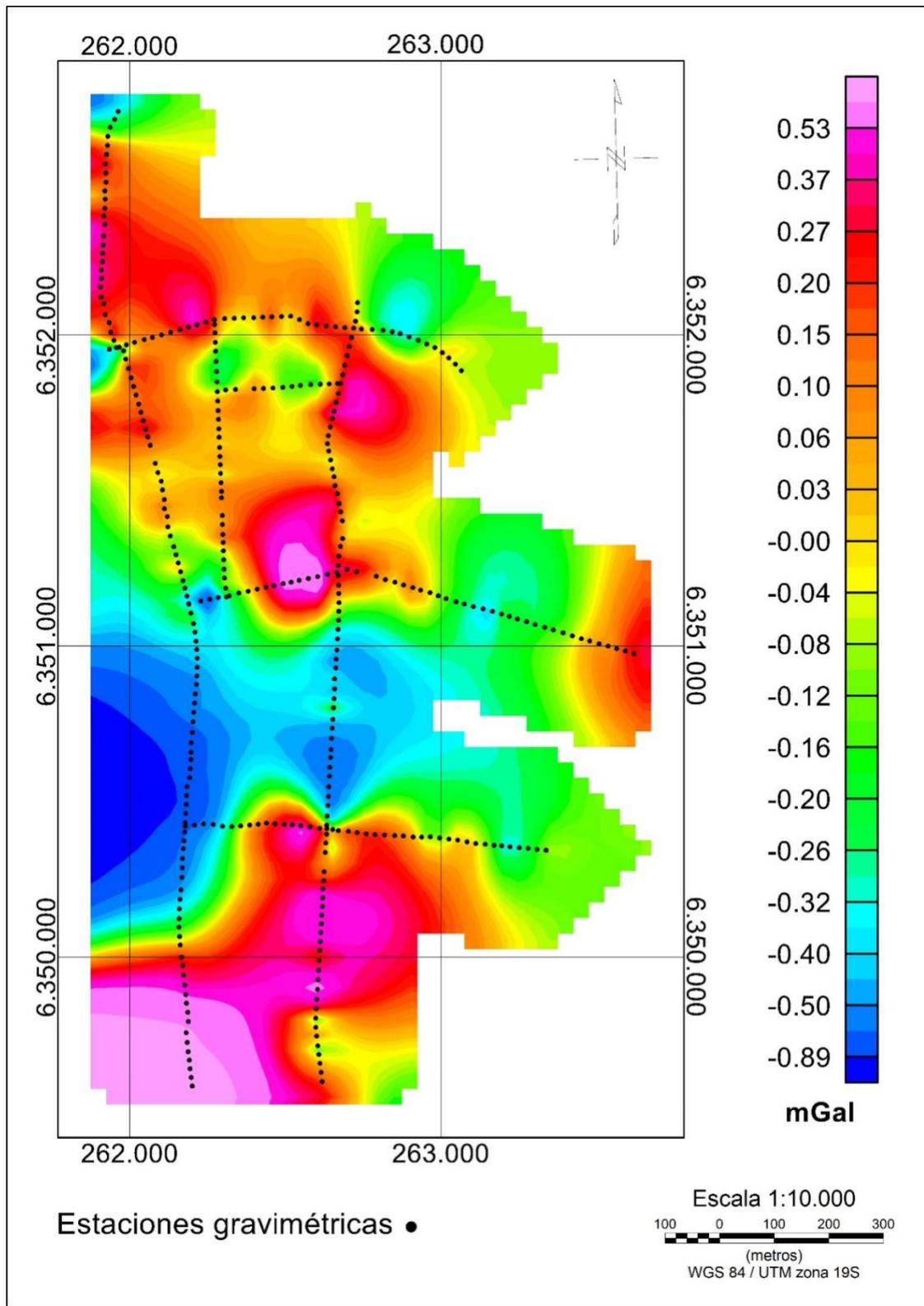


FIG. 19. Anomalía residual

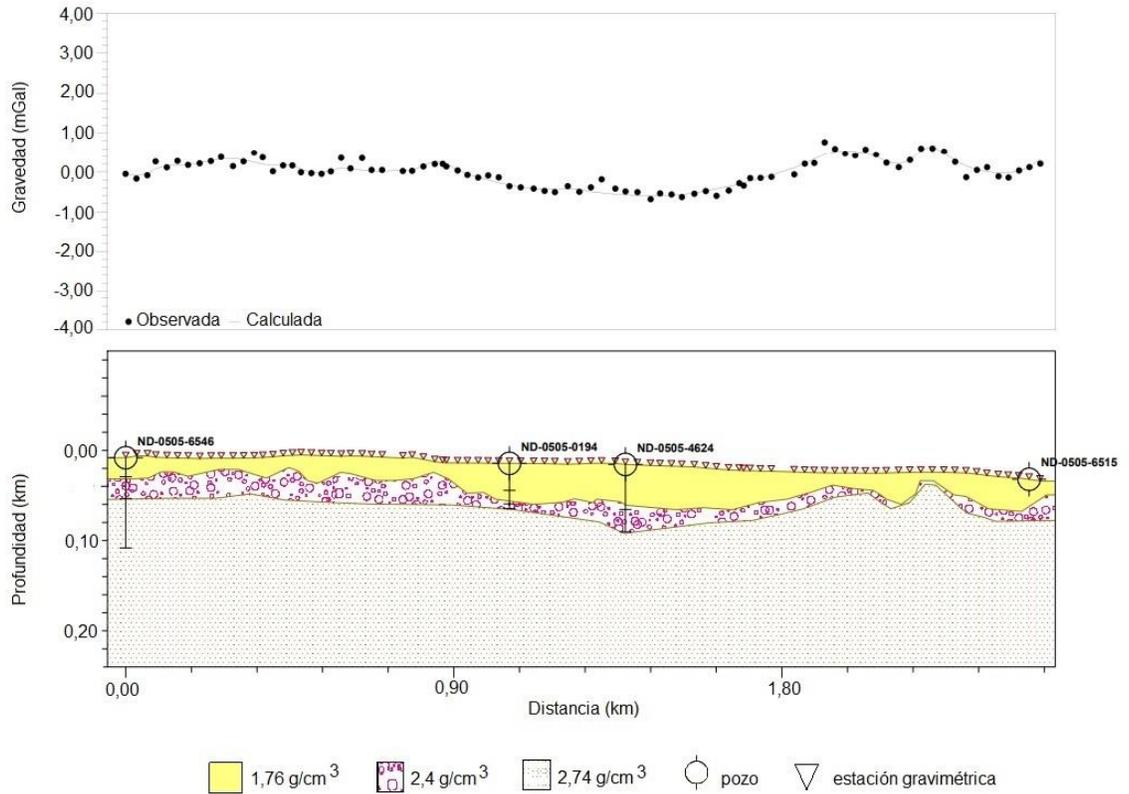


FIG. 20. Modelo 2D perfil gravimétrico 2, calle los Pellines

## 7. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

### 7.1 Unidades hidrogeológicas

Para definir las unidades hidrogeológicas se hizo una integración de toda la información geológica, hidrológica, hidrogeológica y geofísica, tanto recopilada como levantada para este estudio. A continuación, se presentan las unidades definidas y sus características.

#### Unidad UH-A1

La UH-A1 se define a partir de extensión y disposición de los depósitos de la unidad “Sedimentos eólicos y litorales actuales o recientes”. Corresponde a un medio intergranular en sedimentos poco consolidados y su extensión abarca gran parte del área de estudio. A pesar de su gran extensión, los espesores de esta unidad presentan una amplia variación desde los 80 m en el sector del santuario de la naturaleza de las

dunas de Concón a coberturas menores de 1 m sobre el talud del borde del sector aterrizado. Su espesor disminuye rápidamente al alejarse del sector de las dunas, presentándose en capas de entre 3 y 5 m en promedio. Esta unidad se observa bajo la mayoría de las construcciones ubicadas en el sector Reñaca – Concón por lo que ha sido caracterizada en cuanto granulometría, espesor y permeabilidad en los estudios de mecánica de suelo asociados.

La unidad UH-A1 está conformada por arenas sueltas a compactas de muy buena selección, con un contenido de finos de tamaño menor a 0,074 mm variable entre un 2 y 5%. En sectores con buen desarrollo de suelo, como en Pinares de Montemar, estos valores llegan hasta un 9%. Por otro lado, los registros de ensayos Porchet reinterpretados en este trabajo (Tabla 13), muestran que, hasta los 7 m de profundidad, la unidad UH-A1 presenta capacidades de infiltración entre 226 y 707 mm/hr, lo que en unidades de metros – día equivalen a un rango entre  $0,63 - 1,96 \times 10^{-4}$  m/s. Estos valores corresponderían a la máxima permeabilidad ya que dada la naturaleza del ensayo esta tiende a sobrestimar los valores de infiltración y permeabilidad. En cuanto al almacenamiento, para el tipo de material que conforma las dunas (arenas finas bien seleccionadas- arenas de dunas) una compilación publicada por la *U.S Geological Survey* 3ra edición (Johnson, 1967) ha recopilado valores que van desde el 15 al 30% dependiendo de la cantidad de finos y el grado de compactación.

Tabla 13. Ensayos de Permeabilidad Porchet realizados en el área de estudio.

Punto de información	Fecha del Ensayo	Permeabilidad Porchet (mm/hr)	K calculado (m/s)
Santorini C1	09-11-2016	644	$1,79 \times 10^{-4}$
Pinares Montemar P1	05-06-2015	534	$1,48 \times 10^{-4}$
Pinares Montemar P2	05-06-2015	707	$1,96 \times 10^{-4}$
Makrovista S1	12-05-2014	348	$9,66 \times 10^{-5}$
Casa Gonzalez Araneda C3	01-04-2019	515	$1,43 \times 10^{-4}$
Casa Gonzalez Araneda C3	01-04-2019	233	$6,47 \times 10^{-5}$
Reñaca La Foresta S1	13-01-2012	226	$6,28 \times 10^{-5}$
	<b>Promedio</b>	<b>458</b>	<b><math>1,27 \times 10^{-4}</math></b>

Esta unidad, se comporta principalmente como zona vadosa o zona no saturada, lo que significa que no conforma el acuífero principal, si no que se encarga de transportar la recarga desde la superficie hasta el nivel saturado. La buena permeabilidad vertical y horizontal de la UH-A1 explica que la mayor parte de los sondajes geotécnicos del área (prospecciones de hasta 40 m de profundidad) no logran alcanzar el nivel de aguas subterráneas. Considerando que los niveles estáticos medidos se encuentran por debajo, o muy cerca del límite inferior de la unidad UH-A1, los parámetros obtenidos desde pruebas de bombeo realizadas en pozos en el área de estudio se consideran representativas de las unidades subyacentes.

## Unidad UH-A2

La unidad UH-A2 se define a partir de la distribución y extensión de los depósitos asociados a la Formación Horcón. Alcanza un espesor de 40 m en el sector Punta Cabras, el cual disminuye considerablemente al acercarse al talud del sector aterrazado. En el resto del área de estudio presenta un espesor variable según los perfiles gravimétricos. Los ensayos granulométricos detectan hasta un 40% de finos en capas de 2 m de potencia a una profundidad de 11 m desde la superficie (Campo Real S1). Esta unidad se comporta como acuífero intergranular, sin embargo, localmente presenta litologías capaces de ralentizar el flujo vertical de agua dándole un carácter local semiconfinado a confinado (FIG. 21).

Las pruebas hidráulicas realizadas en los pozos del área de estudio consideran un nivel estático en los últimos metros de esta unidad. En el pozo ND-0505-4639 el tramo aportante corresponde a la unidad UH-C1 y se encuentra semiconfinada a confinada por la unidad UH-A2. Sin embargo, tal comportamiento es de carácter local ya que en otros pozos cercanos como el ND-0505-4624, el nivel basal de la unidad UH-A2 corresponden a arenas compactas.

Es posible tener una idea de los parámetros hidráulicos de esta unidad a partir de los resultados de las pruebas de bombeo llevadas a cabo en el pozo ND-0505-4729. Esto dado que el nivel estático se encuentra en la unidad UH-A2 y no se definieron niveles confinantes en la base de esta (FIG. 22).

El resultado de la reinterpretación de la prueba de gasto constante para este pozo entrega una transmisividad de 5,36 m<sup>2</sup>/día, y 4,6 x 10<sup>-6</sup> m/s. Sin embargo, este pozo recibe aporte de las unidades UH-A1 y UH-C1 por lo que dicho valor solo debería considerarse referencial. Dada la gran variabilidad litológica que compone esta unidad, los valores de permeabilidad definidos por la bibliografía fluctúan entre 10<sup>-6</sup> (arenas limosas) y 10<sup>-9</sup> (limos arcillosos) según Freeze y Cherry (1979). En cuanto al coeficiente de almacenamiento (Johnson, 1967), indica valores entre 5 y 10% para arenas arcillosas y limos.

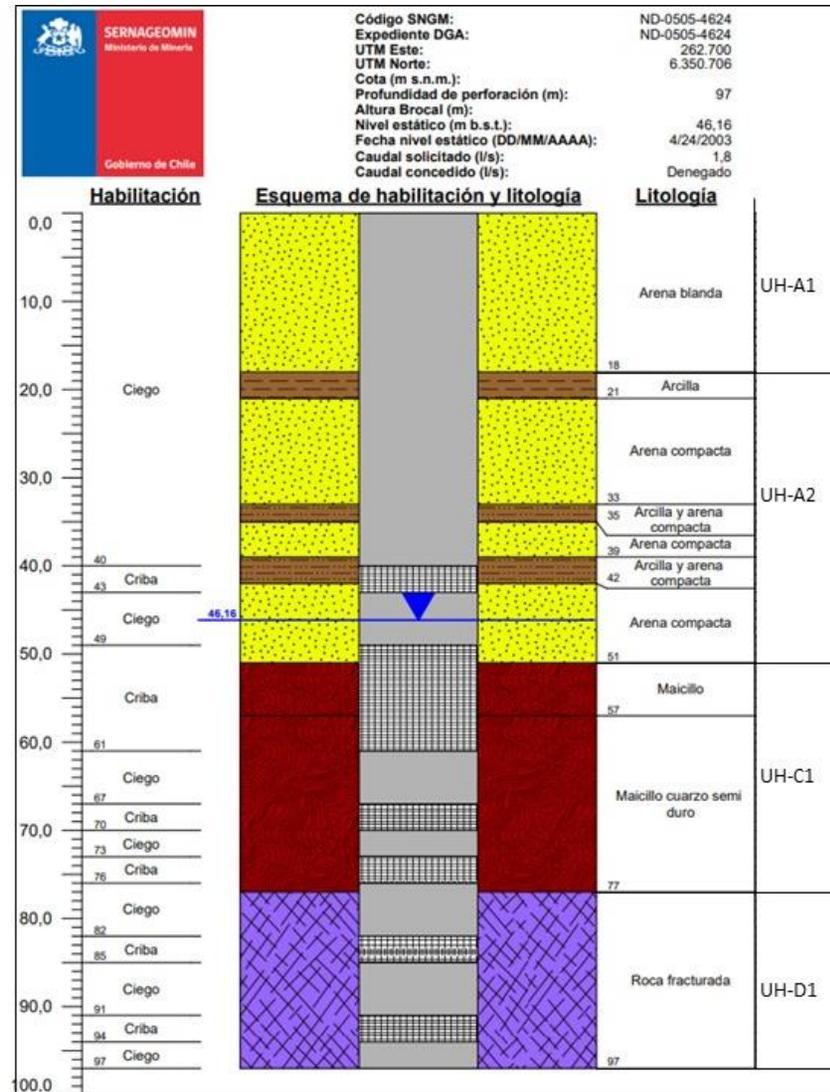
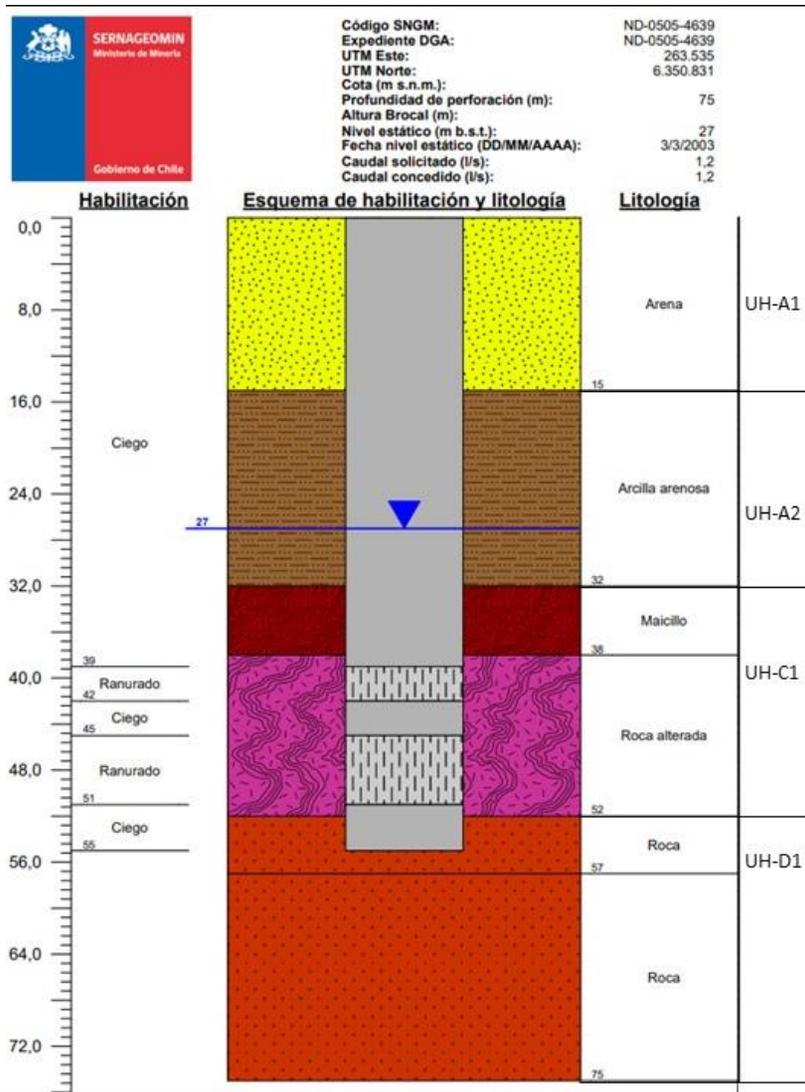


FIG. 21. Esquema de pozos hidrogeológicos construidos en la subcuenca Reñaca-Concón.

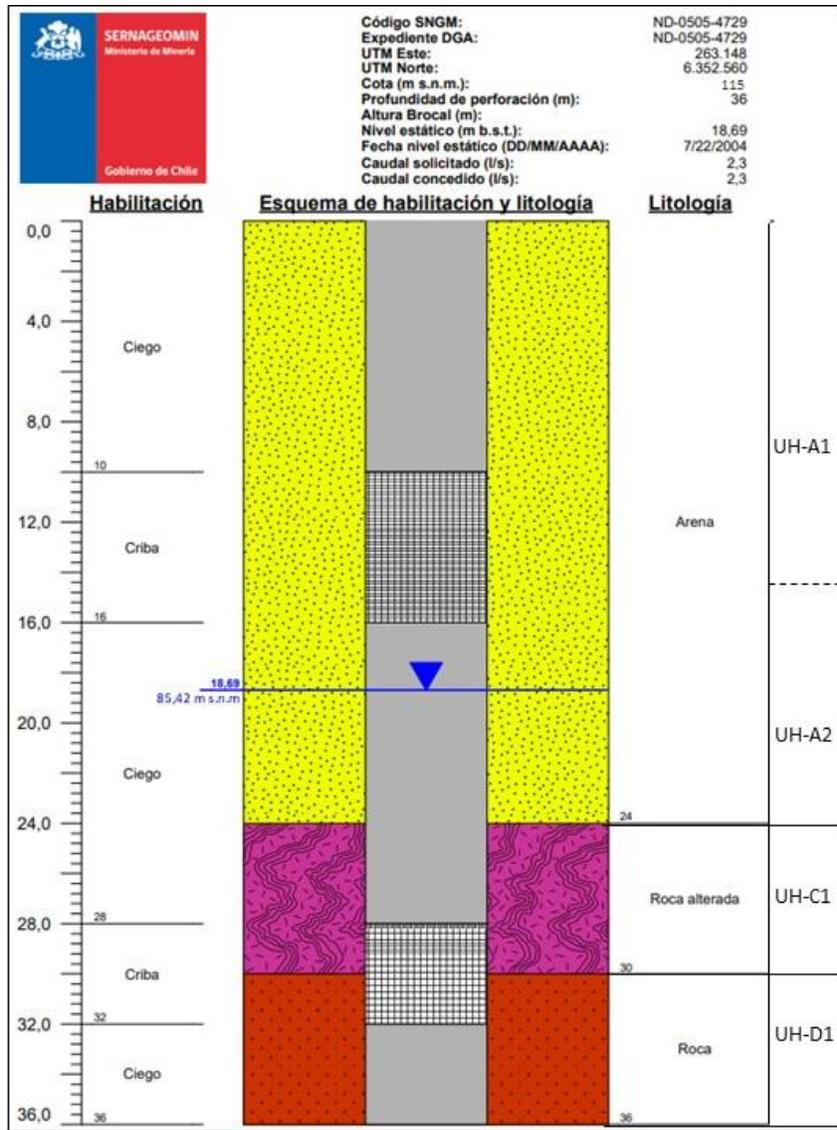


FIG. 22. Diagrama de pozo ND-0505-4729, con nivel en la unidad UH-A2.

## Unidad UH-C1

La unidad UH-C1 corresponde a la porción de roca altamente fracturada y meteorizada que subyace a la Formación Horcón. En sí, no es correlacionable a ninguna unidad litológica por sí sola, sin embargo, esta formaría parte de la porción más superficial de la Unidad Cochoa. Esta unidad hidrogeológica se extiende por prácticamente toda el área de estudio, disminuyendo sus espesores hacia la costa. En general, las secciones geofísicas muestran que esta unidad subyace de forma irregular a la unidad UH-A2 y presentaría espesores variables que superarían los 20 m en algunos sectores (ND-0505-4002) (FIG. 23 y FIG. 24).

La mayoría de los pozos se encuentran habilitados en tramos que se han descrito de manera informal como “maicillo” o “roca alterada” lo que en este trabajo se interpreta como roca muy fracturada y/o meteorizada. Los niveles estáticos medidos indican que el principal aporte de agua a los pozos hidrogeológicos provendría de la unidad UH-C3 y en algunos casos puntuales de las unidades UH-A2 y UH-C1.

Los parámetros hidráulicos calculados para esta unidad varían entre  $4,3 \times 10^{-8}$  y  $3,1 \times 10^{-5}$  m/s con una media de  $10^{-5}$  m/s. Las transmisividades por su parte varían entre 0,1 y 18,73 m<sup>2</sup>/día (Tabla 14). La relación entre la transmisividad y el caudal específico de los ensayos hidráulicos es de carácter potencial del tipo  $Ax^B$  tal como otros autores han descrito para acuíferos detríticos, por ejemplo, Mace (1997, en Maliva, 2016) (FIG. 25). En ninguno de los ensayos reinterpretados se presenta el valor de almacenamiento debido a que todos los registros corresponden a pozos de bombeo, lo que no permite calcular de forma adecuada el parámetro. Sin embargo, se espera que el valor de almacenamiento de esta unidad sea menor al 5%.

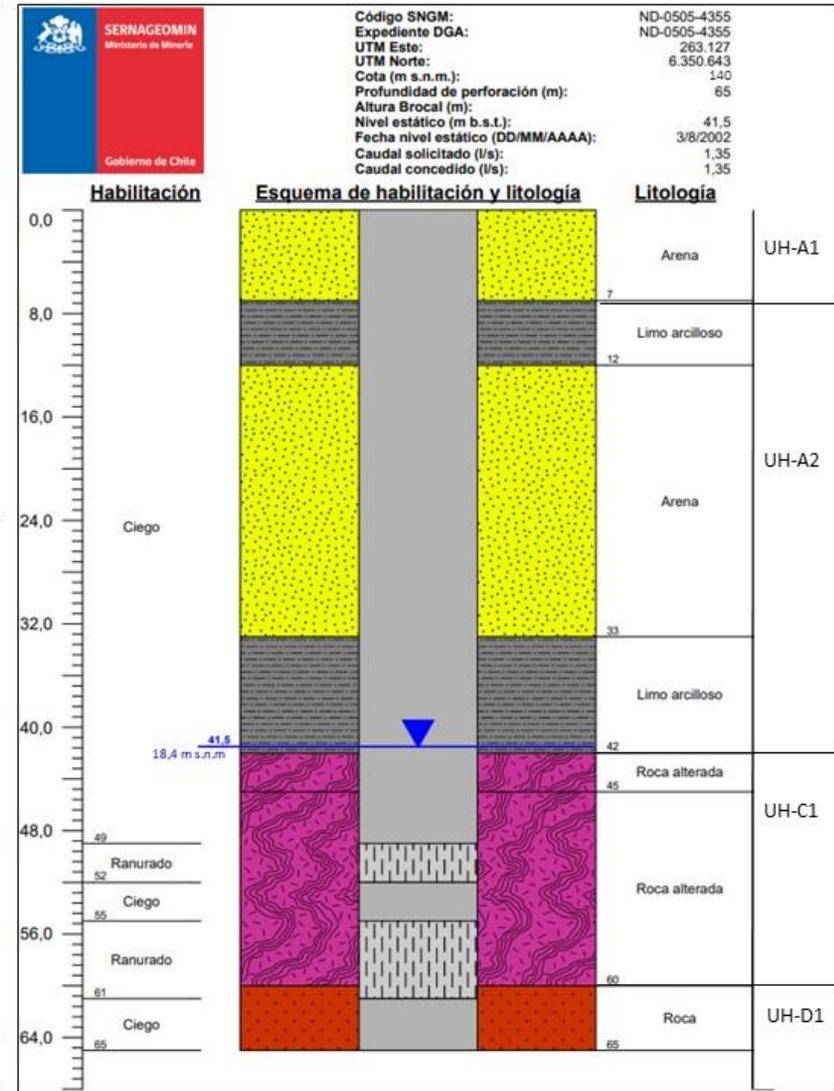
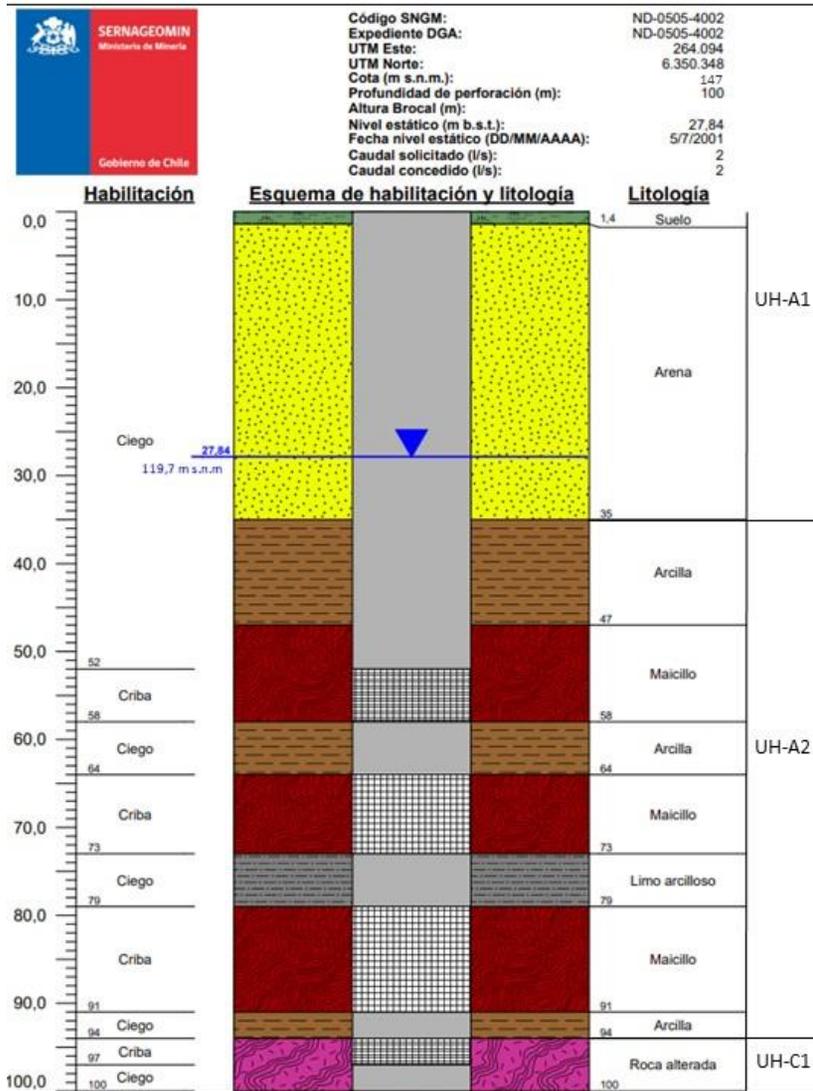
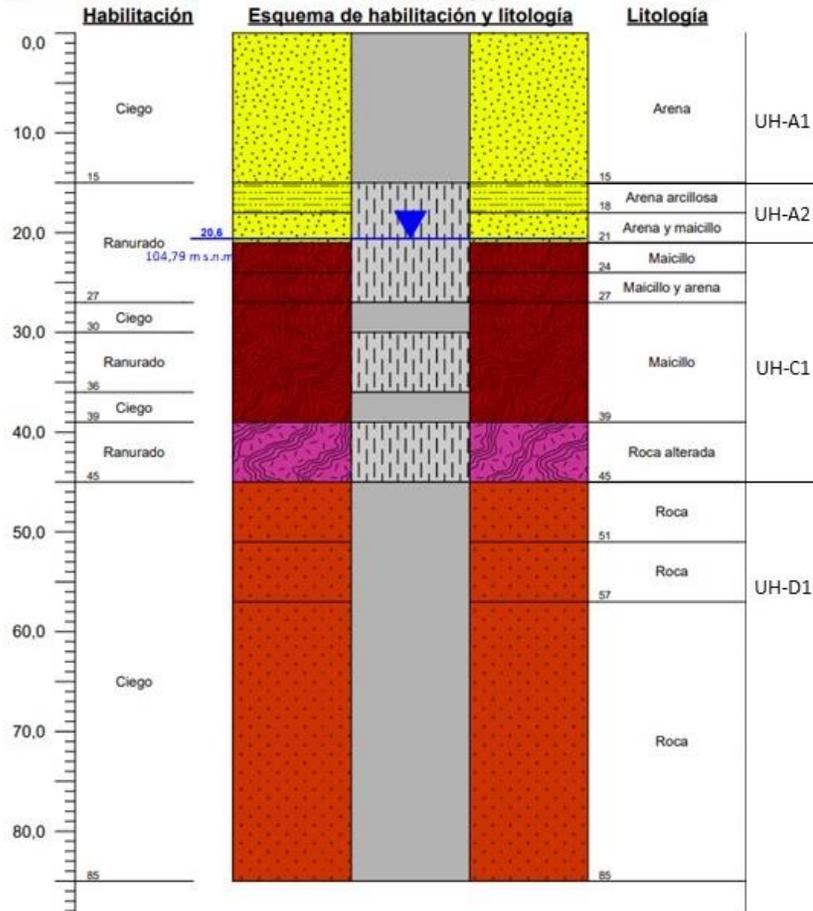


FIG. 23. Esquema de pozos con pruebas hidráulicas en la unidad UH-C1



Código SNGM: ND-0505-6546  
 Expediente DGA: ND-0505-6546  
 UTM Este: 262.861  
 UTM Norte: 6.352.218  
 Cota (m s.n.m.): 125  
 Profundidad de perforación (m): 85  
 Altura Brocal (m):  
 Nivel estático (m b.s.t.):  
 Fecha nivel estático (DD/MM/AAAA):  
 Caudal solicitado (l/s): 0,33  
 Caudal concedido (l/s): 0,33



Código SNGM: S2 Makroceano  
 Expediente DGA: no aplica  
 UTM Este: 261.822  
 UTM Norte: 6.351.387  
 Cota (m s.n.m.): 30  
 Profundidad de perforación (m):  
 Altura Brocal (m):  
 Nivel estático (m b.s.t.): 18,6  
 Fecha nivel estático (DD/MM/AAAA): 11/17/2017  
 Caudal solicitado (l/s): no aplica  
 Caudal concedido (l/s): no aplica

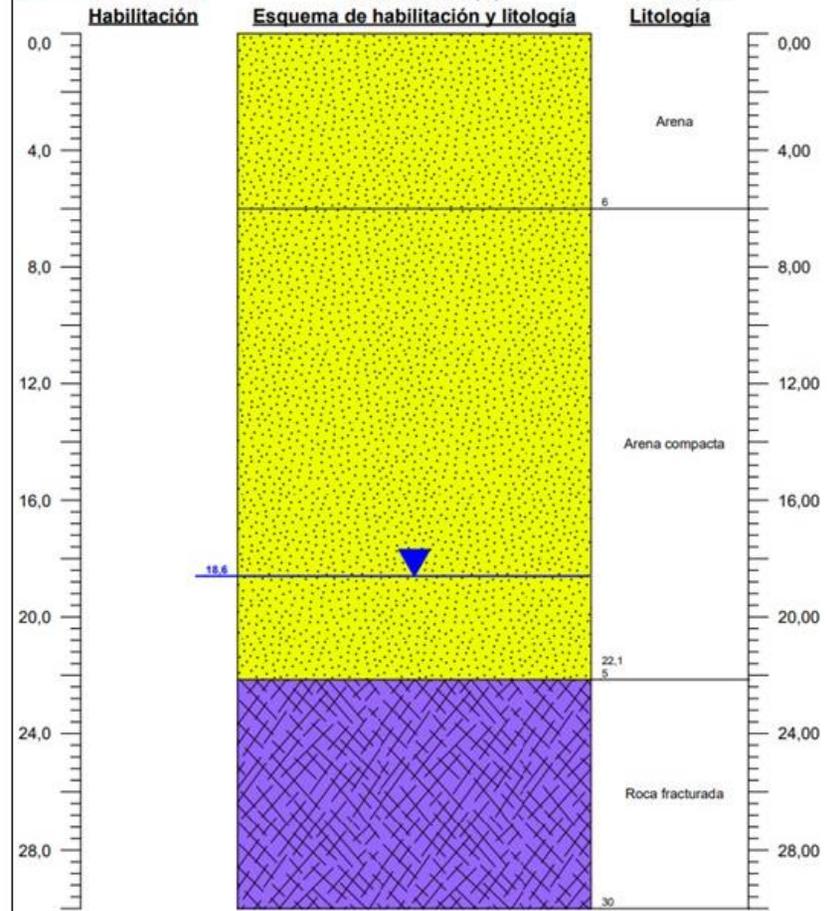


FIG. 24. Esquema de pozo y sondaje geotécnico en el área de estudio.

Tabla 14. Catastro de expedientes de derechos de aguas subterráneas concedidos y denegados con parámetros hidráulicos obtenidos de la reinterpretación de los registros de pruebas hidráulicas presentadas.

ID Prueba	Tipo de prueba	Caudal l/s	Nivel inicial	Nivel Final	Transmisividad m <sup>2</sup> /día	Caudal Específico m <sup>3</sup> /día/m	Conductividad Hidráulica m/s	Tramo aportante (b) m	Ref. Parámetros	Unidad Hidro
ND-0505-6597	Prueba de gasto constante	3,00	42,00	87,46	1,56	5,70	4,0E-07	45,46	Neumann PB- SNGM	C1
ND-0505-6546	Prueba de gasto constante	0,33	20,60	45,91	0,10	1,13	4,3E-08	25,31	Neumann PB- SNGM	C1
ND-0505-6546	Prueba de recuperación	0,33	45,91	26,46	0,57		2,6E-07	25,31	Jacob REC - SNGM	C1
ND-0505-6577	Prueba de gasto constante	0,38	36,60	55,60	0,83	1,73	5,1E-07	19,00	Neumann PB- SNGM	C1
ND-0505-4639	Prueba de gasto constante	1,20	27,00	29,85	7,35	36,38	3,0E-05	2,85	Neumann PB- SNGM	C1
ND-0505-4639	Prueba de gasto variable	0,2	27,00	29,85	5,01		2,0E-05	2,85	Jacob PB - SNGM	C1
ND-0505-4639	Prueba de recuperación	1,20	29,85	27,00	4,74		1,9E-05	2,85	Jacob REC - SNGM	C1
ND-0505-1668	Prueba de gasto constante	1,00	60,36	65,50	6,72	16,81	1,5E-05	5,14	Neumann PB - SNGM	C1
ND-0505-4624	Prueba de gasto constante	1,80	46,16	48,60	18,73	63,74	2,0E-05	10,84	Neumann PB - SNGM	C1
ND-0505-4002	Prueba de gasto constante	2,00	27,84	71,31	0,39	3,98	1,9E-07	24,31	Neumann PB - SNGM	C1
ND-0505-4355	Prueba de gasto constante	1,35	41,50	46,70	2,13	22,43	4,7E-06	5,20	Neumann PB - SNGM	C1
ND-0505-4729	Prueba de gasto constante	2,30	18,69	32,14	5,36	14,77	4,6E-06	13,45	Neumann PB - SNGM	A2/C1

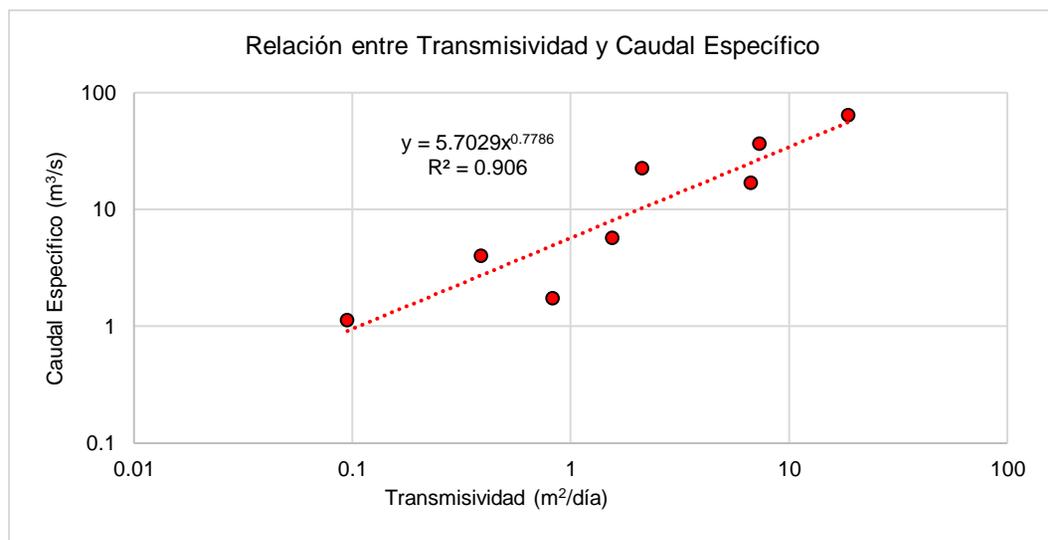


FIG. 25. Relación entre transmisividades y caudales específicos obtenidos de la reinterpretación de pruebas de bombeo llevadas a cabo en el área de estudio

## 7.1 Geometría del Acuífero y Caracterización de niveles

Para caracterizar la geometría del acuífero se definieron los límites de la cuenca hidrogeológica. Para esto se utilizó los resultados de la interpolación de las mediciones gravimétricas de la campaña geofísica, que se interpretan como posibles altos en la cota de basamento del acuífero. de esta forma se define un borde inferido para la divisoria de aguas subterráneas en el sector Reñaca-Concón (FIG. 26).

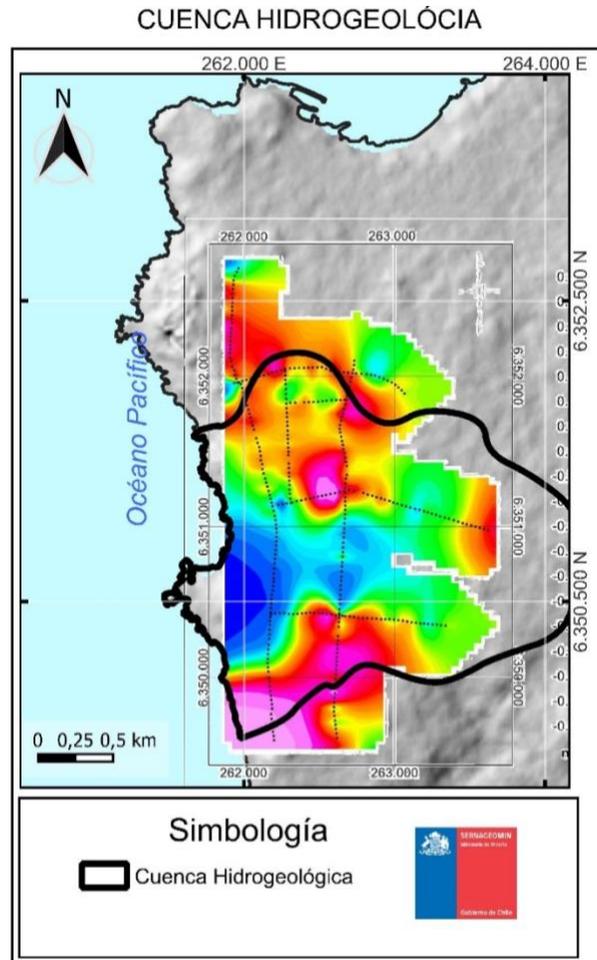


FIG. 26. Límites de la cuenca hidrogeológica y extrapolación de anomalías gravimétricas residuales.

La piezometría para el sector (FIG. 27) fue construida a partir de los datos de niveles disponibles en los expedientes de solicitud de derechos de aprovechamiento (Tabla 15). El sector no cuenta con ningún pozo de monitoreo de niveles inscrito en el sistema de Monitoreo de Extracciones Efectivas (MEE) de la DGA. Por esta razón la piezometría

presentada es de carácter referencial y puede contener errores asociados a la diferencia temporal que existe entre las mediciones.

En general la zona de estudio presenta el nivel freático por debajo de los 40 m bajo el nivel de terreno y un gradiente que aumenta considerablemente al acercarse al borde costero. Este aumento se debe por la descarga hacia el mar desde el acuífero de forma subterránea y a través de vertientes que presentan un caudal acumulado de 2,2 l/s (Expedientes de solicitud de derechos de aguas superficiales). Estos afloramientos de aguas subterráneas se concentran hacia el sector norte del área de estudio mientras que la descarga del acuífero en el sector sur se produce de forma subterránea.

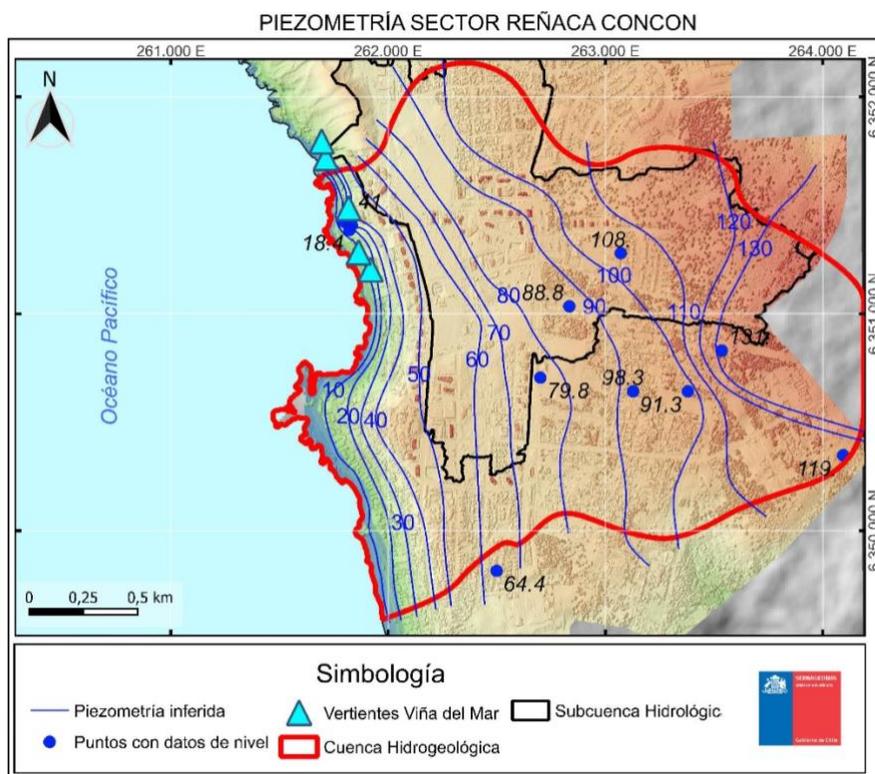


FIG. 27. Piezometría inferida del sector Reñaca-Concón a partir de información de niveles disponible en expedientes de solicitud de aprovechamiento de aguas subterráneas.

Tabla 15. Catastro de puntos de agua con niveles piezométricos.

Puntos	Fecha	Nivel Piezométrico (m b.n.t)	Cota Piezométrica (m s.n.m)
Makroceano S2	17-11-2017	18,6	18,4
Makroceano S1	17-11-2017	2,5	19
Makroceano S3	17-11-2017	12,6	35,4
Makroceano S4	17-11-2017	12,5	41

Pozo ICMAS-92	24-05-1992	53	64,4
ND-0505-4624	24-01-2003	46,16	79,84
ND-0505-4729	04-01-2006	29,28	85,42
ND-0505-6546	01-09-2008	38	87,39
ND-0505-6473-1	05-01-2006	18,55	87,41
ND-0505-6597	21-04-2013	42	88,85
ND-0505-1668	25-03-1996	60,36	91,355
ND-0505-6473-2	04-01-2006	29,28	93,243
ND-0505-4355	08-03-2002	41,5	98,3
ND-0505-6546	15-11-2010	20,6	104,79
ND-0505-6577	13-01-2012	35,55	108,45
ND-0505-4002	07-05-2001	27,84	119,715
ND-0505-4639	03-03-2003	27	131,46

## 7.2 Balance hídrico

El objetivo de la estimación del balance hídrico es determinar la disponibilidad de recursos hídricos presentes y futuros, lo que permite tomar medidas de gestión tales como la estimación de recurso disponible para el otorgamiento de derechos de aprovechamiento, o la definición de zonas de restricción o prohibición. Como consecuencia de un balance hídrico una cuenca se puede catalogar como en déficit, equilibrio o superávit. El balance hídrico puede ser estimado de forma directa o indirecta, y consiste en aplicar el concepto de balance de masa en donde todas las salidas de sistema son equivalentes a las entradas más el volumen extraído desde el almacenamiento en un periodo de tiempo determinado.

El balance hídrico del área de estudio se ha visto fuertemente modificado desde el régimen de equilibrio natural predominante previo a la urbanización, hasta el día de hoy. El cambio en el uso de suelo y la consecuente modificación antrópica de la capacidad de infiltración del terreno es la principal causa en la modificación de las entradas de agua al sistema, mientras que aumentó la explotación del acuífero mediante pozos hidrogeológicos. Dada las condiciones geográficas y geomorfológicas del área de estudio para la estimación se consideró la infiltración de las precipitaciones como única fuente de recarga. Sin embargo, existe una gran incertidumbre en la estimación de las descargas debido a que los usuarios de pozos de agua de la subcuenca no reportan el consumo de agua ni los niveles piezométricos con la periodicidad que exige la norma.

### Estimación de la infiltración y escorrentía directa

Para estimar el efecto del cambio en el uso de suelo en la generación de escorrentía directa se utilizó el método de la Curva Número, el cual creado en el Departamento de Agricultura de E.E.U.U. (USDA), Servicio de Conservación de Suelo (SCS, 1954). El método entrega un coeficiente asociado a la composición del material donde precipita para la estimación de la escorrentía directa y la infiltración producida frente a un evento

meteorológico de una magnitud conocida. En este sentido el umbral de escorrentía, o abstracción inicial, corresponde al monto mínimo que debe precipitar para que se produzca escorrentía. Luego de ser superado este umbral, el porcentaje de infiltración disminuye progresivamente mientras aumenta el porcentaje de la precipitación que fluye de forma superficial.

Solo una parte de la infiltración de las precipitaciones alcanza finalmente el nivel piezométrico produciendo lo que se denomina infiltración efectiva, a este porcentaje se le denomina tasa de infiltración. La Dirección General de Aguas asigna una tasa de infiltración de un 20% para rellenos eólicos, mientras que para superficies fluviales este porcentaje alcanzaría solo un 5% (p.e. DGA, 2002).

El método de la curva número se estructura con dos ecuaciones, la Ecuación 3, asocia el almacenamiento (S) máximo del suelo, con un valor o coeficiente de curva número (CN), mientras que la Ecuación 4 relaciona la escorrentía (Es), con la precipitación (Pp) menos lo que se almacena en los terrenos donde precipita. Se ha observado empíricamente que el umbral de escorrentía es aproximadamente el 20% del almacenamiento máximo.

Ecuación 3:

$$S (\text{pulgadas}) = \frac{1.000}{CN} - 10 \xrightarrow{\text{a mm}} S (\text{mm}) = \frac{25400}{CN} - 254$$

Ecuación 4:

$$\text{Escorrentía (mm)} = \frac{(Pp(\text{mm}) - 0,2 * S)^2}{Pp(\text{mm}) + 0,8 * S}$$

Los valores de CN varían entre 0 y 100, siendo 100 un terreno absolutamente impermeable y 0 un terreno totalmente permeable. La Tabla 16 muestra los valores de CN para distintos tipos de superficie en áreas urbanas, mientras que la Tabla 15 indica valores de CN para áreas no urbanas.

Tabla 16. Valor del coeficiente CN por tipo de cobertura en áreas urbanas.

Cobertura superficie	% imp.	Grupo de Suelo (*)			
		A	B	C	D
Desarrollado					
Permeables:					
Prados y parques		68	79	86	89
Pasto < 50%		49	69	79	84
Pasto 50% - 75%		39	61	74	80
Pasto > 75%		98	98	98	98
Impermeables:					
Calles y caminos:					
Pavimentados		98	98	98	98
Grava		76	85	89	91
Tierra		72	82	87	89
Districtos urbanos					
Comercial	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93
Residencial:					
Sitios 500 m <sup>2</sup> o menor	65	77	85	90	92
Sitios 1000 m <sup>2</sup>	38	61	75	83	87
Sitios 2000 m <sup>2</sup>	25	54	70	80	85
Sitios 5000 m <sup>2</sup>	20	51	68	79	84
Sitios 10000 m <sup>2</sup>	12	46	65	77	82
Áreas en desarrollo		77	86	91	94

Tabla 17. Valor del coeficiente CN por tipo de cobertura en áreas no urbanas.

Tipo de suelo	Tipo de Terreno	Valor CN
Gravoso o arenoso profundo (A)	Praderas	30
Arenoso de mediana profundidad (B)	Praderas	58
Mediana profundidad con arcillas y limos	Praderas	71
Arcillosos	Praderas	78
Gravoso o arenoso profundo (A)	Bosques	36
Arenoso de mediana profundidad (B)	Bosques	60
Mediana profundidad con arcillas y limos	Bosques	73
Arcillosos	Bosques	79
Gravoso o arenoso profundo (A)	No Agrícola	63
Arenoso de mediana profundidad (B)	No Agrícola	77
Mediana profundidad con arcillas y limos	No Agrícola	85
Arcillosos	No Agrícola	88

En el capítulo 5 se determinó el porcentaje de cobertura para cada tipo de superficie, lo que permite obtener un coeficiente de Curva Numero como promedio ponderado del valor para cada cobertura. Se utilizan los porcentajes obtenidos por el método de clasificación supervisada ya que esta fue la utilizada para modelos hidrológicos anteriores en el área de estudio y porque permite una definición más detallada de valores de CN por cobertura. La Tabla 18 muestra el detalle para el cálculo del valor de CN ponderado el 76,9. Para analizar escorrentía directa previa a la urbanización se consideró que el área estaba cubierta por Bosque y Vegetación en suelo arenoso profundo y con arena en suelo no agrícola. De esta forma se obtiene un valor de CN para la condición sin urbanización de 31,65 (Tabla 18).

Tabla 18. Estimación de valor CN ponderado por uso de suelo.

Tipo de cobertura definida en este trabajo	Clasificación supervisada (DOH, 2019)		CN	CN*(%)
	Tipo Cobertura	(%)		
	Urbano	Techos 1		
	Techos 2	27,1	100	27,1
	Pasto sintético	0,1	98	0,098
Calles	Pavimento	8,5	98	8,33
Bosques y matorrales	Bosque	13,6	36	4,896
	Vegetación baja vigorosa	4,6	36	1,656
Matorrales y sin vegetación	Vegetación baja emergente	4,9	36	1,764
	Arena	7,4	63	4,662
	Suelo desnudo B	10,1	63	6,363
Roca, Playa y Áreas Verdes	Suelo desnudo A	4,2	63	2,646
	Agua	0,03	100	0,03
<b>Total</b>		<b>100</b>		<b>76,9</b>

Condición pre - urbanización				
Gravoso o arenoso profundo (A)	Pradera	95	30	28,5
Gravoso o arenoso profundo (A)	No Agrícola	5	63	3,15
<b>Total</b>				<b>31,65</b>

Aplicando las ecuaciones 1 y 2 se obtienen valores de umbrales de escorrentía de 110 mm en la condición pre-urbanización y de 15 mm en la condición actual (Tabla 19). En otras palabras, en la condición natural la escorrentía superficial ocurría solo cuando la precipitación superaba los 110 mm, mientras que en la condición actual los flujos de agua superficiales ocurren luego de 15 mm de precipitación acumulada.

Por otro lado, al considerar un evento meteorológico como el de agosto de 2023, el método curva número entrega un valor de escorrentía directa de 0 mm para la condición pre-urbanización. Mientras que este monto asciende a 29,9 mm en la condición actual (Tabla 20). Del mismo modo, es posible estimar una disminución de un 37% en la infiltración para eventos de precipitación similares al ocurrido en agosto de 2023, mientras que esta disminución aumenta a un 65% al considerar un evento de precipitación centenario. Los resultados del análisis también muestran que, incluso para un evento centenario en la condición pre-urbanización, la escorrentía superficial producida (17,3 mm) era cerca de la mitad de la magnitud de la que actualmente ocurre en eventos como los del 2023 (29,9 mm).

Tabla 19. Almacenamiento y umbral de escorrentía obtenidos mediante el método Curva Numero para la subcuenca Concón-Reñaca.

	Condición pre-urbanización	Condición Actual
Curva Número (CN)	31,65	76,9
Almacenamiento máximo (S)	549	76
Umbral de escorrentía (mm)	110	15

Tabla 20. Estimación de escorrentía directa, y estimación de la disminución en la infiltración efectiva respecto al caso sin urbanización para eventos como el de agosto 2023 y eventos de recurrencia centenaria.

	Evento agosto 2023		Evento Centenario	
	Condición pre-urbanización	Condición Actual	Condición pre-urbanización	Condición Actual
Precipitación acumulada en 24 h (mm)	80,2	80,2	216	216
Escorrentía (mm)	0	29,9	17,3	145,5
Disminución en la infiltración	-	-37%	-	-65%

En cuanto a la recarga por precipitaciones, usando el criterio de infiltración en zonas de dunas propuesto por DGA (2002), fue posible estimar que la recarga por precipitaciones en la condición previa a la urbanización y con un régimen de precipitación normal. Esta metodología ya considera la evapotranspiración de parte de las precipitaciones y la escorrentía superficial. Considerando las tasas de infiltración propuestas por DGA se estima que la recarga alcanzaba los 12,7 l/s considerando la superficie de la subcuenca hidrogeológica. Este monto se reduce a 8 l/s al considerar una disminución de 37% en la infiltración debido al cambio de uso de suelo, y a 2 l/s al considerar una disminución de 65% en la infiltración para los eventos de frecuencia centenaria y en un régimen de mega sequía con una disminución importante en las precipitaciones medias anuales calculadas (Tabla 21).

Tabla 21. Estimación de la recarga por precipitaciones en la condición pre-urbanización, condición actual en escenario optimista, y condición actual considerando la disminución de precipitaciones de los últimos 15 años (mega sequia).

	Condición pre-urbanización		Condición Actual considerando Mega sequía	
	Criterio DGA	Este Trabajo	Criterio DGA	Este Trabajo
Precipitación media anual (mm)	478	478	339	339
Tasa de Infiltración (%)	20%	12 - 18% (*)	5%	3 - 8% (**)
Área de la Cuenca Hidrogeológica (m <sup>2</sup> )	4.231.996	4.231.996	4.231.996	4.231.996
Recarga por precipitaciones (l/s)	12,7	7,5 - 11,3	2,3	1,25 - 3,57

(\*) La tasa de infiltración para el caso pre-urbanización se calcula considerando que, para eventos de precipitación con periodos de 2 y 5 años, el total de la precipitación se infiltra debido al elevado umbral de escorrentía. Así, la diferencia entre la ETR y las precipitaciones correspondería a infiltración efectiva.

(\*\*) Para la estimación de la infiltración en condiciones de sequía, se considera que la infiltración efectiva disminuye en un 37% según lo obtenido por método curva número.

## Descarga de aguas subterráneas

Las salidas de agua del sistema corresponden principalmente a las extracciones de aguas subterráneas ejercidas por particulares propietarios de derechos de

aprovechamiento, la descarga de vertientes en el borde costero, y las descargas subterráneas al mar en zonas donde existe continuidad hidráulica.

El catastro de derechos otorgados muestra que se encuentran vigente y posible de ser extraídos 8,93 l/s de la subcuenca (Tabla 22). Si bien este es el máximo caudal permitido a ser extraído, no necesariamente corresponde al caudal real. Para mejorar la estimación de este parámetro es necesario contar con la información del consumo de los pozos acorde a las resoluciones publicadas por la DGA. Por otro lado, es posible que existan pozos no registrados que operen por fuera de la norma.

Tabla 22. Derechos subterráneos solicitados en la subcuenca hidrogeológica.

Expediente	Tipo de captación	UTM Este	UTM Norte	Caudal	Estado
ND-0505-6577	Pozo	263,070	6,351,280	0,38	Vigente
ND-0505-6597	Pozo	262,834	6,351,035	3	Vigente
ND-0505-4639	Pozo	263,535	6,350,831	1,2	Vigente
ND-0505-4624	Pozo	262,700	6,350,706	1,8	Denegado
ND-0505-1668	Pozo	263,379	6,350,643	1	Vigente
ND-0505-4355	Pozo	263,127	6,350,643	1,35	Vigente
ND-0505-4002	Pozo	264,094	6,350,348	2	Vigente
<b>Caudal Total de Derechos Vigentes</b>				<b>8,93</b>	

En cuanto a los derechos superficiales, estos corresponden a vertientes que afloran en el sector costero por avenida Borgoño. En los expedientes de solicitud de derechos se hacen catastros de vertientes y además se complementan con aforos realizados por la DGA. Los caudales aforados alcanzan los 2,2 l/s mientras que existen derechos constituidos por 0,86 l/s (Tabla 23).

Tabla 23. Caudales y derechos superficiales otorgados en vertientes de la subcuenca hidrogeológica.

Expediente DGA	Comuna	Coordenada Este	Coordenada Norte	Caudal Aforado (l/s)	Caudal Otorgado (l/s)
ND-0505-4736-1	Viña del Mar	261.713	6.351.719	0,2	0,18
ND-0505-4540-5	Viña del Mar	261.694	6.351.795	0,7	0,2
ND-0505-4540-4	Viña del Mar	261.818	6.351.488	0,3	0
ND-0505-4540-3	Viña del Mar	261.919	6.351.205	0,8	0,3
ND-0505-4736-2	Viña del Mar	261.864	6.351.283	0,2	0,18
<b>Total, Caudales de vertientes</b>				<b>2,2</b>	<b>0,86</b>

Finalmente, no es posible determinar con precisión los flujos de descarga directa al mar, ya que no se cuenta con una piezometría actualizada. Sin embargo, si se considera un sistema hidrogeológico en estado permanente, es decir, previo a la urbanización cuando las únicas descargas correspondían a las vertientes y el flujo directo al mar, este último tendría un valor cercano a la diferencia entre el caudal de las vertientes y la

recarga, es decir entre 8 y 10 l/s. En la actualidad, es probable que este flujo se haya reducido considerablemente debido al menor gradiente hidráulico.

De esta forma, es posible determinar un rango de descarga de aguas subterráneas entre 10 y 16,9 l/s. Si bien los montos son aproximados, es posible determinar un déficit en el balance entre 10 y 15,7 l/s (Tabla 24).

Tabla 24. Estimación del Balance Hídrico de la cuenca hidrogeológica.

	Recargas	Descargas
<b>Recarga por precipitaciones (l/s)</b>	1,25 - 3,57	
<b>Extracción por pozos (l/s)</b>		8,93
<b>Descarga directa al mar (l/s)</b>		8 - 10
<b>Vertientes (l/s)</b>		2,2
<b>Subtotal (l/s)</b>	<b>1,25 - 3,57</b>	<b>10 - 16,93</b>
<b>Balance (l/s)</b>	<b>-10 a -15,7</b>	

### 7.3 Modelo Conceptual

El modelo conceptual de la cuenca hidrogeológica de Reñaca -Concón se elaboró a partir de la definición de montos de recarga, descarga, piezometría y las características de las unidades hidrogeológicas que es posible definir en el área de estudio. Si bien hasta el momento se hablaba de una subcuenca hidrogeológica, la información disponible permite definir el área de interés como una cuenca costera, cuya principal fuente de recarga son las precipitaciones locales. La geofísica permite acotar los bordes de la cuenca según lo que se interpreta como altos de basamento, por lo que es poco probable el aporte de flujos subterráneos desde otras cuencas.

Al mismo tiempo, la principal descarga corresponde a vertientes locales y un flujo subterráneo de descarga al mar, en aquellos sectores donde existe continuidad hidráulica. El balance hídrico muestra un déficit de agua, principalmente ocasionado por el cambio en las propiedades del suelo y el aumento sostenido de las extracciones antrópicas. La piezometría muestra un flujo subterráneo NE-SO (FIG. 28 y FIG. 29), a partir de la extrapolación de los únicos niveles disponibles. Si bien se intenta acotar lo más posible el monto del desbalance, la poca información actualizada de extracciones y niveles solo permite tener una idea de la magnitud de este déficit.

En cuanto al flujo subterráneo, queda establecido que un escenario previo a la urbanización existía una recarga por precipitaciones anormalmente alta debido a la composición de suelo más superficial. Este se define como la unidad UH-A1 y presenta valores de infiltración sobre los 450 mm/h según distintos ensayos Porchet llevados a cabo. Esto le da una conductividad hidráulica especialmente favorable a la parte no saturada del acuífero lo que permite una eficiente conducción del agua de infiltración hacia el acuífero.

La información granulométrica obtenida de sondajes geotécnicos permite definir la una segunda unidad hidrogeológica (UH-A2) la cual presenta un mayor contenido de finos. Esto en ocasiones produce que los niveles saturados de esta unidad presenten características semiconfinadas. Esta unidad y la subyacente (UH-C1) compuesta de roca fracturada y meteorizada, corresponden a las principales unidades acuíferas al encontrarse saturadas. La mayoría de los pozos presentan niveles en estas unidades y los parámetros hidráulicos de sus pruebas de bombeo son representativos de ellas. Si bien presentan transmisividades consistentes y no especialmente altas, lo particular del sistema acuífero Reñaca – Concón es la alta permeabilidad de la zona no saturada que, en condiciones naturales, presentaba umbrales de escorrentía equivalentes a tormentas de 5 años de periodos de retorno. En la actualidad esto se modificó por la nueva cobertura urbana, lo que aumentó la escorrentía superficial y disminuyó la recarga de aguas subterráneas.

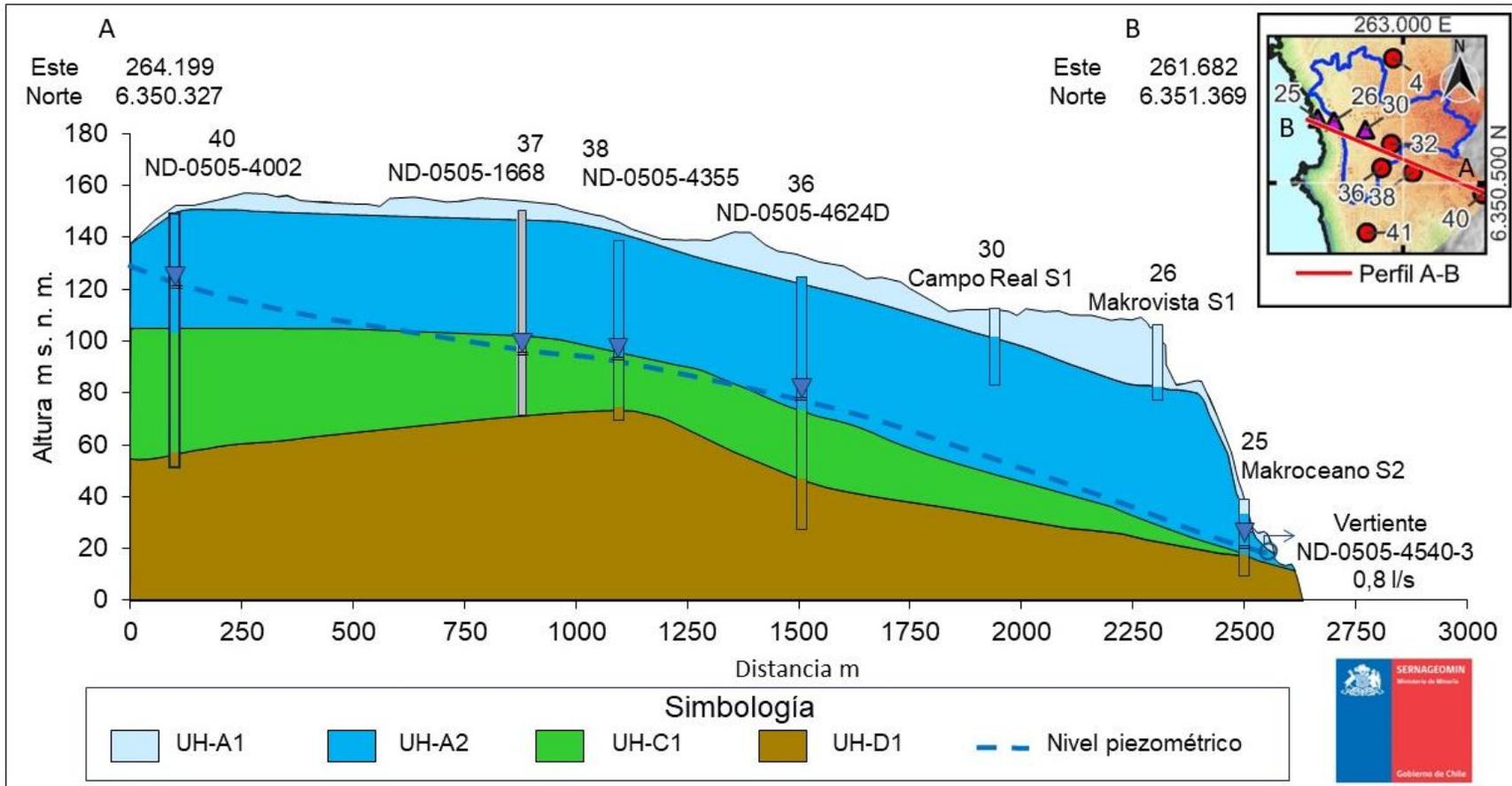


FIG. 28. Perfil Hidrogeológico SE-NO.

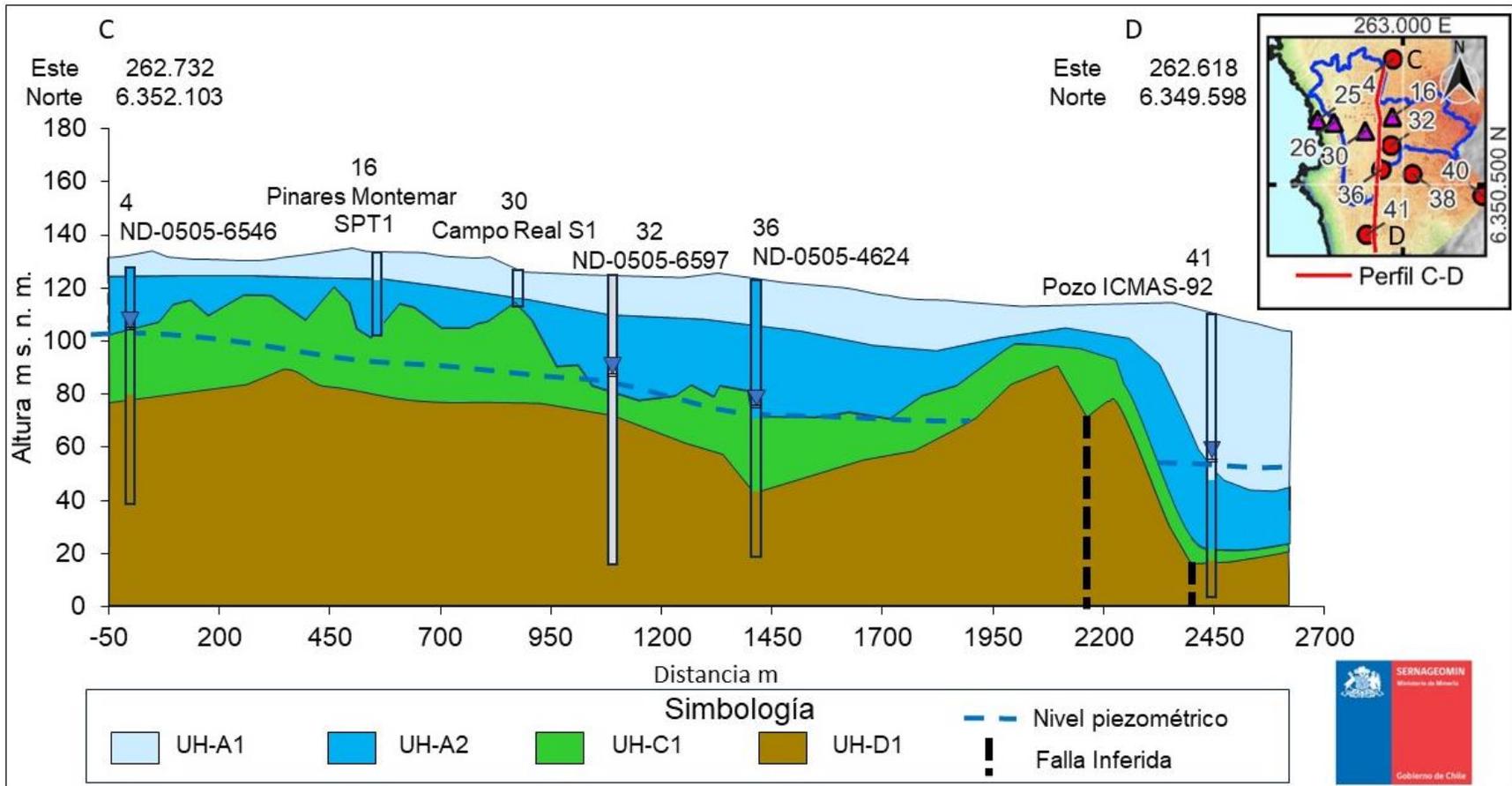


FIG. 29. Perfil Hidrogeológico N-S.

## **8. SUGERENCIAS Y MEJORAS PARA EL CONTROL DE ESCORRENTÍA Y DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA**

La caracterización del régimen de precipitaciones, escorrentía y disponibilidad de aguas subterráneas permite mejorar el diagnóstico de los eventos ocurridos en agosto y septiembre de 2023: si bien el cambio climático prevee eventos meteorológicos más intensos, el cambio de las propiedades hidráulicas del suelo a causa de la urbanización agresiva en las últimas décadas favorece la producción de flujos superficiales a partir de precipitaciones que anteriormente se infiltraban.

Los eventos meteorológicos como los de 2023, en circunstancias normales, provocarían la anegación de calles, estacionamientos subterráneos y pérdidas monetarias acotadas a estos sucesos. Sin embargo, el área de estudio presenta características geomorfológicas que favorecen la movilización de material arenoso, deslizamientos y la generación de cárcavas. Esto se debe a la presencia de un acentuado escarpe costero de material no consolidado que eleva la terraza costera sobre los 90 m s.n.m. y de pendientes mayores al 50%. La continuidad de este escarpe y su disposición paralela al borde costero la transforman en un obstáculo inevitable en el diseño de cualquier obra hidráulica, ya sea de matrices de agua potable, aguas servidas o aguas lluvia.

El caso de las aguas lluvias es especialmente de interés ya que la ocurrencia de las cárcavas en el sector de las dunas se debió al colapso del último tramo de colector que precisamente se encarga de descargar el agua hasta el mar. El área de drenaje de 2 km<sup>2</sup> y la conducción través del escarpe costero produce flujos de casi 1.000 l/s que alcanzarían velocidades de hasta 15 m/s por el interior de la tubería de hormigón de 1 m de diámetro. Si bien desde la construcción del colector han ocurrido más eventos de precipitación como el caso del año 2015, la ampliación a la superficie de drenaje actual no ocurrió hasta el año 2019 cuando se agrega a la descarga el colector Foresta de la Costa III duplicando el área anterior.

La condición de drenaje actual produce constantes anegamientos en el sector de la cuenca perteneciente a Concón, especialmente en el sector donde se ubica el supermercado Líder frente al campo dunar por Avenida Concón Reñaca. Esta situación, si bien desafortunada, es un atenuante de la carga hidráulica que recibe el colector de descarga. Lo anterior cambia luego del 2019 cuando se duplica el área de drenaje y se sobrecarga la capacidad del colector de descarga, en el que el modelo hidráulico ya asignaba velocidades fuera de norma. Por esta razón, una solución a largo plazo que se haga cargo del riesgo de erosión en el escarpe y de la eventual movilización de material, debe potenciar la recuperación de la infiltración de precipitaciones o la gestión

de áreas inundables que permite quitarle presión al colector de descarga durante las tormentas.

Si bien se escapa de los alcances del presente estudio el análisis de las normas vigentes y la viabilidad de las soluciones desde el punto de vista legal, se proponen una serie de medidas que ayudarían a disminuir el riesgo de ocurrencia de eventos similares en los nuevos colectores de descarga construidos. Sin duda que para el concretar estas medidas se necesita la coordinación y trabajo conjunto de actores privados y los órganos del estado.

## **8.1 Generación de infraestructura de infiltración**

La infraestructura de infiltración y el manejo de aguas lluvias es un campo ampliamente investigado y del cual se tiene una amplia bibliografía (ej. Minvu, 1996, 2005). Existe una gran diversidad de obras que permiten la retención e infiltración de aguas lluvias que van desde zanjas y canaletas de infiltración hasta parques inundables o lagunas. Una de las barreras de entrada para este tipo de soluciones es el área necesaria para su construcción y el mantenimiento necesario para conservar su capacidad de manejo de aguas lluvia.

En este estudio se caracterizó de la parte más superficial del suelo definida como UH-A1, la cual presenta tasas de infiltración (Ensayos Porchet >400 mm/hr) ideales para el diseño de obras de infiltración superficiales. Por otra parte, se espera que toda el agua infiltrada por este tipo de obras alcance el nivel del acuífero UH-A2 y UH-C1, lo que aumentaría el almacenamiento de agua disponible para los usuarios o ser descargada naturalmente por vertientes o directamente al mar.

Como primer paso para modificar el concepto del manejo de aguas lluvia se definieron áreas de interés para la construcción de infraestructura. Como primera prioridad se debe considerar disminuir el aporte de aguas lluvia de la extensión del colector realizada en 2019, para lo cual se debe evaluar la interrupción de la descarga a través del colector Foresta de la Costa III. Una de las zonas más atractivas corresponde al parque Foresta de Reñaca ubicado en calle Bosques de Montemar, entre Av. La Foresta de Reñaca y calle Los Médanos. Este corresponde a un parque de 2,3 ha con una extensión cruzando calle Los Médanos de 0,3 ha y que no considera la edificación en el largo plazo. Adicionalmente el colector Foresta de la Costa III se dispone adyacente al parque por Av. Bosques de Montemar. Esto favorece la implementación de sistemas de retención e infiltración del agua conducida por el primer tramo de colector Foresta de la Costa. Para desarrollar una ingeniería de detalle de las

obras se recomienda desarrollar modelos numéricos hidráulicos e hidrogeológicos, considerando el uso actual y futuro tomando en cuenta el desarrollo urbano. De forma conceptual y como primer acercamiento, dicha obra deberá ser capaz de almacenar e infiltrar entre 11.000 y 15.000 m<sup>3</sup> de agua en 24 horas, para un evento de similares características al de 2023 en la condición de uso de suelo actual. Este volumen podría alcanzar los 30.000 m<sup>3</sup> considerando una urbanización del 100% de cuenca.

Paralelamente, el bandejón central de Av. Francisco Soza Cousiño podría también albergar algún tipo de obra de retención e infiltración que permita el manejo de la parte sur del colector Balaguer-Soza. El área drenada por esta sección del colector es de aproximadamente 0,5 km<sup>2</sup> por lo que la obra debería ser capaz de manejar aproximadamente 6.000 m<sup>3</sup> en 24 horas, para un evento como el de 2023 en condiciones de uso de suelo actuales, y 15.000 m<sup>3</sup> considerando una urbanización del 100%. Sin embargo, el sistema de descarga debería mantenerse como respaldo para eventos de precipitación de mayor intensidad.

Por otro lado, el sector de la cuenca perteneciente a Concón aporta un menor caudal a la descarga del colector ya que actualmente retiene un volumen considerable de agua en los anegamientos que se generan. La principal razón de la acumulación de agua es la baja pendiente del sector que dificulta el flujo por el sistema de aguas lluvia. Las medidas para subsanar esta situación deben priorizar la construcción de infraestructura de retención e infiltración. En este sector las áreas verdes disponibles son escasas, por lo que se deberá buscar sistemas más eficientes. Por ejemplo, en un esfuerzo conjunto público - privado se podría adaptar el estacionamiento subterráneo del supermercado Líder que actualmente ya sufre de anegamientos, para que permita la infiltración de las aguas lluvias acumuladas durante los eventos de precipitación. La subcuenca que drena el colector Los Ginkos es de 0,56 km<sup>2</sup>, y podría producir desde 11.000 m<sup>3</sup> de agua en un evento similar al de 2023 y 17.000 m<sup>3</sup> cuando se encuentre 100% urbanizado.

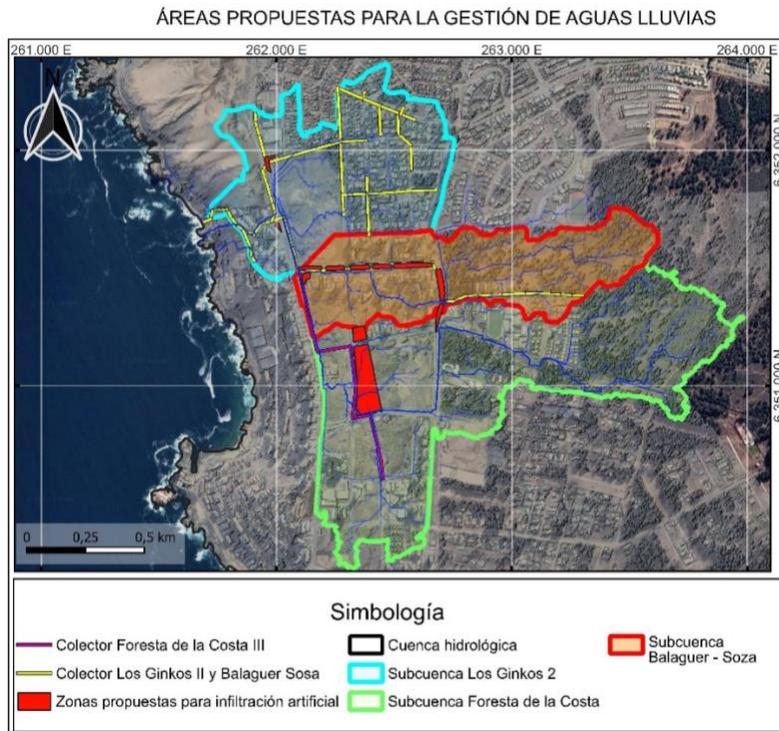


FIG. 30. Propuesta de zonas para el diseño de infraestructura de retención e infiltración.

## 8.2 Disminución de carga del sistema de colectores

Otra medida que puede ser adoptada corresponde a la modificación de la descarga de algunos colectores periféricos, dirigiendo el flujo drenado hacia las descargas por Concón centro o hacia Reñaca. Esto permitiría disminuir el área efectiva que drena la cuenca hidrológica. Adicionalmente, se recomienda suspender provisoriamente los permisos de conexión de descargas de aguas lluvias a la red, sobre todo de las nuevas obras inmobiliarias que se proyectan en el sector. Se recomienda modificar, a través del mecanismo legal pertinente, la norma de edificación en el sector de la cuenca Reñaca-Concón. El objetivo es evitar nuevas conexiones a la red de drenaje de aguas lluvias y facilitar a las constructoras mecanismos que permitan el diseño de sistemas de infiltración artificial de pequeña envergadura que se haga cargo de las aguas lluvias recolectadas para cada proyecto inmobiliario. Por ejemplo, un proyecto de 3.000 m<sup>2</sup> debería contar un sistema propio de retención e infiltración que permita manejar un volumen entre 240 y 300 m<sup>3</sup> de agua caída en 24 h.

Medidas como estas permitirían un desarrollo más armónico sustentable en cuanto permitiría la recarga del acuífero y disminuye considerablemente el riesgo de erosión en el escarpe de borde costero.

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los eventos ocurridos en 2023 en las Dunas Colgadas de Concón ubicadas sobre el sector aterrizado en el límite norte de Viña del Mar, dan cuenta de la necesidad de buscar soluciones sustentables para abordar el desarrollo urbano. A raíz de estos hechos, Sernageomin llevó a cabo sucesivas campañas de terreno cuyos objetivos fueron caracterizar los eventos de movilización de material y sus causas, desarrollar productos cartográficos para la toma de decisiones durante la emergencia, el monitoreo periódico del avance de los frentes erosivos, caracterizar de forma detallada las unidades estratigráficas expuestas en las cárcavas desarrolladas, y en el caso del presente estudio, presentar nuevos antecedentes geofísicos y caracterizar la componente hidrogeológica del sector para la evaluación conceptual de la implementación de sistemas de infiltración artificial para el manejo de aguas lluvias.

A partir de la recopilación de estudios hidrológicos y el procesamiento de registros de estaciones meteorológicas en el sector fue posible determinar que el evento meteorológico de mayor magnitud ocurrido en agosto de 2023, corresponde a un evento de frecuencia cercana a los 2 años tanto en magnitud como en intensidad máxima registrada. Dicho de otra forma, considerando el registro meteorológico cada año existe una probabilidad de un 45% que ocurra un evento similar o de mayor magnitud. Esta información además permitió establecer las variables hidrológicas para estimar el balance hídrico de la cuenca.

El análisis de imágenes satelitales permitió determinar un desarrollo urbano acelerado desde mitad de la década de los 80 en la zona, lo que ha derivado en un cambio abrupto en las propiedades hidráulicas del suelo. La cobertura actual de las arenas eólicas con calles y áreas urbanas provocó una disminución en el umbral de escorrentía promedio del área de 110 mm a 15 mm. Esto favorece la producción de escorrentía superficial, la cual anteriormente existían para eventos con recurrencia mayor a 5 años.

Dadas sus características hidrogeológicas en el sector existe una microcuenca costera cuya recarga son las precipitaciones locales y descarga a través de vertientes y de manera subterránea al mar. La gran capacidad de infiltración y permeabilidad de la parte más superficial del suelo, en este trabajo denominada unidad UH-A1, permitía que cerca del 20% de las precipitaciones medias anuales se infiltrara, favoreciendo la existencia de un acuífero local y vertientes en el borde del escarpe costero. Debido a esta característica la unidad UH-A1 es la que presenta mayor potencial para el desarrollo de infraestructura de infiltración artificial.

Las principales unidades acuíferas del sector corresponden a las unidades UH-A2 y UH-C1, que corresponden respectivamente a depósitos no consolidados asociados a la formación Horcón y al horizonte de roca altamente fracturada y meteorizada que se desarrolla sobre las rocas cristalinas de la Unidad Cochoa (UH-D1), de características impermeables. A través de prospecciones geofísicas mediante mediciones de gravimetría fue posible determinar una geometría aparente entre el contacto de las unidades UH-C1 y UH-D1, permitiendo definir límites estimados de la cuenca hidrogeológica. El modelo hidrogeológico conceptual se presenta a través de 2 perfiles que muestran la disposición de las unidades en profundidad y el flujo del agua subterránea.

La estimación del balance hídrico muestra que la cuenca se encuentra en un déficit crítico que compromete la oferta hídrica subterránea y superficial (vertientes) en el corto plazo. Las principales causas son la disminución de la recarga por el cambio de uso de suelo y la demanda de pozos de producción hidrogeológicos. Es importante que se fiscalice el cumplimiento de las resoluciones de la DGA que mandatan a los titulares de derechos el registro de los volúmenes extraídos y los niveles piezométrico en los pozos.

Dada la geomorfología del sector y la continuidad lateral del escarpe en la terraza arenosa, las pendientes de hasta 50% son un obstáculo ineludible para cualquier sistema de drenaje. Por esta razón se propone una solución que se haga cargo de las aguas lluvias antes de su concentración en el colector de descarga. Los grandes parques urbanos de hasta 2 ha existentes en el sector sur de la cuenca, junto con los bandejones centrales, son los mejores candidatos para el diseño de los sistemas de infiltración artificial. Estos, además de manejar el agua lluvia, permitirían mejorar en parte el déficit hídrico de la cuenca y deberán ser diseñados a partir de modelos hidrológicos hidrogeológicos de detalle. Además, estos sistemas no supondrían peligro alguno de erosión dado las bajas velocidades del flujo subterráneo.

Es imprescindible un plan maestro de urbanización que se haga cargo de la problemática de las aguas lluvias y no aumentar la demanda actual de los colectores. Se recomienda que mientras no se evalúe una solución que se haga cargo de los flujos de aguas lluvia, no habilitar nuevas redes de aguas lluvia hacia colectores con descarga hacia Av. Borgoño. Sin duda que esto supone un desafío que requiere participación de todos los organismos públicos y del mundo privado para llegar a soluciones que permitan un desarrollo urbano sostenible.

## 10. REFERENCIAS

- Álvarez, L. 1963. Geología del área de Valparaíso-Viña del Mar (Chile): Instituto de Investigaciones Geológicas. P- 2-21.
- Alvarez-Garretón, C.; Mendoza, P. A.; Boisier, J. P.; Addor, N.; Galleguillos, M.; Zambrano-Bigiarini, M.; Lara, A.; Puelma, C.; Cortes, G.; Garreaud, R.; McPhee, J.; Ayala, A. 2018. The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset, *Hydrology and Earth System Sciences* 40 (11): 5817–5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Araya, J. 1997. Fundamentación geomorfológica para la conservación y manejo de sistemas dunares. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis* 42: 65-72.
- Castro, C. y Andrade, B. 1990. Peritaje geográfico del campo de dunas de Punta Concón. Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile (Inédito): 37 p. Santiago.
- Cuevas, R. 2017. Análisis de los depósitos sedimentarios Terciarios-Cuaternarios en el área de Quintero-Placilla (~33°S) y sus implicancias paleogeográficas. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- DGA. 2005. Actualización de la evaluación de los recursos subterráneos de las cuencas costeras de la Va Región. Dirección General de Aguas, Departamento de administración de recursos hídricos, S.T.D N° 201: 93 p. Santiago.
- DGA. 2002. Evaluación de los recursos subterráneos de las cuencas costeras de la Va Región. Dirección General de Aguas, Departamento de administración de recursos hídricos, S.T.D N°130: 46 p. Santiago.
- DOH. 2019. Plan Maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias de Concón, Región de Valparaíso. Dirección de Obras Hidráulicas (realizado por Arrau Ingeniería SpA), PM-43. Informe etapa 7 V2 (Inédito): 748 p. Santiago.
- Falcón, F.; Valdés, A. 2012. Antecedentes Geológicos y Geomorfológicos del campo dunar, Punta Concón, comuna de Concón, Región de Valparaíso. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Final (Inédito): 16 p. Santiago.
- Fernández, D. 2020. Estratigrafía, petrografía y sedimentología de la Formación Horcón (Mioceno superior – Pleistoceno inferior) en su localidad tipo, Región de Valparaíso, Chile. Memoria de título, Escuela de Geología, Universidad Mayor. 116 p.

- Freeze, R.; Cherry, J. 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Englewood, Cliff, New Jersey: 604 p.
- Gajardo, A.; Carrasco, R.; Espinoza, F.; Sepúlveda, F. 2010. Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010: observaciones en el sector Reñaca-Cochoa, comuna de Viña del Mar, Región de Valparaíso. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe de asistencia técnica (INF- VALPARAÍSO- 03): 6p. Santiago
- González, E. En prensa. Informe: Estratigrafía Socavón norte Concón, Región de Valparaíso. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Técnico (Inédito). Santiago.
- Johnson, A. 1967. Specific Yield compilation of Specific Yields for various materials. Hydrologic properties of Earth materials, Geological Survey water supply 1662-D, 3th Edition. Washington.
- Lépez, L.; Wall, R.; Prat, M. 2005. Peligro de remociones en masa e inundaciones de las ciudades de Valparaíso, Viña del Mar y Cón Cón, Región de Valparaíso. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-05-29, 24 p., 3 anexos, 2 mapas, escala 1:10.000.
- Longman, I.M. 1959. Formulas for computing the tidal acceleration due to the moon and the sun. Journal of Geophysical Research 64: 2351-2355.
- Maliva, R. 2016. Aquifer Characterization Techniques. Springer Cham, 1° Edition: 632 p.
- MINVU. 1996. Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos: guía de diseño. Ministerio de Vivienda y Urbanismo (realizado por DICTUC): 600 p. Santiago
- MINVU. 2005. Guía de diseño y especificaciones de elementos urbanos de infiltración de aguas lluvia. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Departamentos de Obras Urbanas (Inédito): 78 p. Santiago
- Naranjo, J. En prensa. Informe socavones Concón-Reñaca agosto-septiembre 2023. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Técnico (Inédito). Santiago.
- NGA. 2013. EGM2008-WGS 84 Version. National Geospatial-Intelligence Agency. Disponible en: [http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08\\_wgs84.html](http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html) (Última consulta 16/10/2023)
- Paskoff, R.; Cuitino, L.; Maríquez, H.; Petiot, R. 2002. Nuevos antecedentes sobre la geomorfología del campo de dunas colgadas de Concón (Provincia de Valparaíso, V Región, Chile). Revista Geográfica de Chile Terra Australis 47: 43-50.

- Rivano, S.; Sepúlveda, P.; Boric, R.; Espiñeira, D. 1993. Hojas Quillota y Portillo. Carta Geológica de Chile No. 73, escala 1:250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Soil Conservation Service (SCS), United States Department of Agriculture, 1954. Draft Hydrology Guide, USDA, Washington DC.
- Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E.; Keys, D.A. 1976. Applied Geophysics. Cambridge University Press: 860 p. London.
- Thomas, H. 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de La Ligua y la Cuesta de Barriga. Santiago. IIG. Boletín n°2.