

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**INFRAESTRUCTURA URBANA Y DINÁMICA FREÁTICA EN TALUDES:
EVIDENCIA DESDE TOMÉ, CHILE**

RAÚL RODRÍGUEZ R.¹
FERNANDO HENRIQUEZ F.²
ALEX GARCÍA L.³

RESUMEN

La remoción en masa en laderas urbanizadas es un riesgo latente, donde la dinámica de interacción entre el agua superficial y subterránea juega un rol importante. Este estudio se centra en el sector de Villa Lomas de San José, comuna de Tomé, región del Biobío, para diagnosticar la dinámica de la recarga acuífera en un contexto urbano, y generar un insumo relevante para el análisis de estabilidad de taludes.

Se realizó un monitoreo piezométrico continuo entre 2022 y 2023 que reveló una respuesta rápida y homogénea del nivel freático a los eventos de precipitación. Esta rápida saturación es incompatible con la baja permeabilidad de los suelos arcillosos del lugar, la cual por sí sola implicaría una infiltración más lenta. La evidencia apunta a que el principal mecanismo de recarga no es la infiltración directa, sino el aporte concentrado y rápido de la escorrentía a través de deficiencias en la red de drenaje de aguas lluvias y otras tuberías de servicio.

Se concluye que las actividades antrópicas, específicamente el estado de la infraestructura urbana subterránea, puede ser un factor dominante que controla la hidrogeología local y, por consiguiente, potencia el riesgo de falla de deslizamientos. Este análisis demuestra la necesidad imperativa de integrar la evaluación de la infraestructura urbana en los estudios hidrogeológicos, geotécnicos y de riesgo de desastres.

¹ Jefe de Estudios, OITEC Hidráulica y Medio Ambiente Ltda. - email: rrodriguez@oitec-hidraulica.cl

² Ingeniero de Proyectos, OITEC Hidráulica y Medio Ambiente Ltda. - email: fhenriquez@oitec-hidraulica.cl

³ Gerente Técnico, OITEC Hidráulica y Medio Ambiente Ltda. - email: agarcia@oitec.cl

1. INTRODUCCIÓN

Se reconocen como los gatillantes de procesos de remoción en masa la precipitación y movimientos sísmicos; mientras que los principales factores condicionantes que aumentan la susceptibilidad del terreno se encuentra en pendientes pronunciadas, la escasa cobertura vegetal y la presencia de suelos finos (USGS, 2008). Frente a las precipitaciones, muchas ciudades que presentan superficies urbanizadas en sectores ondulantes y escarpados enfrentan desafíos en el análisis y estabilización de taludes (Mardones, 2005), donde el registro de eventos catastróficos no es escaso (CRED, 2024). Este tipo de eventos, aunque en menor escala, se ha observado en el gran Concepción y en la zona de Tomé, en la región del Biobío (Rodríguez, 2014; SERNAGEOMIN, 2023). Mardones (2005) indica que el poblamiento de los cerros que rodean el área metropolitana de Concepción ha incrementado la actividad morfogénica de las laderas durante los inviernos pluviosos, lo que estaría asociado a taludes deforestados, taludes intervenidos para la construcción de casas o carreteras, con suelos finos y alta humedad, entre otros.

La interacción entre la hidrología superficial y subterránea representa un desafío en el análisis de estabilidad de taludes, particularmente en áreas urbanas densamente pobladas, donde el terreno presenta altos grados de impermeabilización y las fallas de taludes pueden tener como consecuencia la pérdida de vidas y pérdidas socio-económicas severas (Lerner, 2002). Adicionalmente a la infiltración asociada a la precipitación directa, la caracterización hidrogeológica asociada a las variaciones del nivel freático inducidas por factores antrópicos, suele ser un componente subestimado en los análisis de estabilidad de taludes urbanos. En este sentido, Lerner (1986) indica que las filtraciones de los sistemas de aguas lluvias, servidas y agua potable pueden causar alzas piezométricas significativas capaces de provocar la inestabilidad y falla de un talud.

En el sector villa Lomas de San José en Tomé, el año 2018 un talud experimentó un deslizamiento en 80 metros de extensión, amenazando la seguridad de las edificaciones adyacentes. Ante esta situación, el análisis geotécnico de la falla recomendó desarrollar un análisis hidrogeológico para comprender la dinámica del nivel freático, reconociendo su potencial influencia en la inestabilidad del talud (OITEC geotecnia 2022). Este encargo representó una oportunidad para estudiar la respuesta del acuífero a la recarga en un entorno de infraestructura urbana.

2. METODOLOGÍA

Se realizó un monitoreo de niveles freáticos, se analizaron registros meteorológicos, se identificó la red primaria de evacuación de aguas lluvias, se analizó el tipo de suelo y pendiente del terreno para identificar patrones sobre el comportamiento del acuífero.

1. SITIO DE ESTUDIO

El sitio de estudio corresponde al sector villa Lomas de San José, emplazado referencialmente en la coordenada UTM (m) N: 5.947.052 y E: 682.661, datum WGS84, Huso 18 Sur, en la zona norte de la comuna de Tomé, región del Biobío (Figura 1-1).

En el área urbana de Tomé, sobreyace al basamento rocas sedimentarias marinas del Cretácico Superior, que afloran en el borde costero y que están compuestas principalmente por conglomerados, areniscas y lutitas (OITEC Geotecnia, 2022). Esta secuencia sedimentaria en la zona se caracteriza por areniscas muy meteorizadas con alto contenido de arcillas. En el sitio de estudio los suelos se reconocen a partir de información estratigráfica levantada por ARAGON (2019) y OITEC Geotecnia (2022), donde se observan principalmente dos unidades; la unidad 1 corresponde a un suelo cohesivo mayoritariamente arcilloso que se extiende desde la superficie hasta aproximadamente 9 metros bajo el nivel del terreno (m.b.n.t.), con intercalaciones de mayor o menor espesor de material limoso arcilloso o limo arenoso arcilloso, bajo la cual subyace la unidad 2 asociada a materiales finos arenoso limoso arcilloso y limo arenoso arcilloso, con comportamiento muy denso, con alta resistencia a la penetración.

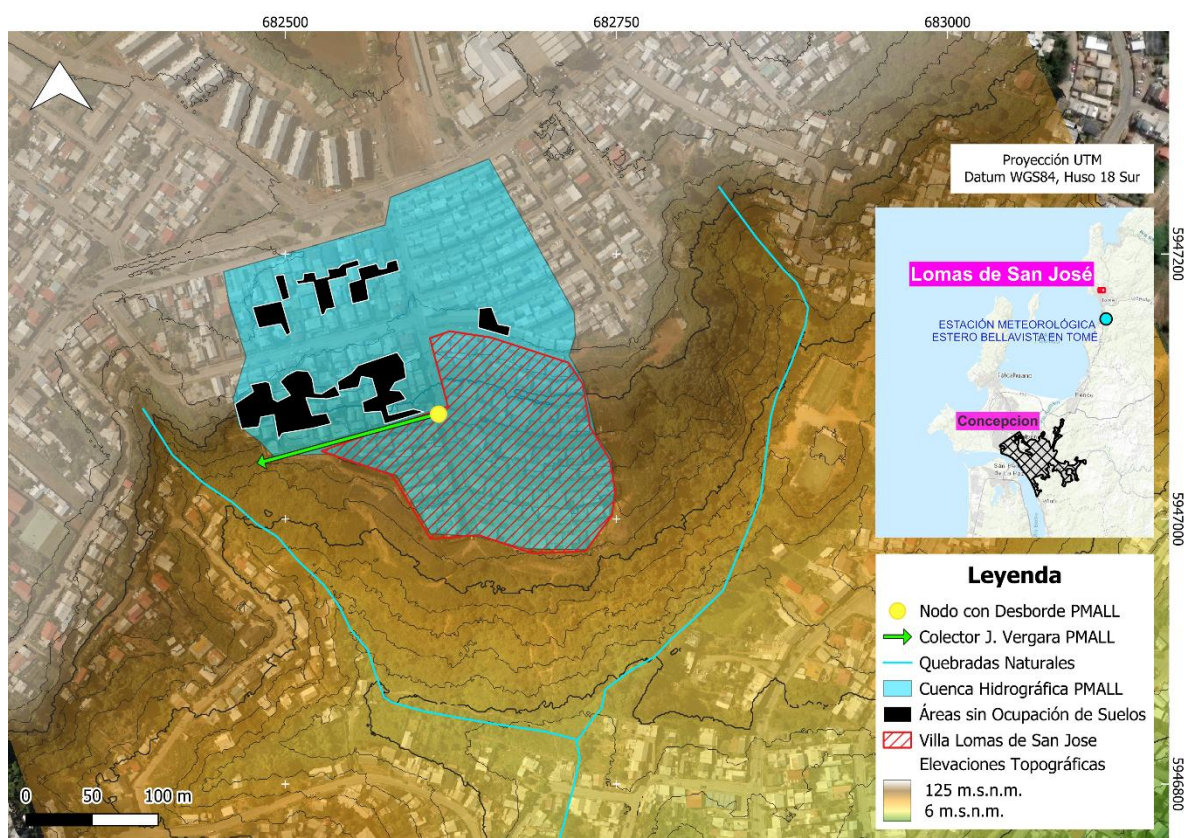


Figura 1-1 Sitio de estudio sector villa Lomas de San José.

En el sitio de estudio se reconoce un acuífero subsuperficial con una potencia aproximada de 6 a 10 metros, cuyo nivel freático se encuentran en torno a los 2,3 a 4,5 m.b.n.t. (OITEC Hidráulica y Medio Ambiente, 2023), tiene permeabilidad media a impermeable, con una conductividad hidráulica entre $1,0 \times 10^{-09}$ y $1,1 \times 10^{-05}$ m/s (OITEC Geotécnica, 2022), porosidad total del suelo de 48 a 52% (ARAGON, 2019), a los que se asocia una porosidad efectiva de 5 a 20% según sugiere Dessargues (2019). Con estos valores, aplicando la ecuación de Darcy ($V=k*i/n$), se estiman velocidades de infiltración bajas (Dessargues, 2019) de entre $1,8 \times 10^{-5}$ a $2,0 \times 10^{-1}$ m/h.

El sitio de estudio se emplaza entre la cabecera de dos cuencas hidrográficas que drenan en dirección sur, con elevaciones topográficas de 115 m.s.n.m. en la divisoria de aguas y de 42 m.s.n.m. en la confluencia de dos quebradas naturales (Figura 1-1). El área de drenaje superficial tiene una extensión de 8,6 ha y se encuentra condicionada por el sistema de drenaje de aguas lluvias existente (MOP, 2004).

El área de drenaje se encuentra con un nivel de urbanización completa y un grado de ocupación de cerca de 90% de la superficie total, con un coeficiente de escorrentía entre 0,68 y 0,89, lo que permite inferir que entre un 32 y 11% de las precipitaciones que toca el suelo podría infiltrar. La precipitación media anual es de aproximadamente 815,1 mm, con incremento de las precipitaciones durante los meses de invierno, con un máximo promedio mensual de 173,9 mm para el mes de julio.

Para la materialización del conjunto habitacional se realizaron movimientos de tierra que implicaron cortes, rellenos y compactación del suelo, nivelando plataformas de hasta 10 metros de altura con pendientes entre 13 y 19%, lo que generó múltiples deslizamientos de los taludes perimetrales del sector (OITEC Geotécnica, 2022). Los eventos de remoción en masa en el sitio de estudio son identificados por Sanhueza (2022), quien describe deslizamientos de los taludes oriente, poniente y sur de la villa Lomas de San José. Algunos de estos deslizamientos o fallas de los taludes se muestran en la Figura 1-2.

Por otra parte, durante inspecciones del trazado del sistema de evacuación de aguas lluvias y aguas servidas realizados el año 2023 se observó sumideros y descargas colmatadas, tuberías rotas y otras deficiencias.

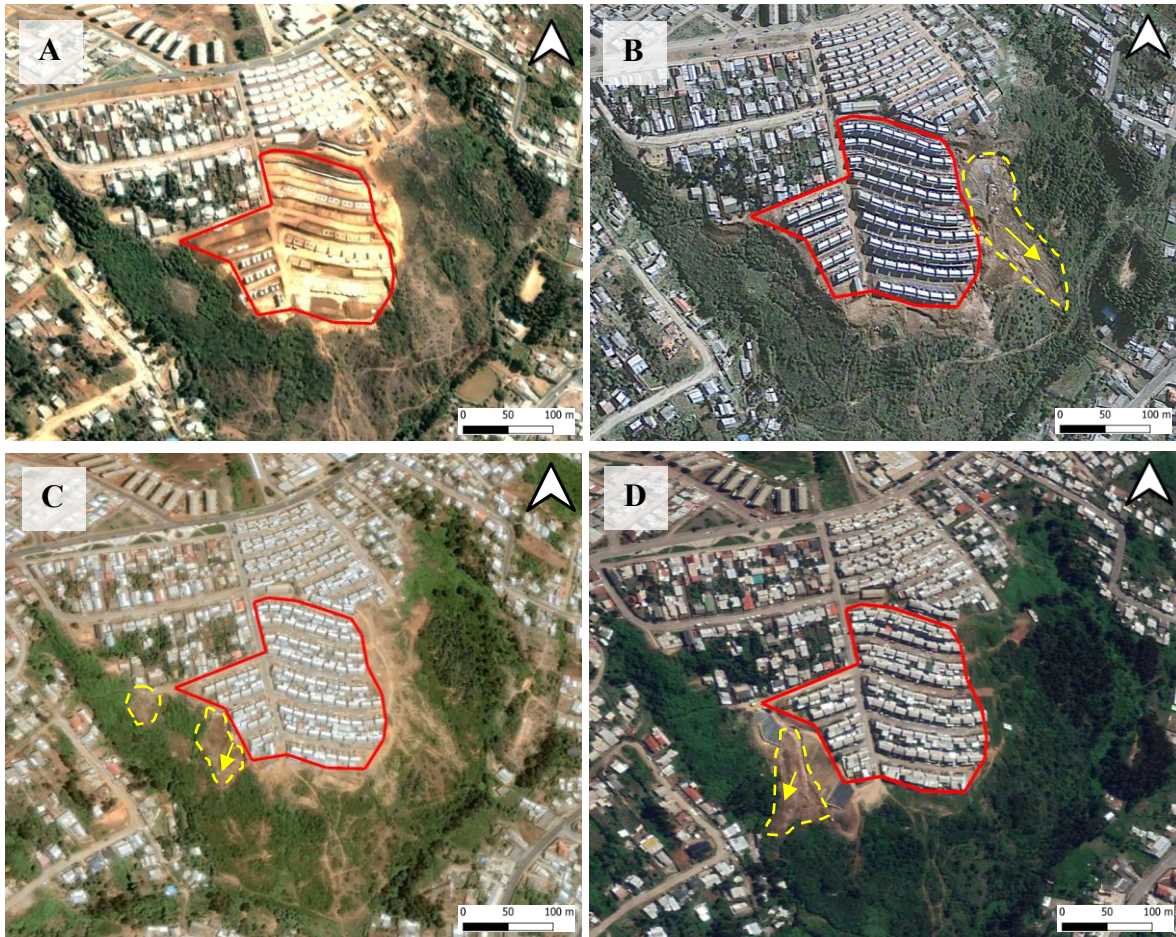


Figura 1-2 Fotografías satelitales obtenidas de Google Earth, (A) movimientos de tierra durante construcción de la villa Lomas de San José año 2009, (B) evento de remoción en masa año 2012 sector oriente, (C) evento de remoción en masa año 2014 sector poniente, y (D) evento de remoción en masa año 2018, falla de talud sector poniente.

2. INSTRUMENTACIÓN

Se instalaron cuatro piezómetros de 10 metros de profundidad, de tubo abierto con ranurado de abertura 2 mm, cubierto de geotextil de malla 180 gr/m², para adecuarse al tipo de suelo fino siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM D5092 (ver Figura 2-1). Los piezómetros P-2, P-3 y P-4 fueron instalados en la cabecera de los taludes oriente, poniente y sur; mientras que el piezómetro P-1 fue instalado en la zona central del sitio de estudio, alejado de los taludes (ver Figura 2-2).

Cada piezómetro fue habilitado con un sensor de presión sumergible marca HOBO modelo U20-001-01, con rango de medición de 0 a 9 metros, con precisión de elevación de agua de $\pm 0,5$ cm y $\pm 0,62$ Kpa de presión, y fueron configurados para obtener registros con intervalo de 1 hora. Además, se habilitó otro sensor de presión para registrar la presión atmosférica, de manera de corregir los datos de los piezómetros. Cada uno de los sensores cuenta con un sistema de registro de datos por lo que la adquisición se realizó mediante descarga manual a través de un interfaz óptico tipo USB conectada a un computador de campo.

Paralelamente se realizó una medición de nivel piezométrico puntual mediante un pozómetro marca Geotech modelo ET de 100 metros de extensión, con precisión de elevación de agua de $\pm 0,3$ cm.

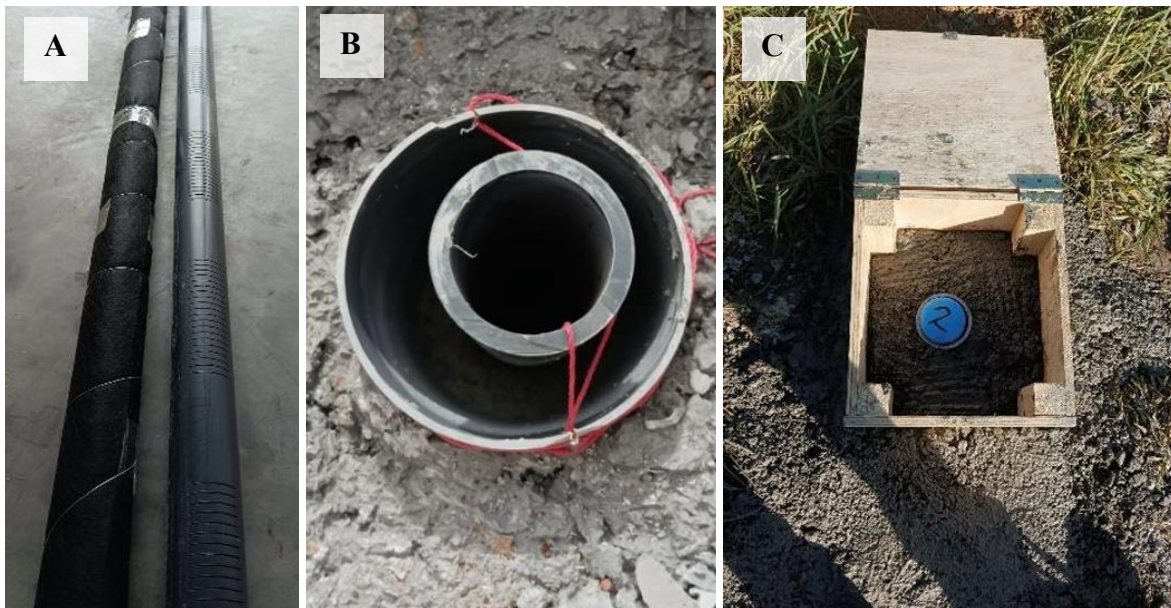


Figura 2-1 Fotografías de piezómetros instalados en zona de estudio, (A) tubo piezométrico con y sin geotextil, (B) piezómetro y tubo de revestimiento, y (c) emplentillado de lechada de cemento y caja de protección de piezómetros.



Figura 2-2 Emplazamiento de piezómetros instalados en zona de estudio.

3. MONITOREO Y RECOLECCIÓN DE DATOS

El monitoreo de los niveles freáticos se desarrolló de manera continua, entre el 24 de octubre de 2022 y el 5 de septiembre de 2023, donde se ejecutaron siete campañas de descarga manual de datos en terreno, junto con una medición puntual del nivel piezométrico mediante pozómetro como método de control y verificación de las lecturas de los sensores de presión. Las campañas se ejecutaron el 25/11 de 2022, y el 15/02, 24/03, 03/04, 31/05, 05/07 y 05/09 de 2023.

Los datos de precipitaciones fueron obtenidos desde la estación meteorológica Estero Bellavista en Tomé, código Banco Nacional de Aguas N°08210003-2, operada y administrada por la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP). La estación se encuentra vigente desde 2009 y cuenta con registros horarios de precipitación⁴.

Tabla 3-1 Información de estación meteorológica de referencia.

Nombre estación	Coordenadas UTM (m) WGS 84, H18S		Elevación (m.s.n.m.)	Distancia (km)	Periodo disponible (años)	Nivel completitud periodo de análisis año 2022-2023 (%)
	Norte	Este				
Estero Bellavista en Tomé	5.943.149	683.321	7	3,9	2009-2025	100

4. ANÁLISIS DE DATOS

El tratamiento de los datos de nivel y precipitación se realizó con planillas de cálculo con el software Microsoft Excel. Estos datos fueron sincronizados para permitir un análisis comparativo temporal. Los datos se graficaron en series de tiempo para visualizar la variación de los niveles freáticos en relación con los eventos de precipitación, evaluando la respuesta del acuífero a la recarga mediante la magnitud del ascenso observado en cada piezómetro.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los registros de niveles piezométricos y las precipitaciones se muestran en la Figura 5-1 y Figura 5-2. En los gráficos se indican los eventos EP-1 a EP10, que corresponden a variaciones del nivel freático relevantes para eventos de precipitación mayores a 10 mm; y los eventos E-1 y E-2 que corresponden a eventos de variaciones del nivel freático que aparentemente no se asocian a precipitaciones. La falta de algunos registros en los piezómetros P-2 y P4 se deben a fallas instrumentales; mientras que el P-3 fue vandalizado en marzo de 2023.

En las figuras se observa un patrón estacional, con un descenso de los niveles piezométricos durante los meses de estiaje, y ascensos marcados durante los eventos de lluvia. En todo el periodo de registro, el nivel del acuífero varía entre -4,8 m a -0,2 m. El piezómetro P-2 registra consistentemente los niveles más someros, unos 2 metros sobre el registro de los piezómetros P-1 y P-4.

⁴ https://snia.mop.gob.cl/dgasat/pages/dgasat_param/dgasat_param.jsp?param=1

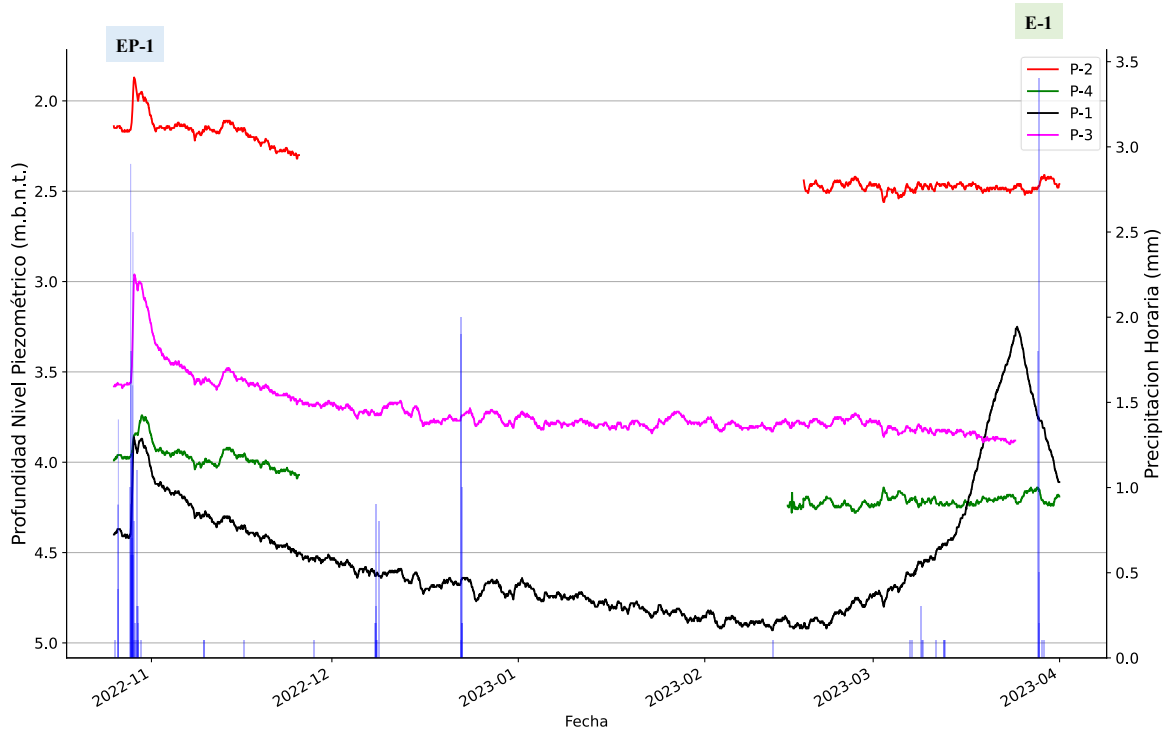


Figura 5-1 Registro de niveles de piezómetros y precipitaciones horarias periodo octubre 2022 a marzo de 2023.

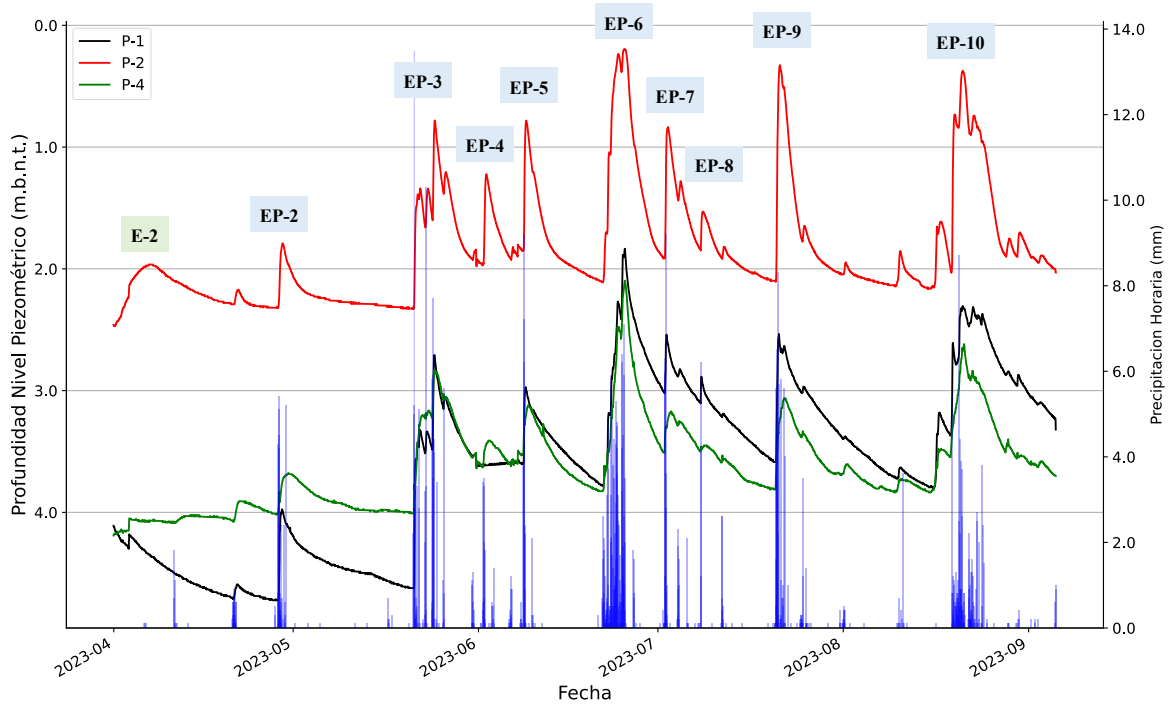


Figura 5-2 Registro de niveles de piezómetros y precipitaciones horarias periodo abril de 2023 a septiembre de 2023.

Existe una relación positiva entre la precipitación y la variación de los niveles, donde el P-2 presenta el mayor ascenso, seguido del P-1 y luego el P-4. Esto sugiere que P-2 está emplazado en una zona de mayor permeabilidad o con una conexión más eficiente a los sistemas de recarga del acuífero. El piezómetro P-4 presenta una respuesta de menor magnitud y más atenuada, lo que podría indicar una conexión a la misma fuente de recarga, pero a través de medios con mayor retardo o menor eficiencia hidráulica. El piezómetro P-1 muestra una respuesta variable y tiempos de recesión más lentos, apuntado a una menor permeabilidad local o un mayor coeficiente de almacenamiento.

La Tabla 5-1 caracteriza cada uno de los eventos de precipitación, indicando i) la fecha de inicio y término, ii) la duración y el monto de lluvia acumulado, iii) la máxima variación del nivel, que corresponde a la diferencia del nivel piezométrico al inicio de la tormenta, y el nivel más alto registrado durante la tormenta o al menos 6 horas posterior acabada la tormenta, iv) el retardo en el inicio de la variación de nivel, que corresponde al tiempo desde comenzada la tormenta hasta que los piezómetros registran una señal de variación del nivel freático, y v) el retardo de la máxima variación del nivel, que corresponde al tiempo desde comenzada la tormenta en que se registra la máxima variación del nivel piezométrico.

Tabla 5-1 Descripción de los eventos de precipitación y respuesta de los piezómetros.

Evento de Precipitación				Máxima Variación Nivel (m)			Retardo en Inicio Variación Nivel (h)			Retardo Máxima Variación Nivel (h)		
Evento	Fecha	Duración (h)	PP Total (mm)	P-1	P-2	P-4	P-1	P-2	P-4	P-1	P-2	P-4
EP-6	21-25/06/23	92	168,8	1,94	1,91	1,73	7	6	6	90	87	90
EP-3	21-25/05/23	94	109,7	1,91	1,54	1,17	4	4	2	83	85	82
EP-10	19-25/08/23	141	89,6	0,90	1,63	0,76	1	1	2	44	44	49
EP-9	20-22/07/23	53	79,8	1,05	1,77	0,75	6	6	4	17	21	37
EP-2	28-29/04/23	44	43,0	0,75	0,53	0,33	15	15	15	28	29	48
EP-5	08-08/06/23	22	38,6	0,62	1,05	0,38	14	15	13	21	23	27
EP-7	02-02/07/23	14	37,4	0,47	1,08	0,30	4	4	3	10	15	18
EP-1	28-29/10/22	32	19,9	0,54	0,29	0,19	2	4	6	14	15	37
EP-4	01-02/06/23	10	16,0	*	0,75	0,18	*	4	4	*	14	14
EP-8	07-08/07/23	12	11,7	0,19	0,27	0,02	11	12	0**	13	17	0**

*Aparente error de lectura del sensor de presión

**Lectura se registra en menos de 1 hora

De la tabla anterior se desprende que hay retardos en el inicio de la respuesta de los piezómetros de entre 1 hasta 15 horas, y tiempos de retardo para el registro de la máxima variación del nivel piezométrico de entre 13 a 90 horas. A pesar de las marcadas diferencias en la magnitud de la respuesta, los tiempos entre el inicio de la lluvia y la primera reacción del nivel son notablemente homogéneos entre los tres piezómetros para cada evento de precipitación. Esta sincronización en la respuesta inicial, a pesar de la distancia espacial entre los sensores, sugiere un mecanismo de recarga rápido y distribuido que afecta al sistema de manera casi simultánea.

De los mismos datos, se desprende la Figura 5-3 que presenta los registros de variación del nivel freático frente a los 10 eventos de precipitación. Para los tres piezómetros se observa una tendencia creciente del nivel freático con la precipitación, donde P-4 presenta una marcada proporcionalidad.

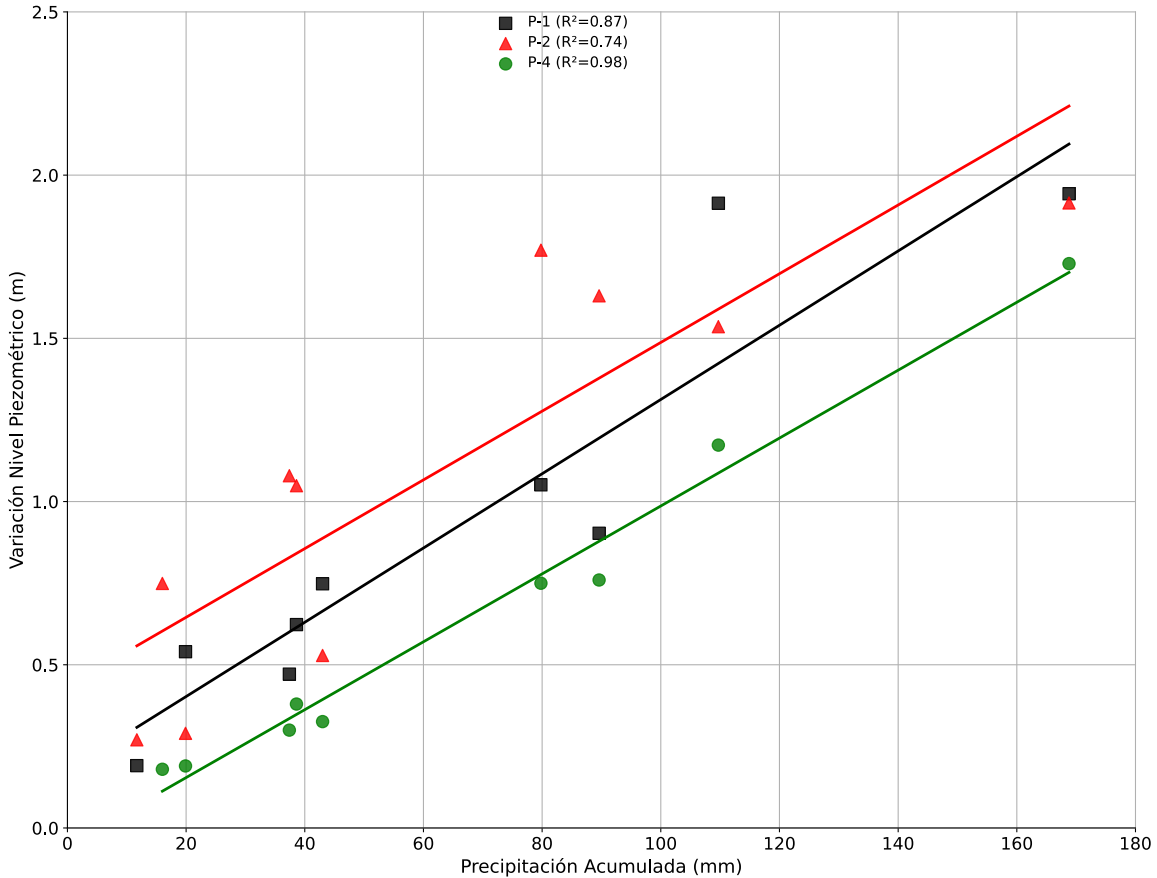


Figura 5-3 Variación del nivel piezométrico considerando los eventos de precipitación EP-1 a EP-10.

Los registros muestran una respuesta rápida y relativamente homogénea del nivel freático a los eventos de precipitación, lo que es incompatible con la baja permeabilidad de los suelos, la cual por sí sola implicaría una infiltración más lenta. Esta discrepancia respecto de los registros permite inferir que la recarga del acuífero no está dominada por la infiltración vertical directa del agua lluvia. Por el contrario, los resultados sugieren que la recarga principal se produce a través de un sistema de drenaje artificial, como colectores de aguas pluviales, que introducen los volúmenes de escorrentía de forma rápida y eficiente en el subsuelo, explicando tanto la rapidez como la homogeneidad temporal de la respuesta piezométrica.

Los análisis convencionales de inestabilidad de taludes o riesgos de fallas asumen una saturación lenta del suelo, controlada por la infiltración directa. Sin embargo, nuestros hallazgos demuestran que la saturación puede ser mucho más rápida debido a fugas en la infraestructura de drenaje. Por lo tanto, el análisis, la reparación y el mantenimiento de estas redes son medidas de mitigación tan críticas como las obras de ingeniería tradicionales.

6. CONCLUSIÓN

Nuestro análisis hidrogeológico, basado en el monitoreo continuo de cuatro piezómetros dispuestos en el sector de villa Lomas de San José, en la comuna de Tomé, permitió caracterizar la compleja dinámica del acuífero subsuperficial y generar un insumo relevante en el análisis de inestabilidad de los taludes urbanos.

A partir de la correlación del registro de niveles y los eventos de precipitación, se observa que el sistema hidrogeológico es marcadamente reactivo, lo que demuestra que las precipitaciones son un detonante principal y rápido de la saturación del suelo, aun cuando el nivel de urbanización y cobertura del suelo superan el 90% de la cuenca, lo que puede estar inducido probablemente a la rotura y/o deficiencias en el sistema de evacuación de aguas lluvias. Además, deficiencias de otros sistemas de servicio como el abastecimiento de agua potable y la evacuación de aguas servidas, podrían explicar la señal de ascenso de los piezómetros P-1 y P-2 en algunos eventos que no guardan relación con la precipitación.

La hidrogeología en villa Lomas de San José está gobernada por una compleja interacción entre la recarga natural por lluvia y la influencia antrópica derivada de la infraestructura urbana. Estudiar estos comportamientos es relevante para el análisis de estabilidad de taludes, más aún en un país sísmico como Chile. Consecuentemente, en contextos urbanos es indispensable incluir una caracterización detallada de la hidrogeología local y una evaluación exhaustiva del estado de la infraestructura de servicios para mitigar eficazmente el riesgo de remoción en masa.

REFERENCIAS

ARAGON Ingeniería de Suelos Ltda. 2019. Informe Definitivo: Resultados de Ensayos de Laboratorio de Mecánica de Suelos, Sector Lomas de San José.

Centre of Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) 2024. Disaster in Numbers 2023.

Dessargues A. 2019. Hydrogeology Groundwater Science and Engineering. First Edition. Taylor & Francis Group. 2019.

Lerner D. 1986. Predicting Piezometric Levels in Steep Slopes. Groundwater in Engineering Geology. PP 327-333, London 1986.

Lerner D. 2002. Identifying and Quantifying Urban Recharge: A Review. Hydrogeology Journal 10, PP 143-152. 2002.

Mardones M., Echeverría F. & Jara C. 2005. Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile Centro Sur: efectos ambientales de las precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el área Metropolitana de Concepción.

MOP 2004, parte del cual se describe por B&S Ingenieros (2004) en el Plan Maestro de Aguas Lluvias de Penco-Tomé.

OITEC Hidráulica y Medio Ambiente Ltda. 2023. Estudio Hidrogeológico Villa Futuro Lomas de San José.

OITEC Geotecnia Ltda. 2022. Informe Diagnostico y de Mecánica de Suelos, Estudio Hidrogeológico Villa Futuro, Lomas de San José, comuna de Tomé.

Rodríguez R., Oróstegui P., Basso M. & García A. 2014. Estimación y contención de un evento de remoción en masa con un enfoque interdisciplinario. XXXV Congreso nacional y XX internacional de Geografía. Coyhaique.

Sanhueza A. 2022. Análisis de Cuencas Hidrográficas y Peligro Geológico, Sector Lomas de San José, comuna de Tomé, región del Biobío.

Sepúlveda N. 2024. Remociones en masa detonadas por precipitaciones durante agosto y septiembre de 2023, comunas de Tomé, Talcahuano y Hualpén, Gran Concepción, Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Técnico. Concepción.

USGS. 2008. The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides. United States Geological Survey.