



Análisis del agua subterránea en la Región Metropolitana de Guatemala:
evidencia de una crisis silenciosa

© 2026 Instituto Biosfera. Todos los derechos reservados.



www.ibiosfera.com

Diseño e impresión:



3a. avenida 14-62, zona 1
Ciudad de Guatemala
PBX: (502) 2245-8888
www.serviprensa.com

Portada y Diagramación: Suheidy Felipe

Revisión textos: Jaime Bran

Esta publicación fue impresa en junio de 2026.
La edición consta de 500 ejemplares en papel bond 80 gramos.



"...la tierra tiene música para aquellos que la escuchan"

Reginald Vincent Holmes, 1955.
The Magic of sound.

Contenido

Presentación.....	9
PARTE 1: Resumen Ejecutivo	
1. ¿Por qué es importante el agua subterránea (y su estudio) en la Región Metropolitana?	13
2. Métodos y aportes originales de esta investigación	15
3. Resultados: estado de los acuíferos, disponibilidad de agua subterránea y calidad de los recursos hídricos a lo largo del tiempo	15
3.1. Vaciado del sistema regional de acuíferos.....	15
3.2. Análisis espacial del descenso en el nivel freático (mapa de isodescensos)	17
3.3. Factores que propician un vaciamiento de acuíferos tan acelerado.....	20
4. Cambios urgentes en la gestión del agua subterránea	21
4.1. Grandes desafíos y marco de trabajo	21
4.2. Acciones inmediatas para la seguridad hídrica en la Región Metropolitana de Guatemala (RMG).....	21
PARTE 2: Reporte Científico	
Análisis del agua subterránea en la Región Metropolitana de Guatemala.....	25
Resumen técnico	25
Technical summary	26
I Introducción	27
II. Metodología.....	30
III. Resultados	33
a. Estado del conocimiento hidrogeológico	33
b. Definición de la Línea base. Caracterización y estado del sistema hidrogeológico del Valle de la Ciudad de Guatemala (1975-77).....	37
b.1. Delimitación y descripción hidrogeológica del sistema de acuíferos	37
b.2. Descripción de los principales acuíferos del sistema hidrogeológico regional	40
c. Dinámica del volumen de agua almacenado en el sistema de acuíferos y su agotamiento.....	43
d. Análisis de los factores relevantes que inciden en la disminución del nivel freático y vaciado de acuíferos	52
e. Calidad de los recursos hídricos.....	60
IV. Conclusiones	64
Referencias bibliográficas	65

Análisis del agua subterránea en la
Región Metropolitana de Guatemala:
evidencia de una crisis silenciosa

Presentación

El Instituto Biósfera entrega el reporte científico: Análisis del agua subterránea en la Región Metropolitana de Guatemala: evidencia de una crisis silenciosa. Este trabajo es una contribución académica enfocada en la investigación y divulgación de temas del más alto interés social e institucional, tal como la seguridad hídrica y el riesgo sistémico en la conurbación más poblada de Centroamérica.

Esta iniciativa surge en el seguimiento a nuestra misión de generar y democratizar el conocimiento científico y tecnológico necesario para superar los principales desafíos sociales y ecológicos de Guatemala y Mesoamérica.

Bajo estas premisas, la actualización y comprensión profunda del estado actual y dinámica de la disponibilidad de agua subterránea en la Región Metropolitana de Guatemala, fue designada como una investigación estratégica y apremiante. El estudio busca cerrar brechas de conocimiento fundamental para impulsar procesos sociales que logren romper los ciclos nocivos que obstaculizan el desarrollo. Asimismo, busca contribuir a revertir el grave deterioro ecológico que hoy actúa como una forma de autosabotaje frente a nuestras aspiraciones colectivas.

A través de métodos científicos rigurosos, esta investigación documenta niveles muy avanzados de agotamiento y degradación cualitativa de la principal fuente de agua de la región. Ante la magnitud de la crisis y un vacío de atención pública, el Instituto Biósfera ha asumido la comunicación científica y la implementación de proyectos de alto impacto en el territorio. Dicha labor genera beneficios hidrológicos directos y cuantificables, válida innovación tecnológica y, lo más importante, consolida alianzas y capacidades locales para la gestión integral del agua.

Ante la necesidad manifiesta de gestión colectiva de los riesgos asociados al agua, el Instituto Biósfera impulsa el **Centro de Ciencia y Tecnología del Agua - Región Metropolitana**. Esta plataforma articula a ciudadanos, científicos, ingenieros e instituciones para promover el uso de tecnología de vanguardia, el monitoreo hidroclimático, la generación de sistemas de alerta y la comunicación democrática. A partir de esta iniciativa se generarán análisis de riesgos y planificación coherente, de acuerdo con los desafíos actuales en seguridad hídrica. Próximamente, estaremos compartiendo más detalles sobre este importante esfuerzo.

Agradecemos profundamente a nuestros socios institucionales, la comunidad científica nacional e internacional, así como a los amigos que nos acompañan en esta misión. Con la continuidad de nuestras investigaciones, publicaciones y acciones en el territorio, buscamos transformar el mejor conocimiento científico en asistencia técnica especializada y en soluciones asertivas frente a los grandes desafíos de nuestra sociedad.

Consejo directivo de Instituto Biósfera

PARTE

1

Resumen Ejecutivo

**Dirigido especialmente a responsables
institucionales, comunidad académica y
comunicadores**

Análisis del agua subterránea en la Región Metropolitana de Guatemala (RMG), evidencia de una crisis silenciosa

- Fuerte descenso en el nivel freático (“tabla de agua subterránea”) con un promedio regional de al menos 150 m, en el período de 50 años comprendido desde 1975 a 2025. Algunos pozos muestran caídas de 10 m/año.
- La sobreextracción acumulada durante 50 años ha generado el vaciamiento del sistema regional de acuíferos en al menos 30% del agua disponible total. Es decir, de un volumen inicial (1975) de 31,500 millones de m³ se han consumido (extracción neta) al menos 10,500 millones de m³.
- El exceso de extracción de agua subterránea se ha incrementado drásticamente desde valores muy bajos, reportados en 1975, hasta déficits de entre 270 y 400 millones de m³/año en la actualidad. En consecuencia, es previsible el colapso progresivo de los acuíferos durante las próximas décadas.
- Evidencia de un colapso estructural que ya ha iniciado: a) inexistencia de fuentes superficiales de abastecimiento confiable, b) el acuífero superior ya es improductivo en muchos sitios, c) en diversos sectores se encuentran pozos con fuertes descensos en su capacidad productiva, d) aumento de pozos contaminados y e) alta probabilidad del próximo desecamiento del lago Amatitlán.
- Daños muy difíciles de revertir o gestionar: el análisis integral de fuentes superficiales y subterráneas, demuestra muy alto riesgo de agotamiento y contaminación de acuíferos en sus principales líneas de flujo.
- Se prevé que aumenten continuamente los casos de inviabilidad técnica o financiera de pozos actuales y futuros. Es importante distinguir una alta heterogeneidad espacial, es decir, que algunas zonas son mucho más sensibles que otras al agotamiento o contaminación del agua subterránea.

1. ¿Por qué es importante el agua subterránea (y su estudio) en la Región Metropolitana?

La Región Metropolitana de Guatemala (RMG), es relativamente pequeña (800 km²); sin embargo, se constituye en el epicentro de la mayor concentración humana y económica de Centroamérica, el Caribe y el Sur de México. Ver delimitación del área de estudio en la Figura RE-1.

El agua subterránea en la RMG se ha convertido en la principal fuente de abastecimiento directo a una población aproximada de 4 millones de personas (~20 % del total nacional), incluyendo a la población flotante o temporal. En esta zona la economía nacional genera más del 50 % del PIB. Lo anterior es dependiente de ecosistemas hidrológicos de alta relevancia socioambiental, como el lago Amatitlán, las corrientes superficiales y los acuíferos. De forma implícita, se confía en el sistema regional de acuíferos para abastecer las necesidades colectivas de agua para el presente y el futuro.

La importancia socioeconómica y ambiental del agua subterránea en la RMG es incuestionable; sin embargo, se tienen indicios de un acelerado y muy peligroso deterioro. Actualmente, no se tiene claridad sobre los criterios técnicos necesarios para dirigir acciones de protección, restauración, gestión de riesgos y la seguridad hídrica. En tal sentido, es fundamental actualizar el conocimiento sobre niveles de agotamiento, degradación cualitativa y vida útil del sistema regional de acuíferos.

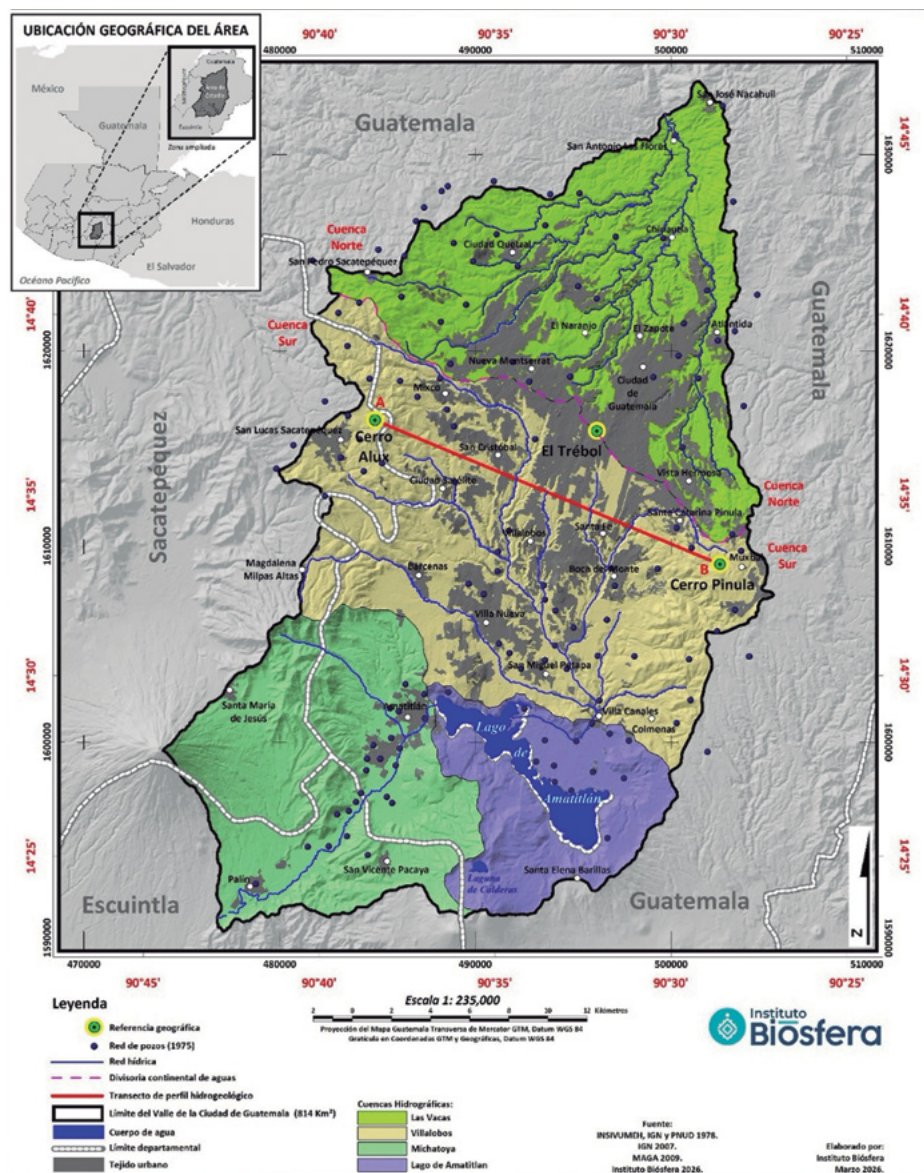


Figura RE-1. Mapa de ubicación del área de estudio de aguas subterráneas en la Región Metropolitana de Guatemala

Fuente: Elaboración propia



Río Las Vacas

Fuente: Fotografía de César Augusto Castañeda.

2. Métodos y aportes originales de esta investigación

Se caracterizó y evaluó el estado histórico, actual y tendencial del sistema de acuíferos existentes en la RMG (Figura RE-1). Para tal fin, se llevó a cabo la integración, homologación y revisión crítica y exhaustiva de los estudios técnicos disponibles. Se definieron indicadores hidrogeológicos, balances hídricos y análisis de disponibilidad y calidad del recurso hídrico.

Se logró establecer una línea base de referencia (centrada en 1975), utilizando el estudio más completo realizado hasta la fecha, Insivumeh-IGN-ONU (1978). El estado actual (centrado en 2025) y tendencias, se determinó mediante el uso de indicadores seleccionados, los cuales fueron obtenidos de fuentes primarias y secundarias de alta confiabilidad. Por primera vez, se documentan los siguientes productos analíticos:

- a) Mapas y bases de datos asociadas de los niveles freáticos centrados en los años 1975 y 2025;
- b) Estado actual y proyección de la disponibilidad de agua subterránea y el vaciamiento del sistema regional de los acuíferos para las próximas décadas; y,
- c) Análisis de los principales factores que inciden e interactúan en el agotamiento cuantitativo y en el deterioro cualitativo tan acelerado del agua subterránea en la RMG.

3. Resultados: estado de los acuíferos, disponibilidad de agua subterránea y calidad de los recursos hídricos a lo largo del tiempo

Se estableció que los estudios técnicos disponibles se caracterizan por ser escasos y haber sido generados con alcances y metodologías muy heterogéneas, lo cual dificulta su evaluación y puede limitar su utilidad en la gestión hídrica y la comunicación pública.

Se elaboró una base de datos con indicadores físicos y cuantitativos, la que permitió establecer, con muy alto nivel de confiabilidad técnica, el estado y dinámica de los acuíferos. Se definió una línea base de referencia (1975). A partir de esta línea de base, se evaluaron 50 años de cambios hasta la actualidad (centrada en 2025), y se proyectó la disponibilidad de agua y nivel de vaciado para los próximos 40 años, mostrando un deterioro significativo y eventual colapso durante las próximas tres décadas (Figura RE-2).

3.1. Vaciado del sistema regional de acuíferos

El análisis enfocado en los cambios del agua almacenada en el sistema regional de acuíferos logró cuantificar un acelerado e incremental agotamiento hasta la actualidad. En 1975 el agua subterránea almacenada se estimó en 31,500 millones de m³ (Insivumeh *et al.*, 1978). El volumen acumulado de vaciado del acuífero durante los últimos 50 años se contabiliza en aproximadamente 10,500 millones de m³, es decir, un vaciado promedio de al menos 200 millones de m³/año. Esto equivale a un vaciado acumulado del 30%, de acuerdo con el volumen total almacenado en 1975 y un promedio de 2.1 m de descenso anual en el nivel freático (Figura RE-3).

De seguir con estas tendencias, durante la década de 2040 el vaciado del sistema de acuíferos podría llegar a un 50% del volumen estimado en 1975, entrando en una fase crítica y con una degradación difícilmente reversible. Para la década de 2060 el nivel de vaciado puede llegar hasta cerca de un 75%.

Es previsible, entonces, que a partir de los próximos años, se padezca una disminución aún más acelerada de los niveles freáticos y su correspondiente deterioro en la capacidad productiva (reducción de caudales y transmisividad hidráulica, entre otros).

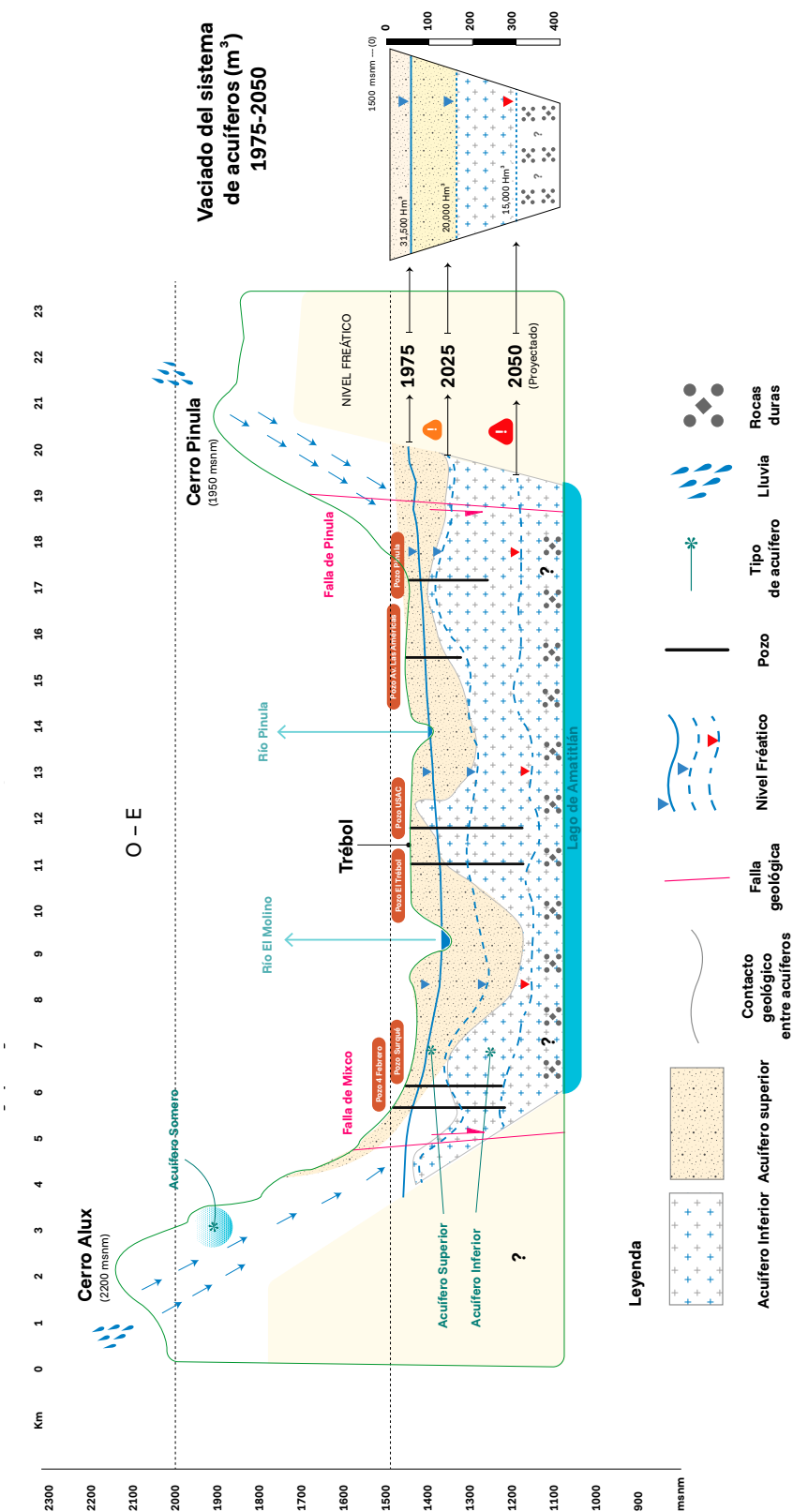


Figura RE-2. Modelo hidrogeológico conceptual. Énfasis en hidrogeología y vaciado del sistema de acuíferos de la Región Metropolitana de Guatemala.
Fuente: elaboración propia.

Bajo estas condiciones, se enfrentarán dificultades crecientes para el acceso al agua subterránea, incluso llegando en muchos casos a niveles de inviabilidad técnica o financiera de pozos ya existentes o de nuevos proyectos de abastecimiento.

El desabastecimiento de agua subterránea puede agudizarse durante años secos (como los afectados por el fenómeno El Niño en su fase muy cálida). Este escenario se agrava en algunas zonas debido al agotamiento hídrico espacialmente desigual; es decir, que algunos sitios ubicados al norte y occidente de la región metropolitana serán aún más afectados. Lo anterior puede ir acompañado de la manifestación de episodios de desecamiento repentino del lago Amatitlán.

Es tan grave el panorama respecto de la seguridad hídrica, que sin una reducción y reversión de las tendencias actuales, se estaría ingresando en pocas décadas a una fase de agotamiento terminal y colapso generalizado del sistema regional de acuíferos. En dos décadas se podrá alcanzar un vaciamiento del acuífero del 50%, siendo esta una situación muy difícil de gestionar o revertir.

Otro hallazgo alarmante es la disminución en los niveles freáticos en la parte sur de las cuencas Villalobos y Pinula, ya que de seguir la tendencia actual de descenso quedaría debajo del nivel freático del lago Amatitlán, lo cual pone en muy alto riesgo la existencia misma del lago por la disminución progresiva de aportes de agua subterránea y desecación repentina de este cuerpo de agua.

Además, el análisis de series históricas de calidad del agua, también demuestra un proceso de degradación continua y acelerada desde hace más de cinco décadas en los principales cuerpos de agua de la región. Los índices de calidad obtenidos categorizan como “malos” o “pésimos” y con concentraciones elevadas de coliformes fecales, incluso, metales pesados y exceso de nutrientes. El lago Amatitlán muestra resultados que lo clasifican como eutrófico-hipereutrófico persistente (Figura RE-3).

En términos prácticos, los ríos de la RMG se han convertido en colectores de aguas residuales urbanas e incluso de desechos tóxicos. Esto, junto a la sobreexplotación y drástica disminución del volumen y flujo de agua subterránea (de buena calidad) ha provocado el colapso ecológico, tanto de los cauces superficiales, como del lago Amatitlán y otros ecosistemas que son importantes para la regulación hidrológica y abastecimiento de la población y de actividades económicas.

3.2. Análisis espacial del descenso en el nivel freático (mapa de isodescensos)

Para evaluar la dinámica geográfica de los cambios en los niveles freáticos se procedió a elaborar un mapa que compara los niveles freáticos (profundidad en donde se encuentra el agua subterránea) de los años 1975 y 2025. El mapa se denomina de isodescensos del nivel freático, con el que se logra identificar aquellas zonas con mayor o menor cambio. Un aporte adicional de la elaboración de este mapa es la validación de las estimaciones de volumetría de agua subterránea que se han consumido durante los últimos 50 años (Figura RE-4).

Los valores superiores a 100 m de descenso se encuentran en las zonas perimetrales del oeste norte y este de la Región Metropolitana, incluyendo sitios de los municipios de Mixco, San Juan Sacatepéquez, San Pedro Sacatepéquez, Chinautla, San José Pinula y Guatemala. Las zonas relativamente menos afectadas, con valores de descenso de 100 m o menos, son aquellas ubicadas en la región central del Valle de la Ciudad de Guatemala, incluyendo sitios ubicados en los municipios de Guatemala, Villa Nueva, Villa Canales, San Miguel Petapa y Amatitlán.

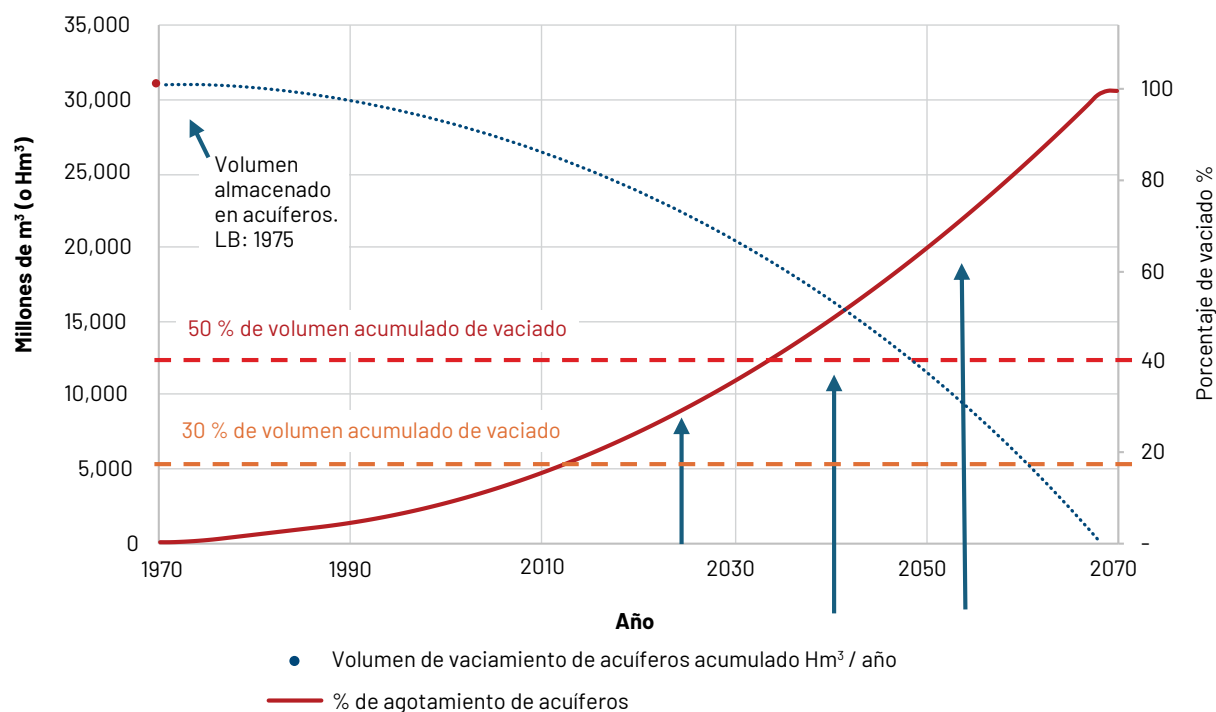


Figura RE-3. Estimación de volumen de agua disponible y vaciado de sistema de acuíferos regional.

Fuente: elaboración propia basada en Insivumeh-IGN-ONU (1978), Herrera et al (2016) y fuentes primarias.



Fuente: Fotografía de Daniel Núñez Robles.

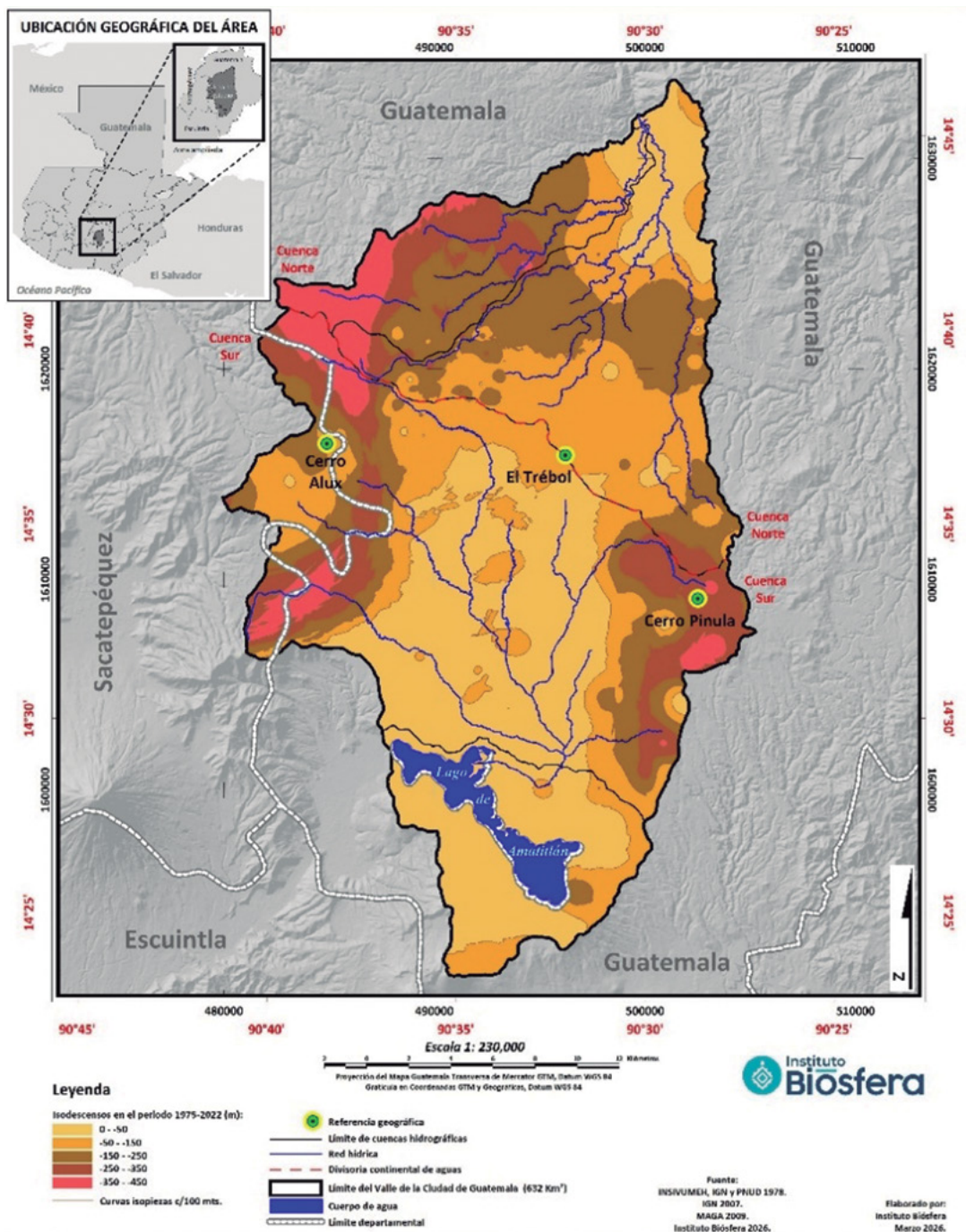


Figura RE-4. Mapa de descensos del nivel freático para el período de 50 años (1975-2025).

Fuente: elaboración propia basada en Insivumeh-IGN-ONU (1978) y fuentes primarias

3.3. Factores que propician un vaciamiento de acuíferos tan acelerado

Los principales factores que comprometen la capacidad productiva y de almacenamiento de agua en el sistema de acuíferos de la RMG son: a) sobreexplotación del agua subterránea, b) reducción drástica de la recarga hídrica natural, c) cambio en los patrones del clima local y regional, y d) una gobernanza hídrica muy deficiente y carente de sustento técnico adecuado.

La convergencia e interacción de estos elementos configura “una tormenta perfecta” que acelera tanto el agotamiento como la degradación cualitativa del recurso hídrico subterráneo.

Se definieron los principales factores que contribuyen a que los niveles de vaciamiento de acuíferos sean tan elevados, a continuación se describen y analizan:

- a) **Niveles muy altos de sobreexplotación de agua subterránea**, es decir, se sobrepasan los límites de productividad natural o capacidad de carga del acuífero; esto es corroborado por la estimación de factores de extracción anual / recarga natural con tasas de 3.5 - 5 / 1. Actualmente, se extrae agua entre 350 y 500 millones de m³ (este valor varía fuertemente dependiendo de las fuentes consultadas) y se estima un promedio de recarga hídrica natural de ≈110 millones de m³.

- b) **Reducción significativa de la recarga hídrica natural**. A pesar de que los valores de lluvia anual no han cambiado significativamente desde hace 50 años, alrededor de 1250 mm/año, la recarga hídrica anual sí ha disminuido significativamente (entre 40-50%). De 250 mm al año (equivalente al 20% de la lluvia anual) en 1975, ha cambiado a valores de 150 mm, (equivalente al 12% de la lluvia anual). Esto se asocia, especialmente, con procesos de urbanización e impermeabilización de los suelos y la alteración de zonas de alta capacidad de recarga y regulación hídrica.

- c) **Cambios en el clima local y regional: aumento de temperatura e intensificación de la lluvia**. Existe evidencia reciente sobre el aumento de la temperatura (2.1 °C durante el período de 1970 a 2025) y mayor recurrencia e intensidad de sequías asociadas a la afectación del fenómeno climático El Niño. Además, se ha determinado la intensificación de las lluvias, es decir, menos días de precipitación al año y concentración de la lluvia en eventos extremos (percentil 90). Derivado de lo anterior, se generan mayores tasas de evapotranspiración de las plantas, mayor albedo del cemento y disminución de las condiciones favorables para la recarga hídrica natural, la cual ocurre solamente bajo condiciones de saturación de suelos.

- d) **Gobernanza hídrica deficiente y modelos de extracción insostenible (tipo minero)**. Las fuentes consultadas advierten la precariedad o inexistencia de acciones institucionales para la gestión integral del agua. Esto se manifiesta en la ausencia de controles operativos o de esquemas de protección, reutilización y uso eficiente del agua. Además, la autorización de extracciones de agua subterránea carece de sustento técnico o protocolos adecuados y basados en los límites naturales o capacidad de carga física de los acuíferos. Esta crisis es resultado de una debilidad estructural, tal como que el marco político y normativo tolera y, en ocasiones propicia, el aprovechamiento caótico y claramente insostenible de acuíferos.

4. Cambios urgentes en la gestión del agua subterránea.

Se infieren al menos dos escenarios posibles para las próximas décadas respecto a la sostenibilidad del abastecimiento de agua subterránea y seguridad hídrica en la RMG.

- Escenario tendencial (sin mayores cambios en la gestión de recursos hídricos): la ocurrencia del mayor desastre social y ecológico en tres mil años de ocupación humana significativa en la zona.
- Escenario deseable (seguridad hídrica regional y sostenibilidad): La RMG consolida un modelo de gestión sostenible del recurso hídrico y de los ecosistemas relacionados mediante una gobernanza efectiva. La articulación entre la sociedad, el sector económico y las instituciones permite superar los desafíos sociales y económicos que son estructurales y, además los retos técnicos e ingenieriles.

4.1. Grandes desafíos estructurales y marco de trabajo

Es necesario partir de la comprensión que las fuentes de agua subterránea en la RMG son renovables, sin embargo, también son muy limitadas y sensibles a cambios en los ecosistemas. Al ritmo de sobreexplotación actual, los acuíferos podrían dejar de ser funcionales en pocas décadas.

El sistema regional de acuíferos tiene una capacidad de carga (o capacidad productiva natural) que puede ser claramente establecida, y, con base en esto, es imperativo derivar las acciones que conduzcan a su sostenibilidad. En tal sentido, es indispensable e impostergable que en la RMG suceda un cambio drástico respecto al modelo extractivo y descontrolado en la gestión de los recursos hídricos. Es ineludible sobrepasar la carencia de precedentes exitosos en Guatemala y un marco legal y socioeconómico con múltiples y grandes retos e inconsistencias. Será muy alto el costo social, económico y ambiental de no actuar asertivamente.

Es necesario iniciar una gestión hídrica compartida, bien coordinada e integral; privilegiando el derecho humano del acceso al agua, el bien común y la seguridad hídrica de largo plazo. Esto inequívocamente debe estar basado en el conocimiento profundo de las necesidades hídricas, pero también en la capacidad de carga y límites naturales de los sistemas hídricos (cuencas). Es esencial privilegiar la restauración y protección de todos los subsistemas hidrológicos (superficiales y subterráneos). Asimismo, implementar esquemas de monitoreo, recarga hídrica gestionada y optimización de uso y reutilización.

Entre los principales desafíos se encuentran la elaboración e implementación efectiva de políticas públicas, un marco normativo de uso e incentivos, planificación técnica sustentada y controles pertinentes. Es fundamental enmarcarse en las unidades naturales funcionales, considerando al menos las cuencas Las Vacas, Pinula, Villalobos y Amatitlán. Además, es preciso dedicar recursos e inversiones financieras correspondientes a un desafío de tal envergadura.

4.2. Acciones inmediatas para la seguridad hídrica en la Región Metropolitana de Guatemala (RMG)

Existen experiencias de referencia a nivel mundial. Aún es posible revertir el deterioro alcanzado en este punto. Es urgente la conformación de mecanismos de coordinación entre múltiples actores, generación de información técnica y científica, planificación, formación de múltiples actores y sectores relevantes, y soporte ingenieril para el monitoreo, reutilización y uso eficiente del agua.

Paralelamente a la gestión de marcos legales y planificación de largo plazo, la crisis hídrica en la RMG exige priorizar acciones de ejecución inmediata. Esta focalización del trabajo no es opcional: es una respuesta de emergencia ante el riesgo de agotamiento acelerado de la principal fuente de abastecimiento de agua y la amenaza de sequías severas en el futuro próximo.

Existen medidas que pueden ejecutarse bajo el marco normativo vigente, utilizando instrumentos técnicos y financieros ya disponibles. Es altamente recomendable que la coordinación sea liderada por el Ejecutivo, a través del Gabinete Específico del Agua y operado conjuntamente por ministerios que son rectores de recursos naturales y ambiente, salud, infraestructura pública, las quince municipalidades del área metropolitana y entidades clave como AMSA y los Consejos de Desarrollo (CODEDE).

Las acciones de corto plazo se deben priorizar y articular bajo los siguientes ejes de trabajo:

- **Protección y control de acuíferos.** Implementar protocolos técnicamente sustentados para la autorización, monitoreo y seguimiento del aprovechamiento de aguas subterráneas y superficiales.

- **Protección y vigilancia de cuerpos de agua y corrientes superficiales.** Establecer un sistema de monitoreo de vertidos tóxicos y emergencias, vinculado activamente al sistema de investigación y persecución penal.

- **Protección de zonas de importancia hídrica.** Canalizar recursos técnicos y financieros para la protección y restauración de áreas críticas para la recarga hídrica y regulación de caudales, como la Cordillera Alux, Cerro Pinula, red de barrancos y zonas de ribera priorizadas.

- **Impulso de procesos de recarga hídrica gestionada.** Promover e incentivar la captación de agua de lluvia en edificaciones, parques y áreas de interés público. Es importante asegurar la calidad del agua infiltrada. Se recomienda tomar como referencia proyectos piloto exitosos ya implementados en la región.

- **Monitoreo de recursos hídricos:** Establecer un sistema de monitoreo, análisis y comunicación de información sobre los recursos hídricos. Esto incluye, recopilar y organizar datos ya disponibles en entidades públicas y privadas.

- **Fortalecimiento de los sectores municipal, de inversión pública y de construcción.** Brindar asistencia técnica especializada a sectores estratégicos para optimizar el uso, tratamiento y reutilización del agua a nivel local.

- **Educación y cultura del agua:** Lanzar una estrategia de educación pública sobre seguridad hídrica enfocada en la realidad de la RMG.

- **Plan Maestro Multiinstitucional para la Seguridad Hídrica.** Es impostergable iniciar la planificación integral para garantizar la seguridad hídrica en la Región Metropolitana de Guatemala.

PARTE
2

REPORTE CIENTÍFICO

REPORTE CIENTÍFICO

Análisis del agua subterránea en la Región Metropolitana de Guatemala.

Palabras clave: acuífero, Ciudad de Guatemala; Región Metropolitana; agua subterránea, recursos hídricos; disponibilidad de agua; agotamiento de abastecimiento de agua; sobreexplotación hídrica; degradación ambiental.

RESUMEN TÉCNICO

A pesar de la importancia y fragilidad del sistema de abastecimiento de agua subterránea en la Región Metropolitana de Guatemala, no se tiene claridad sobre el estado actual, niveles de agotamiento o medidas técnicas para la protección, la restauración y la garantía de sostenibilidad del sistema de acuíferos regional.

El presente reporte científico reúne información dispersa y evalúa el estado actual y las tendencias del sistema de acuíferos explotados en dicha región. La metodología empleada consistió en una revisión crítica y exhaustiva de la literatura técnica y científica disponible, especialmente, sobre hidrogeología, disponibilidad de agua y calidad de los recursos hídricos.

Se reunió información muy dispersa y heterogénea, lográndose evaluar el estado actual y las tendencias del sistema de acuíferos existentes en la región. Mediante el establecimiento de una batería de indicadores hidrogeológicos, se estableció una línea base centrada en 1975, se evaluó su evolución hasta la actualidad y por primera vez se documentan el análisis espacial del descenso del nivel freático, las proyecciones de tendencias sobre la disponibilidad de agua subterránea y su eventual agotamiento en las próximas décadas. Finalmente, se analizaron los factores más importantes que están asociados al acelerado agotamiento y degradación del sistema de acuíferos en la región metropolitana.

Se establecieron valores muy altos, incrementales y progresivos del agotamiento y degradación de la calidad del agua subterránea y superficial.

Es tan grave la situación que de seguir las tendencias actuales se ingresará en el corto plazo a una situación de agotamiento y colapso generalizado del sistema de acuíferos. Se evidenció un vaciado del 30% del acuífero y en alrededor de 25 años se puede llegar al 50% de vaciado, siendo esta una situación ya muy crítica y difícil de gestionar o revertir.

Ya ha iniciado una fase de aumento acelerado de la inviabilidad técnica o financiera de pozos para el abastecimiento de agua subterránea.

NOMBRES DE LOS AUTORES

Juan Carlos Rosito Monzón,
Instituto Biósfera¹,
jrosito@ibiosfera.com

Oscar Alejandro Avalos Cambranes,
Ministerio de Ambiente de
Guatemala,
oscaralejandrac20@gmail.com

Nadia Michelle Chang Villate,
Instituto Biósfera¹,
nmchang37@gmail.com

¹  Instituto
Biósfera

TECNICAL SUMMARY

Despite the critical importance and vulnerability of the groundwater supply in Guatemala's Metropolitan Zone, a significant information gap persists regarding its current state, depletion levels, and the technical frameworks required for the protection, restoration, and long-term sustainability of the regional aquifer system.

This technical report synthesizes fragmented data to evaluate the current status and hydrogeological trends of the region's exploited aquifer system. The methodology comprised a critical and exhaustive review of available technical and scientific literature, with a strategic focus on hydrogeology, water availability, and water resource quality.

By gathering highly dispersed and heterogeneous data, it was possible to assess the current state and trends of the region's aquifers. Through a set of hydrogeological indicators, a baseline centered on 1975 was established, its evolution to the present was evaluated, and, for the first time, projections regarding groundwater availability and potential depletion over the coming decades were accurately documented.

Finally, the most significant factors associated with the accelerated depletion and degradation of the metropolitan aquifer system were analyzed. The study established very high, incremental, and progressive values for the depletion and degradation of both groundwater and surface water quality.

The situation is so severe that, if current trends continue, the region is entering a state of generalized exhaustion and collapse of the aquifer system. Evidence shows that 30% of the aquifer has already been depleted; within approximately 15 years, depletion could reach 50%, a situation that would be highly critical and difficult to manage or reverse.

A new phase has already begun, marked by increasing technical or financial inviability of groundwater extraction via wells in several locations.

I. INTRODUCCIÓN

El acuífero compuesto de la Región Metropolitana de Guatemala (RMG) juega un papel fundamental en la seguridad hídrica a escala regional y nacional. El agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento de cerca de cuatro millones de personas (cerca del 20% de la población nacional) y se confía en esta fuente para sostener a una población y una economía en constante crecimiento.

Sin embargo, desde el punto de vista técnico, la capacidad del sistema regional de acuíferos para proveer agua es limitada y, de acuerdo con su ubicación y atributos biofísicos particulares, se les clasifica como de baja, moderada o alta productividad (Insivumeh, 1978, Instituto Biosfera 2025).

La RMG abarca 800 km² e incluye a 13 municipios: Amatitlán, Chinautla, Fraijanes, Guatemala, Mixco, San Miguel Petapa, San José Pinula, San Juan Sacatepéquez, San Pedro Sacatepéquez, San Lucas Sacatepéquez, Santa Catarina Pinula, Villa Nueva y Villa Canales. Ante la complejidad de la gestión territorial y los indicios de agotamiento y degradación de las fuentes de agua, se hace indispensable contar con un conocimiento actualizado y detallado de la hidrogeología a escala regional, de tal manera que se cuente con los elementos fundamentales para garantizar su protección, restauración y gestión sostenible.

La información con la que se cuenta actualmente es dispersa y no exhaustiva desde el punto de vista técnico e hidrogeológico, sin embargo, nos presenta un panorama general de deterioro. El Iarna-TNC (2013) estiman un factor promedio de extracción 5.5 veces mayor que la recarga natural en un año. Esto equivale a un déficit aproximado de 176,000 millones de m³/año para el río Las Vacas (cuenca norte), y de 191,200 millones de m³/año en el río Villalobos (cuenca sur), es decir, un déficit total de cerca de 375,000 millones de m³/año.

Según IUCN (2023), el acuífero del Valle de la Ciudad de Guatemala presenta una recarga hídrica natural y retornos por riego y fugas de tuberías de 210.3 millones de m³ y un total de extracciones de 411.21 millones de m³, lo cual confirma un déficit hídrico considerable de cerca de 200 millones de m³. De acuerdo a este mismo estudio, se determinó un Índice de Explotación del Agua WEI+ (Water Index Exploitation Plus), utilizado mayormente en Europa. El WEI+ indica estrés hídrico cuando presenta valores mayores del 20% y estrés hídrico grave cuando supera el 40%; para el acuífero, este índice alcanza valores superiores al 72%.

Uno de los principales usuarios y operador de los recursos hídricos subterráneos es la Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA), la cual indica que actualmente no logra cubrir la demanda total, con una oferta de 4.00 m³/s frente a una demanda estimada de 6.00 m³/s en 2020, lo que manifiesta un déficit significativo (IUCN, 2024).

Evaluaciones de la calidad del agua en ríos como el Villalobos y Las Vacas la clasifican como “pésima” y “mala” respectivamente, lo que resalta la grave contaminación y riesgos para la salud pública y ecosistemas (IARNA, 2023). Además, se ha estimado que se descarga un promedio de 4.10 metros cúbicos por segundo (m^3/s) de aguas residuales crudas al drenaje de aguas superficiales de la región metropolitana (FUNCAGUA, 2022). A ello se suma la carencia de una ley de ordenamiento territorial o ley de aguas que regule efectivamente su aprovechamiento y protección, lo cual agrava la problemática hídrica cada vez más (IUCN, 2023).

Todo lo anterior es evidencia de una clara y peligrosa sobreexplotación de los recursos hídricos, y al mismo tiempo muestra la desatención e incapacidades institucionales para garantizar la sostenibilidad del abastecimiento hídrico en el largo plazo (Insivumeh *et al.*, 1978; Morales, 2012; Iarna *et al.*, 2013; Cruz, 2019; Chang, 2021; Funcagua, 2022; Iarna *et al.*, 2023; Biósfera, 2025).

Para el año 2020, solo los municipios de Guatemala y Villa Nueva habían aprobado un Plan de Ordenamiento Territorial (POT), mientras que los municipios de Santa Catarina Pinula y Mixco estaban en proceso de elaboración. Sin embargo, estos planes no siempre están coordinados entre municipios vecinos y carecen de una visión regional (Funcagua, 2022). A pesar de la existencia de una mancomunidad de municipios, aún no se ha abordado de una manera adecuada la gestión integral de los recursos hídricos.

Además, se suma la carencia de normativas de ordenamiento y protección de los recursos hídricos, o ley de aguas, que regule efectivamente su aprovechamiento y protección, lo cual agrava la problemática hídrica cada vez más (Uicn, 2023). Los servicios ecosistémicos de recarga y regulación hidrológica son invaluable, sin embargo, en la región metropolitana aún no se cuenta con un monitoreo sistemático, valoración económica o mecanismos de gobernanza.

Es impostergable la realización de un ejercicio técnico de actualización, homologación y análisis de información hidrológica, de tal manera que se dimensione adecuadamente el estado actual y las tendencias del agotamiento del agua subterránea en la región metropolitana. Además, hacer disponible dicho conocimiento para la toma de decisiones asertivas, la planificación, monitoreo y la comunicación pública.

El presente trabajo evalúa el estado actual y las tendencias del agua subterránea de la Región Metropolitana de Guatemala, abarcando los 15 municipios descritos anteriormente. Para tal fin se parte de una recopilación y análisis exhaustivo de publicaciones y estudios técnicos y académicos sobre el sistema regional de acuíferos. Se analizan aspectos de disponibilidad de agua subterránea en diferentes periodos: pasado (centrado en 1975), presente (centrado en 2025) y, por primera vez, se realizan proyecciones cuantitativas para el futuro cercano (próximos 10 - 40 años).

De acuerdo a la información existente se logró establecer una línea base en los años 1975-77, lo que se utilizó de referencia para las evaluaciones posteriores y estimar tendencias y eventual agotamiento hasta la actualidad. De igual manera, respecto a la calidad de los recursos hídricos, se integró la información disponible desde la década 1970 hasta la actualidad.

Entre las principales herramientas de evaluación destacan la homologación de indicadores hidrogeológicos, caracterización biofísica, balances hídricos y análisis de su dinámica temporal y geográfica. Asimismo, se procedió a la integración y análisis de los principales estudios sobre la calidad del agua de la región metropolitana.

Finalmente, se proponen algunas estrategias generales y líneas de investigación científicas para mejorar la capacidad predictiva y la gestión del acuífero, contribuyendo a la seguridad hídrica de la región.

II. METODOLOGÍA

La primera fase de la investigación consistió en establecer el estado actual de conocimiento sobre los recursos de agua subterránea en la Región Metropolitana de Guatemala (Figura 1). Para ello se recopilieron publicaciones institucionales y de fuentes reconocidas sobre hidrogeología, hidrología, clima y calidad ambiental.

Entre las principales fuentes de información consultadas destacan los archivos físicos, bases de datos, y plataformas informáticas de instituciones relacionadas con la gestión e investigación del agua, como las municipalidades correspondientes, universidades nacionales, Instituto nacional de sismología, vulcanología, meteorología e hidrología (Insivumeh), Instituto de fomento municipal (Infom), Empresa municipal de agua (Empagua), Autoridad para el manejo sostenible de la cuenca del lago Amatitlán (Amsa), Ministerio de ambiente y recursos naturales (Marn); así como agencias de cooperación internacional, tales como Jica, Uicn, Pnud, Aeci, etc.

Para la organización, evaluación y análisis de dicha información se procedió a clasificarla en dos escalas de análisis: a) cobertura geográfica y b) nivel de detalle de los estudios. En el Cuadro 1 se presentan los indicadores correspondientes para categorizar e integrar la información recabada.

Cuadro 1. Atributos para clasificar estudios realizados sobre el sistema de acuíferos del Valle de la Ciudad de Guatemala

Cobertura Geográfica	Definición
Local	Extensión menor a 50 km ²
Subregional	Extensión entre 50 a 250 km ²
Regional	Extensión mayor a 250 km ²
Nivel de detalle de estudio (publicación de la cartografía)	Definición
Reconocimiento	Escala general o de reconocimiento ($\geq 1:100,000$) para identificar patrones amplios o áreas prioritarias.
Semidetalle	Escala semidetallada (1:10,000 a 1:100,000) para sectores específicos con análisis moderadamente precisos.
Detallado	Escala detallada ($\leq 1:10,000$), utilizada para proyectos puntuales o estudios específicos.

Además, se conformaron matrices analíticas y se procedió a elaborar una batería de indicadores hidrogeológicos y se extrajo información más relevante, muchas veces, mediante la homologación propia de los datos. Esto se debe principalmente a la heterogeneidad de objetivos y metodologías de los estudios analizados. Los principales atributos estudiados se agrupan de la siguiente forma:

- Aspectos descriptivos, como atributos geográficos, geológicos e hidrogeológicos;
- Aspectos cuantitativos, incluyendo indicadores de piezometría, capacidad productiva, <volumen almacenado, balances hídricos y estimaciones de extracción de agua subterránea, etc;
- Aspectos de calidad de los recursos hídricos.

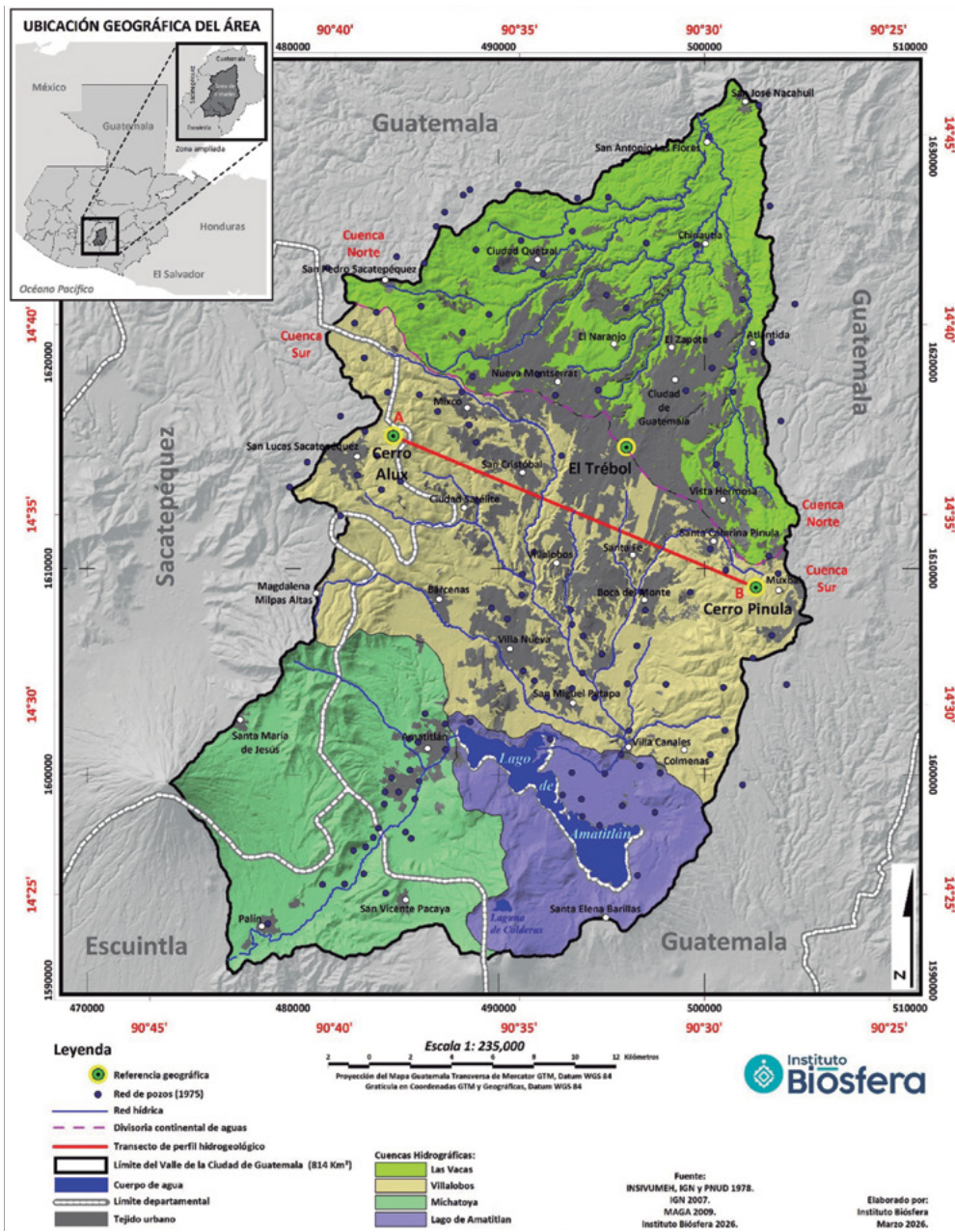


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Definición de la cuenca hidrogeológica del Valle de la Ciudad de Guatemala.

Con la información disponible, se estableció una línea base (1975-77), el estado actual (mediante el análisis de estudios disponibles y fuentes primarias mediante revisión de pozos), centrado en 2025; y, finalmente, se establecieron las tendencias y proyecciones de agotamiento cuantitativo de agua subterránea para el futuro cercano (próximos 40 años).

Para la integración de la información organizada se generaron dos modelos hidrogeológicos conceptuales. Estos modelos priorizaron la visualización de los principales indicadores de estado de los acuíferos. Un modelo integró la información de la línea base y luego se procedió a elaborar uno adicional para la actualización y proyección de las tendencias, especialmente de la evolución de las profundidades freáticas y dinámica temporal del volumen de agua disponible.

Para el análisis de los cambios en la profundidad freática y en el territorio durante los últimos 50 años, se elaboraron tres diferentes mapas. El primer mapa (isopiezas 1975) se elaboró mediante la integración y mapeo de una base de datos de nivel estático de pozos reportado por Insivumeh *et al.*, (1978). El segundo mapa se elaboró mediante la actualización de niveles estáticos de estos pozos (isopiezas 2022-25). El tercer mapa consistió en la resta algebraica de los mapas de isopiezas anteriores para obtener un nuevo mapa denominado de isodescensos del nivel freático, es decir espesor o niveles de descenso de la profundidad a la que se encuentra agua subterránea.

Para la elaboración de mapas se implementó la metodología Inverse Distance Weighting (IDW), como la opción de mejor rendimiento. Este procedimiento fue implementado por el software de sistemas de información geográfica ArcGIS Spatial Analyst, citado por Watson y Philip (1985) y Burrough & McDonnell, 1998. La elección del método IDW se basó en su estabilidad y buen desempeño en contextos con baja densidad y distribución heterogénea de puntos de referencia conocidos.

Además, se procedió a la discusión y análisis de los principales factores que inciden en los cambios en el nivel freático del sistema regional de acuíferos. Para finalizar también se analizan aspectos de interés relacionados con las necesidades de gestión e investigación del agua en la región metropolitana.

III. RESULTADOS

A continuación, se presentan los principales hallazgos realizados respecto a la hidrogeología y estado de los principales acuíferos del Valle de la Ciudad de Guatemala.

a. Estado del conocimiento hidrogeológico

En el Cuadro 2 se presentan los 15 estudios y publicaciones técnicas que contienen la descripción hidrogeológica, línea base y dinámica de los acuíferos del área de estudio. Dichos estudios abordan en mayor o menor medida aspectos biofísicos, análisis cuantitativos y de calidad de los recursos hídricos.

Se estableció que los alcances, fechas de realización, métodos de investigación, cobertura y escalas geográficas, además de los niveles de detalle de los estudios son muy heterogéneos. Por ejemplo 8 estudios son regionales, 4 son subregionales y 3 son locales; 5 estudios fueron desarrollados con un nivel de detalle de reconocimiento y 7 a nivel de semi-detalle.

Además, de igual forma, los indicadores de caracterización y evaluación hidrogeológica también son muy heterogéneos. Dicha característica dificulta la realización de análisis comparativos a escalas temporales, geográficas y entre los sistemas hidrogeológicos. Incluso, se destaca el hallazgo de algunos datos contradictorios entre algunas fuentes. Especialmente en aspectos relacionados con la delimitación de los acuíferos, estimación de la productividad, capacidad de almacenamiento y cuantificación de las extracciones de agua subterránea.

Vinculado a lo anterior se evidenció que las investigaciones son esfuerzos que no conforman un programa de conocimiento sistemático y adecuadamente orientado a la sostenibilidad. Más bien, han sido esfuerzos financiados por diferentes entidades internacionales o investigaciones académicas aisladas.

A pesar de lo anterior, se determinó que con la información disponible sí es posible realizar aproximaciones respecto al establecimiento de una línea base de referencia y derivar evaluaciones sobre las dinámicas temporales y geográficas, así como tendencias en la disponibilidad de agua global en los acuíferos y la evolución de la calidad de los recursos hídricos.

Entre los trabajos más completos destaca el Estudio de las aguas subterráneas del Valle de la Ciudad de Guatemala, realizado por Insivumeh *et al.* y publicado en 1978. En tal sentido, se constituye en la principal fuente para establecimiento de la línea base de referencia.

Además de ser una publicación oficial, dicho estudio ofrece una escala geográfica regional (800 km²), utiliza como unidad de análisis la cuenca hidrogeológica, describe los indicadores hidrogeológicos más relevantes, el nivel de detalle de la investigación es de una escala adecuada (semi-detalle, es decir equivalente a 1:50,000, en la publicación de mapas) y fue realizado hace 50 años, cuando el sistema de acuíferos aún no mostraba un alto grado de alteración. Por lo anterior se constituye en un referente adecuado. A continuación, se presentan los aspectos más relevantes.

Cuadro 2. Estudios y publicaciones sobre el agua subterránea de la Región Metropolitana de Guatemala

No.	Título	Año	Autor	Área	Cobertura Geográfica	Escala Cartográfica	Objetivo del estudio
1	Informe técnico de Balance hídrico de Cerro Alux y Villalobos	2025	Instituto Biosfera	Pansalic - Cerro Alux y Villalobos	Subregional	Semi-detalle (1:10,000 a 1:100,000)	Identificación de principales zonas de recarga hídrica e implementación de acciones de fomento para su conservación y restauración
2	Estrategia de seguridad hídrica para los municipios de la Mancomunidad Gran Ciudad del Sur, compatible con una explotación sostenible del acuífero del Valle de la Ciudad de Guatemala	2023	Uicn	Región Metropolitana	Regional	Reconocimiento	Generar información básica a entidades y organismos responsables, una estrategia de seguridad hídrica y para la toma de decisiones
3	Estudio para la determinación de zonas potenciales de recarga hídrica en las microcuencas de los ríos Las Minas y Pinula	2023	Carlos Chavarría y Mynor Juárez	Microcuencas de los ríos Las Minas y Pinula	Local	Semi-detalle (1:10,000 a 1:100,000)	Determinar Zonas Potenciales de Recarga Hídrica en las microcuencas de los ríos Las Minas y Pinula con el fin de promover acciones estratégicas de seguridad hídrica en áreas donde los porcentajes de infiltración son mayores
4	Atributos territoriales y dinámicas socioambientales de Guatemala: Síntesis gráfico-descriptiva	2022	Iama	República de Guatemala	Regional	Semi-detalle (1:10,000 a 1:100,000)	Brindar la disponibilidad de agua (millones de m ³ /año) por microcuenca a nivel nacional a través de un mapa.
5	Informe del Estado del Agua de la Región Metropolitana de Guatemala	2022	Funcagua - URL - UVG - WWF	Microcuenca Villalobos	Subregional	Reconocimiento (≥ 1:100,000)	Proporcionar un primer esfuerzo para caracterizar el estado actual de los recursos hídricos en la Región Metropolitana de Guatemala (RMG) utiliza el marco de fuerzas motrices-presión-estado-impacto-respuesta (FM-PEIR) para ordenar y analizar la información existente sobre los recursos hídricos de la región.
6	Balance Hídrico natural para determinar la oferta y demanda de agua en la subcuenca del río Villalobos	2021	Daniel Esteban Manzo Barrientos	Subcuenca Villalobos	Regional	Semi-detalle (1:10,000 a 1:100,000)	Actualizar el balance hídrico en la cuenca del lago Amatitlán para que sirva como elemento de gestión del recurso hídrico.

No.	Título	Año	Autor	Área	Cobertura Geográfica	Escala Cartográfica	Objetivo del estudio
7	Análisis de la planificación territorial para garantizar la provisión del agua en la zona metropolitana: Balance hídrico de la región metropolitana	2019	María Cruz	Región metropolitana	Regional	Reconocimiento ($\geq$ 1:100,000)	Evaluar los impactos potenciales de la planificación territorial municipal sobre la futura provisión de agua en la zona metropolitana, con el objetivo de mejorar las estrategias de sostenibilidad.
8	Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala: Bases fundamentales para la gestión del agua con visión a largo plazo	2015	Iarna	República de Guatemala	Regional	Reconocimiento ($\geq$ 1:100,000)	Analizar la disponibilidad de agua en Guatemala a nivel de subcuenca en sus tres cuencas hidrográficas. Su objetivo es brindar información técnica para sustentar soluciones fundamentadas y confiables para la demanda nacional de agua.
9	Generación de modelo de crecidas y su relación con la urbanización en la subcuenca del río Villalobos	2015	Juan Carlos Fuentes M	lago Amatitlán	Subregional	Reconocimiento ($\geq$ 1:100,000)	Estimar el impacto en el ciclo hidrológico, principalmente en el escurrimiento superficial, debido a los efectos asociados al proceso de urbanización en la subcuenca.
10	Bases técnicas para la gestión del agua con visión de largo plazo en la zona metropolitana de Guatemala	2013	Iarna y TNC	Región metropolitana y área de Xayá Pixcayá	Regional	Reconocimiento ($\geq$ 1:100,000)	Analizar la disponibilidad del recurso hídrico en el área metropolitana de Guatemala. Apoyar el diseño de soluciones para una mejor gestión de este recurso.
11	Evaluación del descenso del nivel freático en la parte norte del acuífero metropolitano en el Valle de Guatemala	2012	Morales, Jacqueline	Subcuenca Los Ocotes, Vados y Las Vacas	Subregional	N/E	Determinar el nivel freático, en treinta y dos pozos en estudio ubicados en el acuífero metropolitano, sus variaciones espaciales como temporales para estimar las tasas de descenso y de extracción..
12	Reconocimiento hidrogeológico para la determinación de zonas de recarga hídrica en la subcuenca del río Pinula, Santa Catarina Pinula, Guatemala	2008	Daniel Manzo	Subcuenca del río Pinula, Santa Catarina Pinula, Guatemala	Local	Semidetalle (1:10,000 a 1:100,000)	Investigar la hidrogeología y caracterizar las zonas de recarga hídrica de la subcuenca del río Pinula dentro del municipio de Santa Catarina Pinula.

No.	Título	Año	Autor	Área	Cobertura Geográfica	Escala Cartográfica	Objetivo del estudio
13	Hidrogeología de la Subcuenca del río Platanitos, Guatemala, Guatemala	2005	Dani López	Subcuenca del río Platanitos, Guatemala,	Local	Semidetalle (1:10,000 a 1:100,000)	Identificar el sistema acuifero que se está explotando y la vulnerabilidad intrínseca (propia del mismo)
14	Informe Final del Estudio de Factibilidad para el desarrollo del proyecto de abastecimiento de agua subterránea(Emergencia I)	1986	Jica	Valle Ciudad de Guatemala	Regional		Examinar y evaluar la factibilidad técnica y financiera para explotar 1m ³ /s de agua subterránea para suplir a la Ciudad.
15	Informe final del proyecto Estudio de Aguas Subterráneas en Guatemala	1978	Insivumeh-IGN-ONU	1. Cuencas Villalobos, Las Vacas, lago Amatitlán y Michatoya	Regional	Semidetalle (1:10,000 a 1:100,000)	Investigar y evaluar los recursos de agua subterránea en el Valle de la Ciudad de Guatemala

*La temporalidad de los datos varía según la naturaleza de cada variable; el año indicado se proporciona únicamente como referencia general y no necesariamente corresponde al periodo temporal de todas las variables analizadas.

N/E: No especificado, (P): Evapotranspiración potencial, Pp: Precipitación en millones de m³, EVT: evapotranspiración real en millones de m³, R: recarga en millones de m³, Esc: escorrentía superficial en millones de m³, Esc sub: escorrentía subsuperficial en millones de m³, I: irrigación en millones de m³, RET: retención de humedad, REP: recarga hídrica potencial, Q: caudal m³/s), Inf: infiltración (mm), HD: Humedad Disponible, Pi: Precipitación que infiltra mensual

HSF: Humedad de Suelo Final mensual, ESC: Escorrentía Superficial mensual, DCC: Déficit de Capacidad de Campo, ETP: Evapotranspiración Potencial mensual, Rp: Recarga Potencial, NR: Necesidad de riego., HSi: Humedad de Suelo Inicial mensual

b. Definición de la Línea base. Caracterización y estado del sistema hidrogeológico del Valle de la Ciudad de Guatemala (1975-77)

En términos generales, se logró delimitar y caracterizar los tres principales componentes del sistema regional de acuíferos (Figura 2), los cuales son:

- a) acuíferos someros o colgados ubicados en las elevaciones “montañas” oriental (Cerro Pinula) y occidental (Cordillera Alux) del área de estudio.
- b) acuífero superior (libre, es decir influenciado por la presión atmosférica local),
- c) acuífero inferior (semiconfinado, lo cual se determina por ser diferente la presión dentro del acuífero y la presión atmosférica, es decir, no está directamente influenciado por la presión atmosférica natural).

Además, establece una buena base de datos geológicos, climáticos, hidrológicos y la caracterización hidrogeológica más detallada realizada hasta la actualidad. Evalúa años extremos respecto a la humedad (año seco, 1975-1976; y año húmedo, 1976-1977), contabiliza extracciones y analiza interacciones entre las aguas subterráneas y superficiales, incluyendo el lago Amatitlán.

En los Cuadros 3 y 4 se detallan los principales atributos hidrogeológicos e indicadores de referencia y a continuación se describen brevemente. En síntesis, se estableció que los acuíferos son catalogados como de baja, mediana o alta productividad, dependiendo de su ubicación y condiciones biofísicas particulares, por ejemplo, transmisividad y capacidad productiva.

b.1. Delimitación y descripción hidrogeológica del sistema de acuíferos

El área definida para analizar las aguas subterráneas del Valle de la Ciudad de Guatemala abarca 805 km², la cual incluye las cuencas de los ríos Las Vacas, Los Ocotes, Villalobos, Pinula, lago Amatitlán y río Michatoya.

La hidrografía superficial coincide en gran medida con el flujo subterráneo de agua. En tal sentido, para estudiar las aguas subterráneas es importante comprender el drenaje superficial. Existen dos grandes vertientes hidrológicas separadas por una divisoria continental.

Por un lado está la cuenca norte, que drena al río Motagua y finalmente al Océano Atlántico; y las cuencas hacia el sur, drena hacia el río María Linda y Océano Pacífico. La divisoria continental entre el Motagua y el Pacífico coincide aproximadamente con el eje vial de la Ciudad de Guatemala: Calzada San Juan – El Trébol – Puerta Parada.

Las cuencas de mayor interés son: la del río Las Vacas con drenaje al norte tiene una extensión de 235 km² y Michatoya con una extensión de 570 km² y drenaje hacia el sur.

Desde el punto de vista geológico, la región metropolitana se encuentra en una depresión tectónica o graben y está delimitada por sistemas de fallas y estructuras geológicas prominentes (Cordillera Alux al occidente y Cerro Pinula al oriente). Dicha depresión está conformada por bloques denominados como graben o trincheras del Valle de la Ciudad de Guatemala y de San José Pinula, e incluyen horst (bloques emergentes) intermedios y laterales. Todos los anteriores con una orientación preferencial en dirección sur a norte y noreste.

Cuadro 3. Línea base de atributos de acuíferos del Valle de Ciudad de Guatemala (1975-1977)

Acuífero	Variable / Indicador	Dimensión	Cuenca sur	Cuenca Norte	Global 1975-1977 (Línea base)
Condiciones generales	Area	km ²	570.57	235.04	805.81
	Profundidad freática promedio	M			35
	Volumen total de agua almacenado	Hm ³ /millones de m ³			31,100
	Volumen anual de entradas (recarga, retornos o transferencia inducida)	Hm ³ /millones de m ³			¿?
	Volumen anual de salidas (extracción)	Hm ³ /millones de m ³	56.6 62.9	16.7 17.1	72.6 (1975 - 76) 80.0 (1976 -77)
	Volumen de fluctuación por cada metro de descenso en el nivel freático	Hm ³ /millones de m ³			110
	Volumen anual de vaciado de acuíferos	Hm ³ /millones de m ³			30 Hm ³ (equivalente 0.7 m de descenso promedio en cuenca Villalobos y O Las Vacas)
	Caudal anual subterráneo	Hm ³ / año / millones de m ³ / año	57	3	60
	Caudal anual "potencial productivo" incluye flujos: básico superficial y subterráneo	Hm ³ / año millones de m ³ / año	67	42.6	109.6
	Caudal promedio anual	m ³ /s			6 (equivalente a 350 mm)
	Descenso promedio anual del nivel freático	M	0.7	0	0.3
	Pozos contabilizados	Cantidad			357 perforación mecánica. 2220 excavados a mano
	Lluvia anual que recarga el acuífero	% (mm)	22	8	15 % (equivalente a 190 mm)

Fuente: elaboración propia, basada en Insivumeh-IGN-ONU, 1978.

Cuadro 4. Línea base de atributos específicos de los acuíferos superior e inferior (1975-77)

Acuífero	Variable / Indicador	Dimensión	Línea base 1975-1977
Acuífero superior	Material		Potentes depósitos de material piroclástico del Cuaternario
	Area	km ²	664
	Espesor	M	Promedio = 80 (max:250; min:0.5)
	Espesor promedio saturado de agua (m)	M	38
	Volumen de agua almacenado	Hm ³ / millones de m ³	4,000
	Volumen de agua adicional en material sedimentario	Hm ³ / millones de m ³	755
	Volumen de fluctuación por cada metro de descenso en nivel freático	Hm ³ / millones de m ³	100
	Transmisividad	m ³ /día/m	Relleno piroclástico: 50 - 750 productividad media - alta, de acuerdo con Krasny). Aluviones: 2000
	Coefficiente de almacenamiento		0.01
Acuífero inferior	Material		Materiales volcánicos consolidados del Terciario. Predominan lavas andesíticas y tobas vítricas.
	Area	km ²	550
	Espesor	M	250 (alta incertidumbre)
	Espesor promedio saturado de agua	M	200
	Volumen de agua almacenado	Hm ³ / millones de m ³	27,500
	Volumen de fluctuación por cada metro de descenso en nivel freático	Hm ³ / millones de m ³	120
	Transmisividad	m ³ /día/m	500 - 1000 (productividad alta, de acuerdo con Krasny) con valores extremos de 5,000.
	Coefficiente de almacenamiento		0.22

Fuente: elaboración propia, basada en Insivumeh-IGN-ONU, 1978.

El agua subterránea se encuentra bajo condiciones de flujo o almacenada, principalmente en los materiales de origen volcánico que constituyen el relleno de la depresión tectónica de origen Cuaternario y material basáltico o similar de origen Terciario.

En la red de drenaje del valle de la Ciudad de Guatemala predominan dos características hidrogeológicas relevantes: un medio granular con porosidad intersticial, en el cual el flujo del agua es lento y laminar (acuífero superior); y un medio fracturado (acuífero inferior), caracterizado por porosidad fisurada, donde el movimiento del agua es rápido y de tipo turbulento. (Insivumeh *et al.*, 1978).

Este territorio destaca por ser altamente fracturado lo que también influye en el flujo y almacenamiento del agua subterránea. La cuenca norte, está bordeada por formaciones de caliza del Cretácico y formación intrusiva y metamórfica del Cretácico y Paleozoico, mientras que al sur lo define la falla de Jalpatagua, cercana a los volcanes de Pacaya y de Agua.

Para facilitar la comprensión y análisis del sistema regional de acuíferos regional se denomina “Cuenca Norte” al conjunto de cuencas que drenan al río Las Vacas “Cuenca sur” del valle a la cuenca del río Villalobos hasta drenar al lago Amatitlán.

b.2. Descripción de los principales acuíferos del sistema hidrogeológico regional

En 1975-77, la profundidad promedio para encontrar agua en un pozo artesanal se estimó en 36 m. En los deltas y aluviones de los ríos la profundidad es menor y hay sitios y en sitios singulares, tal como Bárcenas, la profundidad es superior a 300 m (Insivumeh *et al.*, 1878)

En base al uso potencial del agua subterránea y desde el punto de vista práctico de la explotación de este recurso, se distinguen en el área dos acuíferos principales. Estos se denominan acuífero superior y acuífero inferior, aunque a veces resulta difícil apreciar su separación ya que presentan buena conexión hidráulica entre sí. A continuación, se describen estos acuíferos y en la Figura 2 se puede apreciar un perfil hidrogeológico idealizado, el cual está basado en Insivumeh *et al.*, (1978). Ver Cuadro 4.

Acuífero superior

El acuífero superior está constituido esencialmente por potentes depósitos cuaternarios (relativamente recientes) de piroclastos (material de erupciones volcánicas) pomáceos desde compactos hasta suelos mal clasificados y mal estratificados. Existen intercalaciones locales de sedimentos fluvio-lacustres, paleosuelos, ceniza y lavas. Se incluye en este acuífero a los materiales aluviales depositados en deltas de los ríos Villalobos (incluyendo la desembocadura en el lago Amatitlán), Pinula y Las Minas.

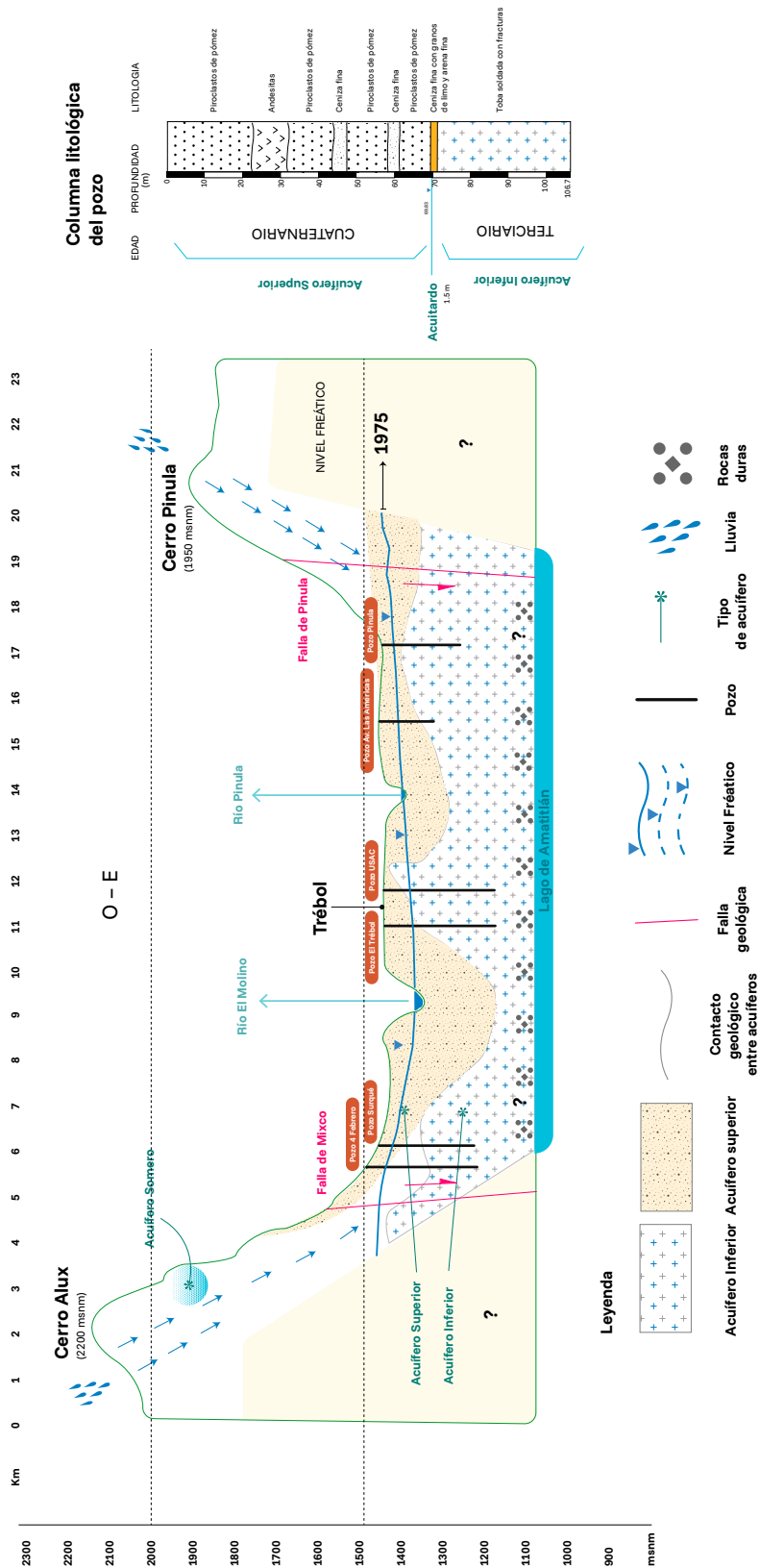


Figura 2. Modelo hidrogeológico conceptual del sistema de acuíferos de la Región Metropolitana
 Fuente: elaboración propia.

Dichos piroclastos abarcan un área total de 664 km², con espesores que varían desde pocos metros acercándose a los flancos oeste y este, y hasta 250 m en la parte central, tal como el trébol o aeropuerto La Aurora. El promedio de espesor de este acuífero es 80 m, de los cuales 38 m están saturados por agua. A este acuífero también se le agregan, para facilitar su análisis, los deltas de ríos y depósitos aluviales (suman 57.5 km²) con un espesor medio de 110 m.

La capacidad productiva de este acuífero se puede categorizar como moderada a alta, de acuerdo con los valores medios de caudales, coeficiente de almacenamiento (alrededor de 0.09) y transmisividad (entre 50 y 750 m³/día/m) con un valor promedio de 180.

El volumen de agua almacenado en estos depósitos piroclásticos es de 4 x 10⁹ m³ y en los sedimentos aluviales y deltas de ríos. Cada metro de fluctuación general de la superficie freática representa un volumen de aproximadamente 100 millones de m³ de agua.

Acuífero Inferior

El acuífero inferior se localiza debajo del acuífero superior y está separado del mismo por un delgado acuitardo. Está conformado por rocas como lavas andesíticas y tobas vítricas del Terciario, muy fracturadas cuyo espesor medio es de 250 m, de los cuales 200 m están saturados de agua. La permeabilidad principal de este acuífero es secundaria, es decir que el agua se almacena y escurre por rocas fracturadas y fragmentadas y no en el sustrato poroso del suelo. La extensión de este acuífero es de 550 km².

La capacidad productiva de este acuífero se puede clasificar como moderada a muy alta, de acuerdo con los valores medios de caudales, coeficiente de almacenamiento (alrededor de 0.22) y transmisividad (entre 500 y 5000 m³/día/m), siendo más altos hacia el sur, especialmente en sitios fracturados y reduciéndose hacia la cuenca norte.

El volumen de agua almacenado en el acuífero inferior es de aproximadamente 27,500 x millones de m³. De acuerdo a sus características hidrogeológicas, cada metro de descenso en el nivel estático en el acuífero representa un volumen aproximado de 120 millones de m³.

Potencial productivo y descargas subterráneas de los acuíferos al lago Amatitlán (al sur) y río las Vacas (al norte).

El potencial productivo de la cuenca sur es de 67 millones de m³, sin embargo este caudal es indispensable para mantener el nivel y la calidad del lago Amatitlán. El potencial productivo de la cuenca norte es de 43 millones de m³. Es decir, la capacidad productiva total del acuífero es de 110 millones de m³.

El caudal subterráneo de la cuenca sur que escurre hacia el lago Amatitlán es de aproximadamente 57 millones de m^3 de agua por año. El agua subterránea que se descarga en forma de flujo base es aproximadamente de 10 millones de m^3 por año. A su vez, el lago Amatitlán descarga subterráneamente al río Michatoya aproximadamente 1.9 millones de m^3 .

El caudal subterráneo estimado para la estación de aforo San Antonio las Flores, al norte del área de estudio sobre el río Las Vacas, es de 2.6 millones de m^3 /año. Además, el caudal de flujo base es aproximadamente de 40 millones de m^3 /año.

Aprovechamiento del sistema de acuíferos, extracción 1975 a 1977

El volumen de extracción estimado para el año 1975-76 es 72.67 millones de m^3 /año, los cuales se distribuyen en la cuenca sur 56.60 millones de m^3 /año y en la cuenca norte 16.07 millones de m^3 /año. El volumen de extracción estimado para el año 1976-77 es 80 millones de m^3 /año, los cuales se distribuyen en la cuenca sur 62.07 millones de m^3 /año y en la cuenca norte 17.93 millones de m^3 /año.

Se estimó que el 90.8% de la extracción es para abastecimiento de agua potable de la población y el resto es para uso industrial y agricultura. Se contabilizaron 2200 pozos hechos a mano y 395 pozos perforados (o mecánicos). La profundidad promedio de los pozos era de 163 m siendo la mayor profundidad 396 m y la menor 24.1 m.

En la cuenca sur el descenso anual observado fue de 0.70 m/año. Está documentado que ya existía leve sobreexplotación, ya que la extracción es superior (ligeramente) a la recarga hídrica natural. Otro referente de análisis es el siguiente indicador: el coeficiente de recarga hídrica de la precipitación es de 22% en la cuenca sur y 8% en la cuenca norte.

Elaboración de un modelo conceptual idealizado

De acuerdo a la información descrita anteriormente y su presentación organizada en los Cuadros 3 y 4, se elaboró un modelo hidrogeológico conceptual, el cual facilita la comprensión del estado y la dinámica en el tiempo del agua subterránea (Figura 2).

c. Dinámica del volumen de agua almacenado en el sistema de acuíferos y su agotamiento

Para la evaluación de la dinámica del estado y disponibilidad de agua subterránea, así como para analizar el nivel de agotamiento de los acuíferos, se elaboró el Cuadro 5. Este presenta los principales indicadores hidrogeológicos ya descritos anteriormente en la línea base (1975-77) y los valores actualizados para la década actual (centrados en 2025). Basado en lo anterior se preparó el modelo conceptual hidrogeológico que ilustra los cambios en los principales indicadores (Figura 3).

Entre los principales hallazgos se encuentran los siguientes:

- Grupo 1. Indicadores para los que no se logró determinar valores actualizados, a pesar de ser relevantes, como:
 - profundidad freática dominante,
 - porcentaje de lluvia que infiltra,
 - volumen de agua almacenada,
 - volumen de potencial productivo
 - volumen de fluctuación derivado del descenso en la profundidad freática.
 - número de pozos
- Grupo 2. Indicadores que fueron actualizados, sin embargo se establecieron con estimaciones derivadas de observaciones de campo y publicaciones disponibles que no cuentan con un marco metodológico que los respalde adecuadamente. Por lo tanto son aproximaciones con muy alta incertidumbre, los cuales deben ser sujetos de validación técnica. Entre estos destacan los siguientes:
 - volumen anual de vaciado de los acuíferos regionales
 - descenso promedio del nivel freático
- Grupo de indicadores para los que si se encontró respaldo bibliográfico, sin embargo, presentan valores muy contrastantes entre sí, los cuales son:
 - volumen anual de entradas totales de agua a los acuíferos
 - volumen anual de extracción
 - algunos atributos hidrogeológicos, especialmente, porosidad eficaz

Del análisis anterior se establece que no existe información totalmente confiable para permitir una actualización completa basándose en balances hídricos. Ante esta situación de alta incertidumbre, se procedió a contrastar y definir datos respecto a los indicadores más relevantes para poder evaluar la dinámica de la disponibilidad de agua.

Estos indicadores son los que están relacionados con el volumen de agua almacenada y disponible en los acuíferos, lo cual fue establecido por Insivumeh *et al.*, (1978), en la línea base. Establecer la disponibilidad actual (centrado en 2025) y proyectar la disponibilidad de agua en el futuro, proyecciones de 40-50 años en el futuro (década 2060-70).

Dada la mejor información disponible en la actualidad se utilizan los siguientes indicadores:

- Línea base (centrado en 1975):
 - Volumen de agua disponible en el sistema regional de acuíferos. Indicador disponible en la línea base descrita anteriormente, y la fuente es: Insivumeh *et al.*, 1978.
 - Descenso promedio anual (m) del nivel freático durante el período 1975-77. Indicador disponible en la línea base, fuente: Insivumeh, 1978 (Cuadro 5).
 - Estimación de volumen anual de vaciado del sistema regional de acuíferos. Basado en el indicador denominado: Volumen de fluctuación por cada metro de descenso en nivel freático línea base, establecido en línea base, fuente: Insivumeh *et al.*, 1978.
- Evaluación de estado actual (centrado en 2025) y tendencias (centrado en 2050)
 - Determinación del descenso promedio anual (m) del nivel freático en décadas alrededor de 2000, en la actualidad (2025) y su proyección al futuro en un escenario tendencial. Elaboración propia basada en el indicador de descenso anual del nivel freático promedio. Fuentes: Insivumeh, *et al.*, 1978, Herrera 2016, UICN, 2023 y fuentes primarias de alta confiabilidad (Figura 3)
 - Derivado de lo anterior, se realizó una regresión simple y se derivó una función lineal. Además, se estimó el volumen anual de vaciado del sistema regional de acuíferos, su acumulación interanual y análisis de su dinámica en el tiempo (línea base, actual y futura) (Figuras 3 y 4).
 - Dinámica del volumen de agua subterránea disponible (línea base, actual y futura). Fuente: elaboración propia (Figura 4).

Cuadro 5. Marco analítico de dinámica de atributos cuantitativos de acuíferos del Valle de Ciudad de Guatemala (período 1975 - 2025)

Acuífero	Variable / Indicador	Dimensión	Cuenca sur	Cuenca Norte	Línea base 1975-1977	Actual 2022- 2025
Condiciones generales	Area	km ²	570.57	235.04	805.81	506.2
	Profundidad freática promedio	M			35	ND
	lluvia anual que recarga el acuífero (x med = 1247 mm)	% (mm)	22	8	15 (350)	ND
	Volumen total de agua almacenado	Hm ³ millones de m ³			32,100 -31,500	ND
	Volumen anual de entradas (recarga, retornos y transferencia inducida)	Hm ³ millones de m ³				210.3 (UICN, 2023) 139.7 (IARNA-TNC, 2013)
	Volumen anual de salidas (extracción)	Hm ³ millonesde m ³	59.3.	17	76.3	411.2 (UICN, 2023) 502.3 (IARNA-TNC, 2013)
	Volumen anual de vaciado de acuíferos	Hm ³ millones de m ³				- 200.7 (UICN, 2013) - 114.2 (UICN, 2023; asumiendo recarga inducida = 86.44).
	Volumen de fluctuación por cada metro de descenso del nivel freático	Hm ³ / millones de m ³			110	ND
	Descenso anual del nivel freático	M	0.7	0	0.4	3.3 3 Cuenca norte 3.6 Cuenca sur (estimado con base a fuentes primarias)
	Caudal anual (millones de m ³) "potencial productivo"	Hm ³ / año millones m ³ / año	67	42.6	109.6	ND
	Pozos contabilizados				2600	ND

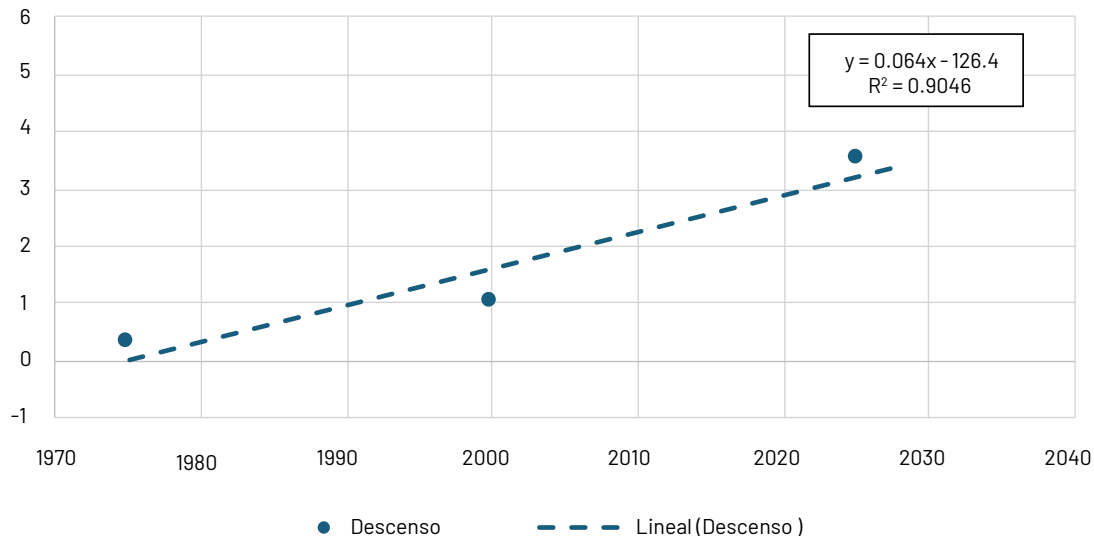


Figura 3. Modelo lineal del descenso promedio del nivel freático de acuíferos en la Región Metropolitana de Guatemala

Fuente: Elaboración propia, basada en Insivumeh-IGN-ONU, 1978; Herrera, e Instituto Bíosfera, 2025.

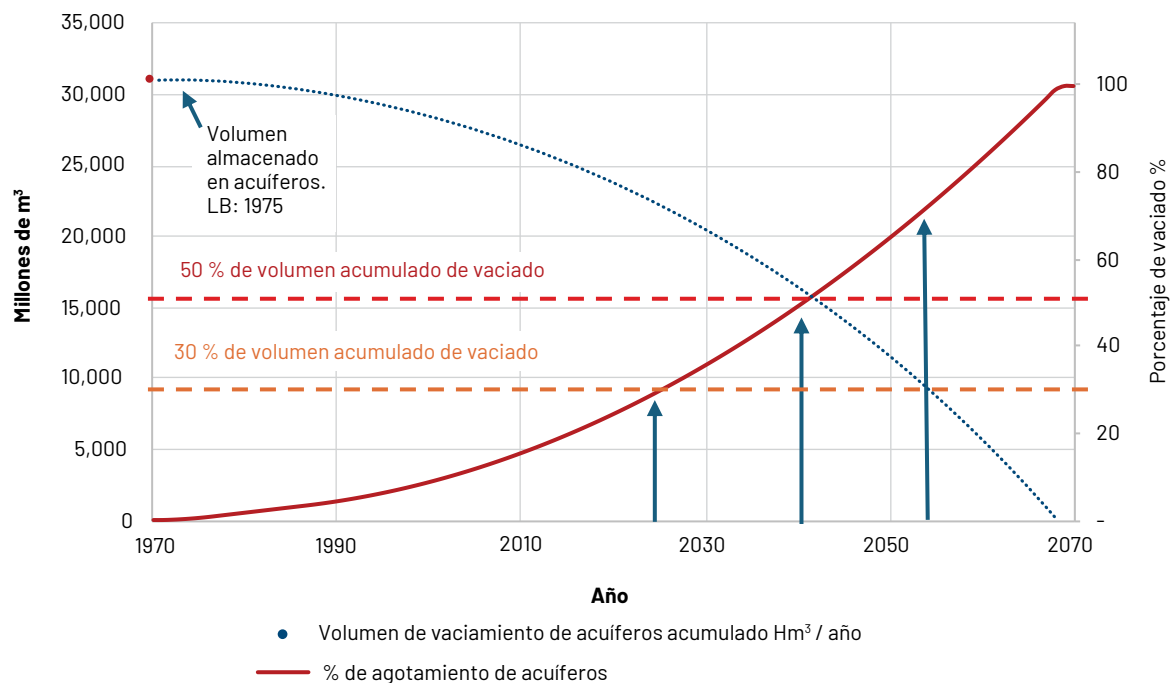


Figura 4. Volumen acumulado de vaciamiento de los acuíferos y su porcentaje de vaciamiento.

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con este análisis de proyección lineal, el cual puede considerarse como un escenario conservador, el acuífero está próximo a entrar en una fase crítica hasta avanzar a la inviabilidad. En los últimos 50 años (período 1975 – 2025) se ha consumido el 30% del total de agua subterránea almacenada. Con estas tasas de vaciado del acuífero, cerca del año 2040 se habrá agotado más del 50% del volumen de agua subterránea, esta ya es una fase muy crítica. Alrededor de la década 2050 se podrá estar alcanzando un nivel de agotamiento de 75%, lo cual deriva en la inviabilidad o colapso del acuífero en muchos sitios del área de estudio.

Estas tendencias pueden generar progresiva e incrementalmente cambios muy importantes y diferenciados territorialmente desde el presente o en muy corto plazo. En algunas zonas con condiciones hidrogeológicas desfavorables se comenzarán a manifestar condiciones de agotamiento total de los acuíferos (especialmente en acuífero superior).

Además, Funcagua (2018) y fuentes primarias reportan pozos con fuertes descensos en caudales o descensos pronunciados en nivel freático, hasta 10 m al año en pozos ubicados en Mixco. Obviamente esto es insostenible, ya que el promedio de espesor de los acuíferos y superior sumados es de 238 m. Con esa tasa de descensos el agotamiento del acuífero es una consecuencia inevitable.

Para facilitar la comprensión sobre la dinámica de la disponibilidad de agua subterránea se presenta en la Figura 5 un modelo hidrogeológico conceptual. Dicho enfatiza los cambios en el nivel freático y volúmenes de vaciado para el período comprendido entre 1975 y 2025, esto de acuerdo con los principales atributos hidrogeológicos representativos de la Región Metropolitana.

Dinámica espacial del descenso en el nivel freático (mapa de isodescensos 1975-2025)

Para evaluar la dinámica geográfica de los cambios en los niveles freáticos se procedió a elaborar un mapa de isodescensos. A partir de los datos de nivel estático de pozos que fueron publicados en el estudio de Insivumeh-IGN-ONU (1978), el cual fue utilizado de referencia básica para la elaboración de la línea base, se procedió a elaborar mapas de isopiezas centrado en 1975. Luego se elaboró el mapa de isopiezas centrado en 2025 con datos provenientes de fuentes primarios de los mismos pozos actualizados a las fechas comprendidas entre 2022 y 2025. Basándose en lo anterior se procedió a restar los valores distribuidos de ambos mapas (Figura 6).

El mapa resultante se denomina de isodescensos del nivel freático, con el que se logra identificar geográficamente aquellas zonas con mayor cambio (Figura 7). Con valores superiores a 50 m de descenso en 150 años se encuentran las zonas perimetrales del oeste norte y este del área de estudio, incluyendo sitios de los municipios de Mixco, San Juan Sacatepéquez, San Pedro Sacatepéquez, Chinautla, San José Pinula y Guatemala.

Las zonas con descensos menores a 50 m son aquellas ubicadas en la región central del Valle de la Ciudad de Guatemala, incluyendo sitios ubicados en los municipios de Guatemala, Villa Nueva, Villa Canales, San Miguel Petapa y Amatitlán.

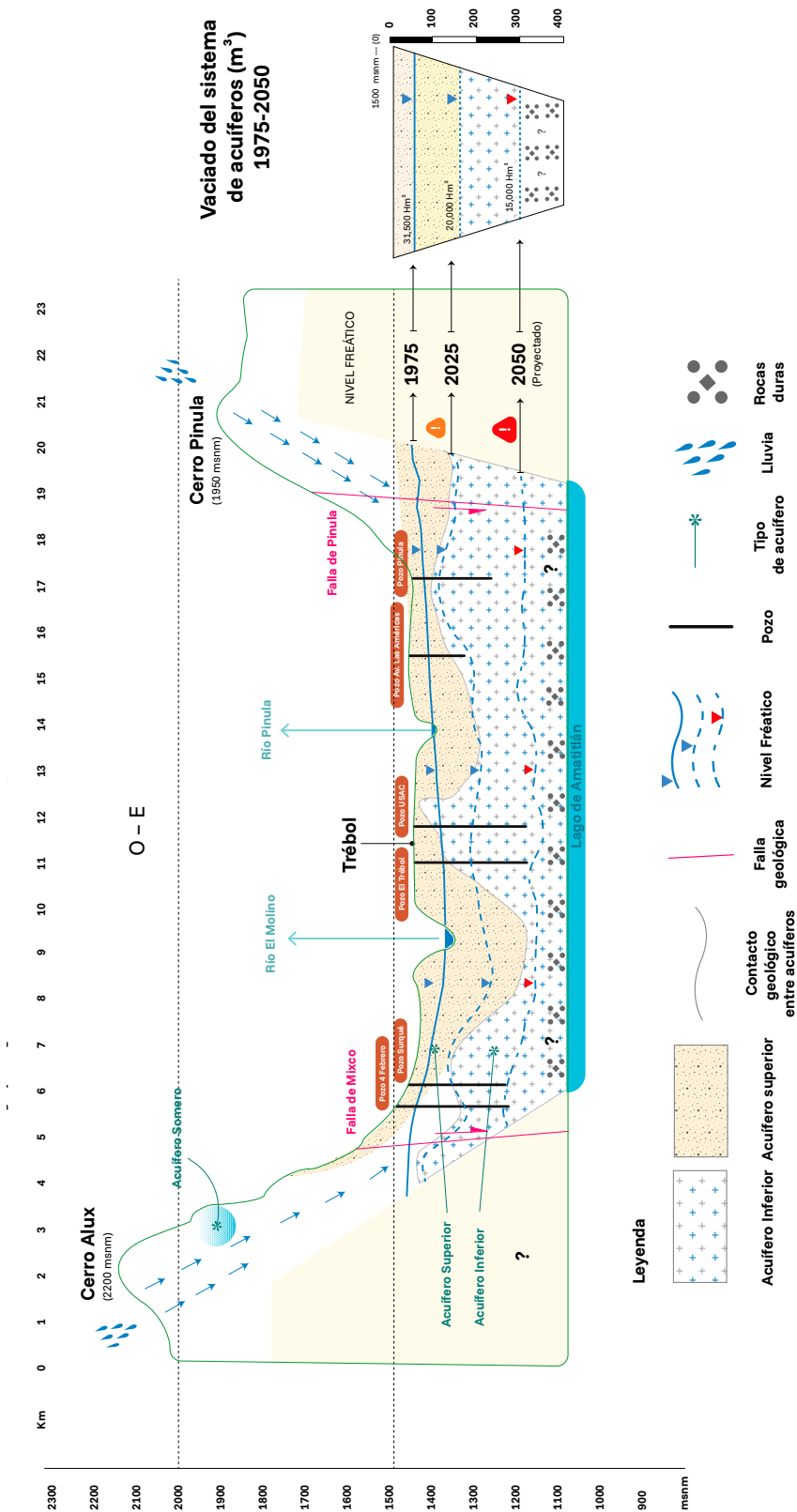


Figura 5. Modelo hidrogeológico conceptual dinámico (período 1975-2025) del sistema de acuíferos de la Región Metropolitana. Fuente: elaboración propia.

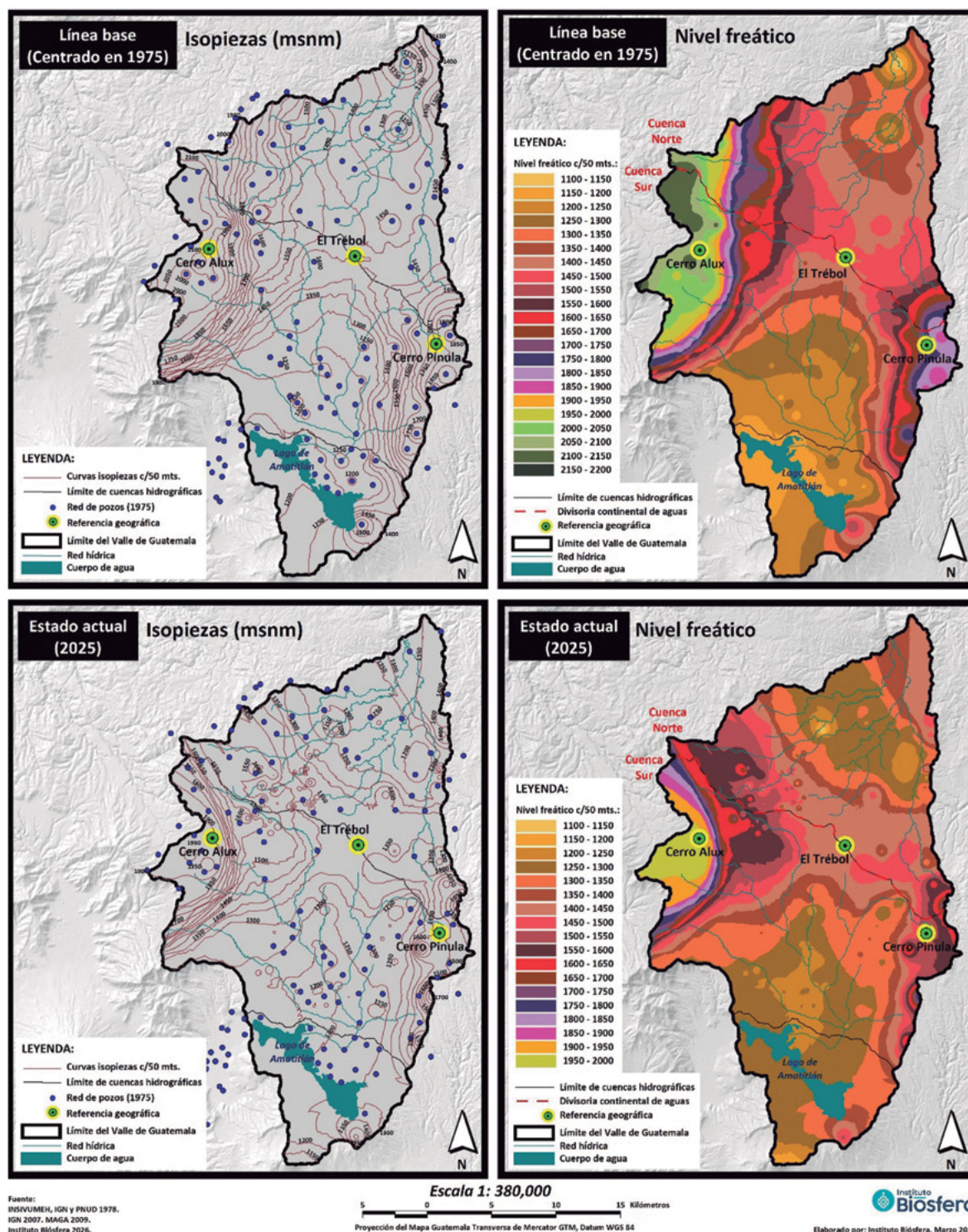


Figura 6. Proceso para la obtención de mapa de isodescensos del nivel freático

Fuente: elaboración propia, basada en Insivumeh-IGN-ONU, 1978 y su actualización con fuentes primarias y secundarias.

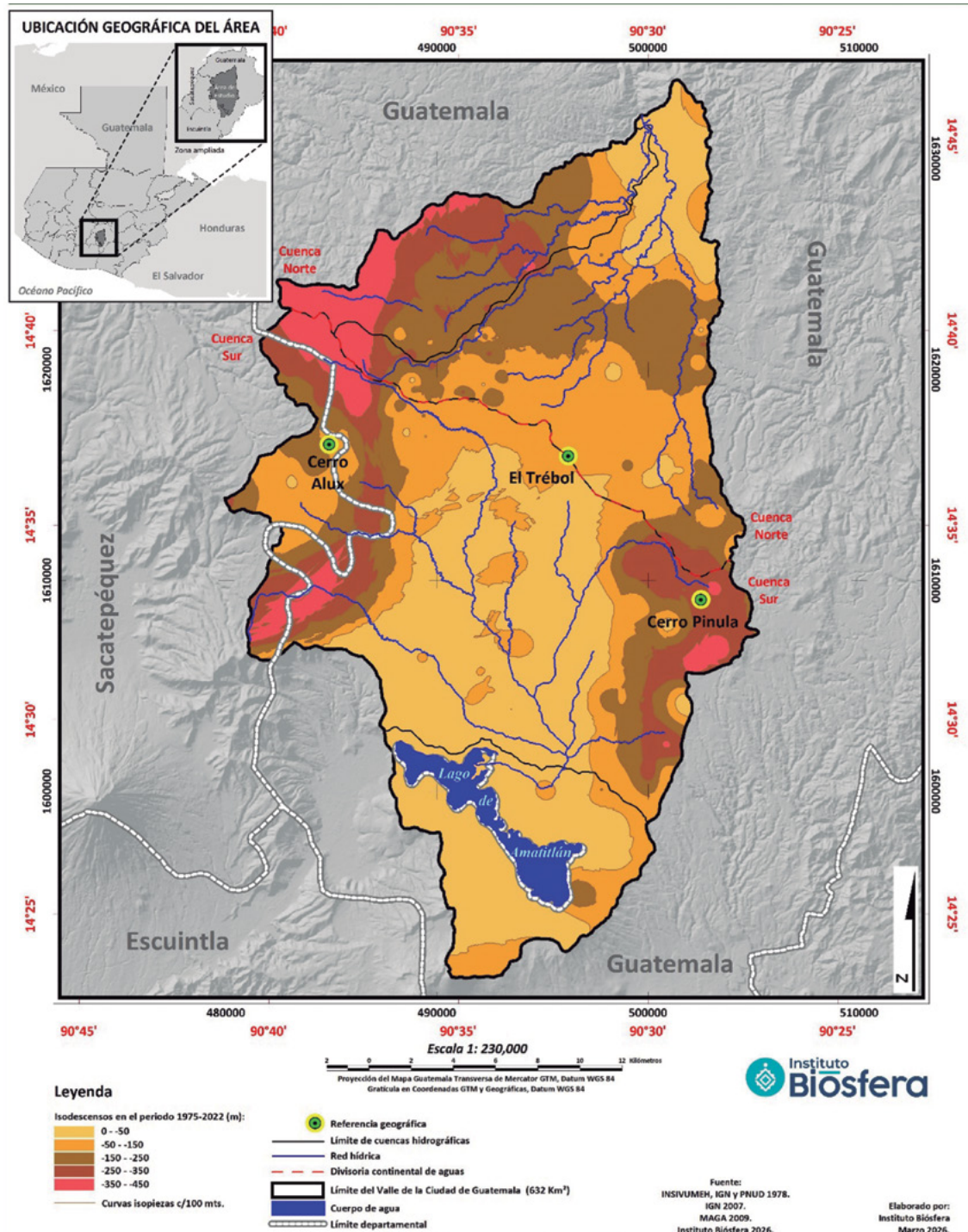


Figura 7. Mapa de isodensos del nivel freático

Fuente: elaboración propia, basada en Insivumeh-IGN-ONU, 1978 y su actualización con fuentes primarias.

d. Análisis de los factores relevantes que inciden en la disminución del nivel freático y vaciado de acuíferos

A continuación, se realiza el análisis de los principales factores que pueden explicar el acelerado vaciamiento y agotamiento del agua almacenada en el sistema de acuíferos. En primer lugar, se abordaron los datos disponibles sobre las principales entradas de agua al sistema hídrico, es decir, la recarga hídrica natural. Luego se analizan datos las principales salidas, es decir, datos de la dinámica en extracción de agua subterránea.

- Datos sobre dinámica de la recarga hídrica natural (período 1975 - 2025)

La dinámica de la recarga hídrica natural en los últimos 50 años. Los principales factores que afectan los procesos naturales de recarga de acuíferos son: las condiciones climáticas y cambios en el uso del suelo. En los cuadros 6 y 7 se presenta el balance hídrico de las cuencas de los ríos Villalobos y Las Vacas, respectivamente.

Las variables del balance hídrico han sido obtenidas de diversas fuentes, aunque no son estrictamente comparables debido a diferencias metodológicas y escalas de estudio, su homologación y expresión en lámina (mm) permitió realizar un análisis comparativo y deducir tendencias de cambio en el tiempo.

Se observa en el caso de la cuenca Villalobos, que los valores de lluvia son similares, alrededor de 1200 mm, tanto en la década 1970 como en la década actual, excepto durante 1976, que fue un año extremo muy seco. Sin embargo, la lámina de recarga hídrica muestra una clara tendencia a la disminución de un promedio de 250 mm en 1974-75 a 150 mm en 2024, en ambos casos un año hidrológico “normal” o cercano al promedio. Para la cuenca Las Vacas la tendencia es similar.

En el caso específico de la cuenca Villalobos se ilustra en la Figura 8 se muestra la disminución progresiva a lo largo del tiempo de la recarga hídrica natural. De acuerdo a Manzo (2021), quien realiza un análisis considerando promedios desde 1990 hasta 2020 la recarga anual es de 198 mm.

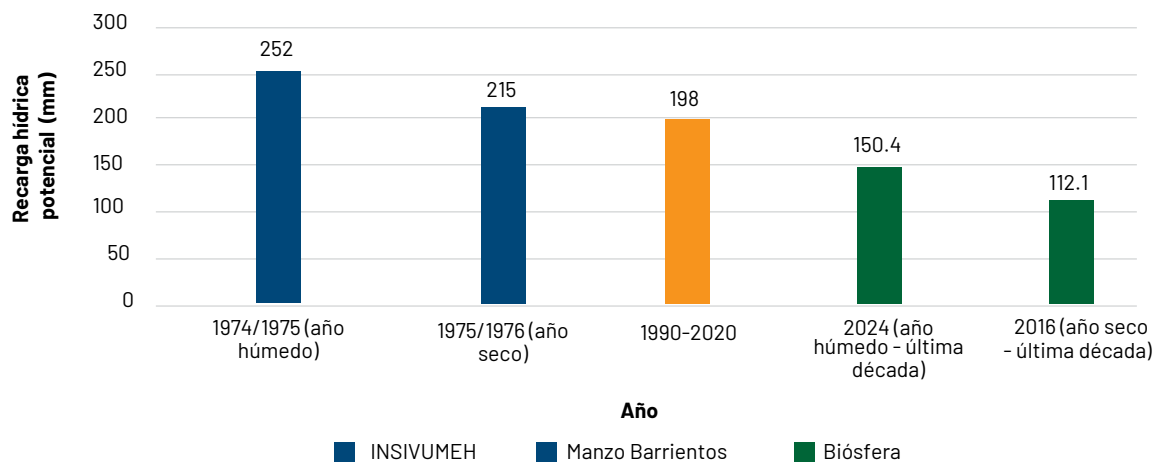


Figura 8. Gráfica recarga hídrica potencial Insivumeh-IGN-ONU (1978) vs Manzo Barrientos (2021) vs Instituto Biósfera (2024) de la cuenca del río Villalobos.

Cuadro 6. Balance hídrico de la cuenca Villalobos.

Autor	Año	Año datos**	Área de estudio	Extensión (km²)	P (mm)	EVT (mm)	R (mm)	Esc (mm)	I (mm)	Esc sub (mm)
Instituto Biósfera	2025	2024	En cobertura boscosa y área urbana impermeabilizada	310.12	1,210	514.6	145.8	431.8	-	-
Manzo Barrientos, D. E.	2021	1990 al 2020	Subcuenca Villalobos	312.88	1243	441.52	197.97	536.51	-	-
Cruz, M	2019	2012	Región metropolitana:16 microcuencas	1242.18	1,770	917.00	177	648.00	3	31
Iarna - TNC	2013	Sin especificar	Zona metropolitana (16 microcuencas + sistema Xayá Pixcayá)	1461.152	1909	929	221	754	34	39
Insivumeh et al	1978	1975/1976	Microcuenca Villalobos (Cementerio)	313.44	989	703	215	45	ND	-
Insivumeh et al	1978	1974/1975	Microcuenca Villalobos (Cementerio)	313.44	1157	762	252	114	ND	-

ND: no disponible o no publicado, P: Precipitación, EVT: evapotranspiración real, R: recarga hídrica potencial Esc: escorrentía superficial. Esc sub: escorrentía subsuperficial, I: irrigación.

**La temporalidad de los datos varía según la naturaleza de cada variable; el año indicado se proporciona únicamente como referencia general y no necesariamente corresponde al periodo temporal de las variables analizadas.

Cuadro 7. Balance hídrico de la cuenca Las Vacas

Autor	Año	Año datos**	Región	Extensión (km ²)	P (mm)	EVT (mm)	R (mm)	Esc (mm)	I (mm)	Esc sub (mm)
Insivumeh <i>et al</i>	1978	1975/1976	Las Vacas San Antonio Las Flores	235.04 km ²	1175	784	93	570	ND	ND
Insivumeh <i>et al</i>	1978	1974/1975	Las Vacas San Antonio Las Flores	235.04 km ²	1087	765	87	502	ND	ND
JICA	1986	N/D	Área Norte	240.06 km ²	1130	805	25	301	ND	ND

ND: no disponible o no publicado, (P): Evapotranspiración potencial, Pp: Precipitación en millones de m³, EVT: evapotranspiración real en millones de m³, R: recarga en millones de m³, Esc: escorrentía superficial en millones de m³, Esc sub: escorrentía subsuperficial en millones de m³, I: irrigación en millones de m³

*: Dato en láminas de agua (mm) **La temporalidad de los datos varía según la naturaleza de cada variable; el año indicado se proporciona únicamente como referencia general y no necesariamente corresponde al periodo temporal de todas las variables analizada

La tendencia de disminución de la recarga es muy marcada, pudiéndose inferir un efecto importante de la urbanización e impermeabilización del suelo, especialmente áreas que propician la recarga por sus atributos biofísicos. De acuerdo a Incyt (2020), la mancha urbana ha aumentó 15 km²/año en el periodo de 1997 (154 km²) a 2014 (406 km²), esto es una muestra de crecimiento horizontal, ya que en un periodo de 17 años la impermeabilización se expandió 252 km², lo cual equivale a cerca del 30% de la extensión superficial del área de estudio.

Además, también se compara la recarga hídrica de un año seco durante la década de línea base (1975-76) con un año seco durante la última década, es decir 2016. Se logra evidenciar el efecto significativo (entre 10 y 20%) en la reducción de la capacidad de recarga del sistema durante los años con precipitación por debajo de los promedios interanuales de 215 mm 1975/76 (215 mm) y en 2016 (112 mm).

- Extracción de agua subterránea y agotamiento del sistema de acuíferos regional

Las principales fuentes de información que han abordado la volumetría del sistema de acuíferos en el área de estudio son dos: Insivumeh *et al*, 1978, Jica 1996 y Herrera (2016). En el Cuadro 8 se muestran los indicadores sobre estimaciones de volúmenes de acuerdo con los acuíferos estudiados.

Se logra evidencia que la tendencia entre la línea base establecida en 1975-77 (con un volumen de total de cerca 31,500 Hm³ sumando acuíferos superior e inferior) y la publicación de Herrera en 2006 (con un volumen de 18,323 Hm³ sumando cuenca sur y cuenca norte) sugiere un marcado descenso. Es importante notar que existen algunas diferencias metodológicas, sin embargo la tendencia al descenso es muy marcada.

Cuadro 8. Volumen de agua almacenado en el acuífero, de acuerdo con Insivumeh et al., (1978) y Herrera et al., (2016)

Fuente	Área	Área total (km ²)	Volumen de agua almacenada (Hm ³)
Insivumeh et al., 1978	Acuífero superior		4 x 10 ⁹
Insivumeh et al., 1978	Acuífero inferior		27,500 x 10 ⁶
Insivumeh et al., 1978	Aluvial Pinula, Villalobos, Minas	-	2.23 x 10 ⁸
Insivumeh et al., 1978	Aluvión río Michatoya	-	1.55 x 10 ⁸
Herrera et al., 2016	Cuenca Sur	346.36	17,250x10 ⁶
Herrera et al., 2016	Cuenca nordeste	378.72	1.073 x 10 ⁸

De acuerdo a Funcagua (2018), indica que desde la fecha de publicación del reporte de línea base, Insivumeh et al., 1978, hasta fechas recientes la proporción de pozos con profundidades entre 100 y 200 metros se ha reducido notoriamente, desde del 49% al 29%, lo cual indica que ha disminuido considerablemente la probabilidad de encontrar agua extraíble a estas profundidades.

Esto indica el agotamiento extendido del acuífero superior. Mientras que los pozos con profundidades entre 200 y 300 metros aumentaron del 19% al 33%. Asimismo, los pozos de más de 300 metros de profundidad pasaron del 10% en 1978 al 36% en el análisis más reciente.

Lo anterior sugiere que cada se ha incrementado la dependencia del acuífero inferior, que también muestra signos de presión creciente y agotamiento como se ha explicado anteriormente. Según el estudio de Funcagua (2022), los pozos con profundidades entre 30 y 75 metros pasaron de representar el 17% a solo el 2% de la muestra, mientras que los pozos de 76 a 100 metros desaparecieron completamente (del 5% al 0%).

El acuífero superior cuya profundidad varía entre 100 y 150 metros dependiendo de la ubicación (Herrera *et al.*, 2016), ya se encuentra en un estado avanzado de deterioro, al menos en algunas zonas del área de estudio, por ejemplo en las zonas laterales occidental y oriental del Valle, siendo menos drástico el cambio de la profundidad freática en la parte central del área de estudio.

Por otro lado, se tiene alta incertidumbre respecto al número de pozos funcionando. La tendencia también ha sido incremental. De acuerdo a IUCN (2023) la región metropolitana tiene más de 2000 pozos versus los 357 pozos identificados en la línea base (Insivumeh *et al.*, 1978), ver Cuadro 9.

Cuadro 9. Estimación de cantidad de pozos activos en la región metropolitana.

	Insivumeh et al., (1978)	Iarna (2012)	Herrera et al., (2016)	Funcagua (2022)	Uicn (2024)
Región Metropolitana	357	>500	>500	91-128*	>2000
Acuífero noreste	NE	>500	60-100	NE	NE
Acuífero sur	NE	>500	>500	NE	NE

- Síntesis sobre agotamiento del sistema de acuíferos

Partiendo de los datos anteriores, se analizó la interacción de los principales factores que interactúan para generar “una tormenta perfecta”, que explican el vaciado progresivo e incremental del sistema de acuíferos. Los principales factores considerados son los siguientes:

Muy alta sobreextracción de agua subterránea

La extracción promedio anual en la última década ha sido estimada entre 550 millonesde metros cúbicos (Hm³) (Iarna, 2013) y aproximadamente 400 millones de metros cúbicos (Hm³) (Uicn, 2022), mostrando un aumento significativo durante los últimos 50 años (estimaciones de 1975 la ubican en cerca de 70 millones de metros cúbicos (Hm³), solamente en la cuenca Villalobos).

El valor calculado de recarga hídrica natural promedio interanual es entre 95 y 100 millonesde metros cúbicos (Hm³) (Insivumeh *et al.*, 1978, Biósfera, 2025). Derivado de lo anterior se deduce una sobreextracción anual de entre 450% y 550% si se compara la extracción con la recarga hídrica natural por año. Es importante hacer notar que durante los años secos los valores de recarga disminuyen

significativamente a alrededor de 50 millones de metros cúbicos (Hm^3), reflejando valores de sobreextracción cercanos al 1,000%.

Los valores de sobreextracción y déficit hídricos se confirman con el siguiente análisis. Hay evidencia del descenso sostenido del nivel freático durante los últimos 50 años, el cual se ha cuantificado, de acuerdo con Insivumeh *et al.* (1978) en 0.7 (Cuenca sur) y valores no significativos para la cuenca norte con un promedio para la región metropolitana de 0.35. Herrera estima un promedio de 1 m descenso en la región metropolitana para la década del año 2000. Instituto Biosfera (2025) estima un promedio interanual de 2.2 m (promedio de 110 m acumulado) para el periodo 1975-2025 y aplicado a toda la región metropolitana.

Si tomamos de referencia el valor de vaciado promedio del acuífero propuesto por Insivumeh *et al.* (1978) que cada metro de descenso en el nivel freático equivale a 110 millones de metros cúbicos (Hm^3), se produce uno de 10,000 millones de metros cúbicos, lo que equivale al 30 % del agua almacenada en 1975 (estimado en 31,000 millones de m^3 (Hm^3), por Insivumeh *et al.* (1978). En términos de descenso del nivel freático acumulado en esos 50 años equivale a aproximadamente un descenso 100 metros de descenso del nivel estático, es decir de 30 m reportado por Insivumeh *et al.* (1978) metros a 130 m reportados en la actualidad (Biosfera, 2025).

Esto implica el agotamiento severo, y en muchos casos extinción del acuífero superior, el cual está ubicado entre 0 y 250 m de profundidad con un promedio de 80 m de espesor, de los cuales 38 m están saturados de agua.). Al mismo tiempo una creciente dependencia del acuífero más profundo, denominado inferior (entre 250 y 300 m de profundidad con un promedio de 200 m de espesor saturado de agua).

Disminución significativa de la recarga hídrica natural

La recarga hídrica natural (derivada de la lluvia) se estima en 150 mm al año (cerca del 12% de la precipitación), mostrando una reducción pronunciada ya que en la década de 1970 en la que se estimó en 250 mm o un equivalente al del 20% de la precipitación anual.

Se infiere que uno de los aspectos más importantes para tal reducción es la impermeabilización y urbanización horizontal sin planificación adecuada del territorio. Al mismo tiempo se evidencia escasa protección o diseño de áreas de recarga.

Incyt, 2020 reporta el crecimiento de la mancha urbana en un promedio de 15 km^2 /año y en un período de 17 años la impermeabilización una expansión de área impermeabilizada de 252 km^2 , equivalente aproximadamente al 30% del área de la región metropolitana.

Cambios en el clima regional y local

El cambio en los patrones climáticos afectan el ciclo hidrológico. El incremento de recurrencia e intensidad de años extremos con lluvias anuales debajo del promedio (sequías), agravan el agotamiento de los acuíferos. Estudios de isótopos estables del agua indican que durante años los secos (con precipitaciones abajo del promedio histórico) se interrumpe el flujo de agua subterránea desde las áreas de recarga ubicadas en la parte alta oeste (Cordillera Alux) y este (Cerro Pinula) hacia la parte media y baja. Esto también incrementa los riesgos existentes sobre ecosistemas importantes como el lago Amatitlán (Biosfera, 2025).

Las oscilaciones de lluvia interanual son coherentes con los factores moduladores de la lluvia (teleconexiones) conocidos en Mesoamérica. La Oscilación del Sur (ENSO) y la variabilidad del Atlántico Norte tropical (ATN). Fases cálidas de ENSO (El Niño) suelen coincidir con déficits de precipitación anual en el altiplano central, mientras que fases frías (La Niña) favorecen acumulados superiores al promedio. Los eventos intensos de El Niño tienen una recurrencia de entre 2 a 7 años (Biosfera, 2025).

De acuerdo a Instituto Biosfera 2025, en las estaciones de monitoreo climático ubicadas en el área de estudio se observa intensificación de la lluvia, especialmente durante los últimos 50 años. Es decir, la misma cantidad de lluvia anual ocurre en menos días de lluvia. Además se reporta una intensificación de los eventos extremos, la fracción de lluvia anual aportada por días de precipitación extrema (percentil 95) aumenta de ~24-26 % en los años setenta a ~35-40 % en la actualidad, con una tendencia de aumento de 2.8 % por década ($p < 0.01$).

La temperatura también es un factor importante, ya que se observó un incremento de $\approx 2^{\circ}\text{C}$ de incremento durante los últimos 50 años. Esto se observa especialmente en las estaciones ubicadas en sitios con altos niveles de urbanización. Lo anterior se deriva en mayores valores de evapotranspiración del agua de lluvia.

Modelo de abastecimiento de agua subterránea con enfoque extractivo (tipo mina)

El agotamiento acelerado del sistema regional de acuíferos demuestra la inexistencia de una gestión social o institucional adecuada para garantizar su sostenibilidad. Los recursos hídricos, paradójicamente, son un recurso natural renovable, el cual fluye superficial y subterráneamente o se almacena independientemente de los límites políticos del territorio. Además, los recursos hídricos presentan una capacidad de productiva o renovación natural con límites físicos.

A nivel internacional es común observar prácticas institucionales para la protección y administración de los recursos hídricos que son necesarios para garantizar el abastecimiento sostenible de agua. Sin embargo, en la Región Metropolitana de Guatemala esta serie de buenas prácticas es inexistente.

Entre las principales prácticas que el sistema institucional aplica en la gestión integral de recursos hídricos se encuentran los siguientes:

- Priva el bien común sobre el interés particular;
- Enfoque de gestión integral, satisfaciendo de forma equilibrada objetivos de uso y alcances ambientales, sociales y económicos.
- Enfoque de gestión ecosistémica, basado en el ciclo hidrológico, incluyendo agua atmosférica, superficial y subterránea.
- Enfoque de gestión basado en atributos y límites naturales, por lo tanto basados en conocimiento científico profundo. Límites de extracción basados en la capacidad de carga de los acuíferos o ecosistemas naturales.
- Enfoque de resiliencia, adaptación y riesgo. Por ejemplo, diseño e implementación de infraestructura para almacenamiento de agua durante estación lluviosa y gestión de avenidas asociadas a eventos extremos.
- Gestión participativa (no centralizada) y componente de resolución de conflictos.
- Capacidades técnicas institucionales sólidas.
- Protección ambiental y funcional reconociendo el papel de los acuíferos en el mantenimiento de ecosistemas, tal como manantiales y humedales, así como su función en el almacenamiento seguro de agua y se fomenta la reutilización del agua servida.

En ese sentido, se destaca la necesidad urgente de generar información hidrogeológica precisa y sistemática que sustente adecuadamente las políticas públicas de gestión sostenible del agua subterránea basada en datos actualizados y comparables. Los hallazgos de este estudio subrayan la urgencia de implementar monitoreos de largo plazo, estudios a escalas detalladas ($\geq 1:25,000$) y redes de observación ampliadas por subcuenca, con el fin de mejorar la precisión en la evaluación de la recarga y extracción del acuífero, y avanzar hacia una gestión hídrica basada en evidencia científica.

e. Calidad de los recursos hídricos

Dada la interconexión entre cuerpos de agua superficial y los flujos de agua subterránea, el estudio de la calidad de agua es importante para conocer riesgos, viabilidad de consumo y sostenibilidad. La calidad del agua en la Región Metropolitana de Guatemala ha sido objeto de atención técnica durante al menos cinco décadas (Cuadro 10). Las fuentes coinciden en reportar una tendencia sostenida al mal estado e incremento del deterioro ambiental en los principales flujos de agua.

Uno de los primeros diagnósticos sobre el estado de los recursos hídricos fue elaborado por INSIVUMEH *et al.*, (1978), el cual documentó ya en ese entonces condiciones de alarma sobre la contaminación en cuerpos superficiales, como el lago Amatitlán y los ríos que lo alimentan, especialmente el río Villalobos. La cuenca Villalobos recoge gran parte de las aguas residuales domésticas e industriales del área metropolitana, las cuales no contaban con tratamiento previo.

Dicho informe pionero reconocía el crecimiento urbano acelerado como uno de los principales factores de presión sobre los recursos hídricos, aunque no se detalla la escala de deterioro. Se identificaron altos niveles de coliformes fecales y nutrientes, especialmente en los ríos ubicados en la cuenca sur, como el río Villalobos.

Cuarenta años más tarde, los datos recientes recopilados por la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del lago Amatitlán (AMSA, 2020), el Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA, 2023), FUNCAGUA (2022), entre otras fuentes; permiten evaluar la evolución de la calidad del agua y cuentan con mayor precisión. Sendos reportes han confirmado el agravamiento progresivo de las condiciones ecológicas del lago y sus tributarios, con énfasis en parámetros físico-químicos, biológicos y microbiológicos.

De acuerdo con IARNA (2023) el Índice de Calidad del Agua (ISQA) de la zona metropolitana, tanto el Villalobos como Las Vacas registran los peores niveles de calidad hídrica a nivel nacional, con clasificaciones de calidad “pésima” o “mala”. Se reporta el transporte de grandes volúmenes de desechos sólidos, destacando la extracción de 26,000 m³ de residuos del lago en 2016.

Las fuentes citadas coinciden en reportes sobre muestreos en los ríos que presentan una grave contaminación microbiológica, con concentraciones de coliformes fecales y **E. coli** muy superiores a los límites permisibles para descargas de aguas residuales. Esta situación representa un serio riesgo para la salud humana y los ecosistemas acuáticos, evidenciando una gestión hídrica deficiente en la región metropolitana. El río Villalobos en cinco distintas ubicaciones se clasifica como “Pésima”, el río Motagua en tres distintos puntos se clasifica como “Regular”, el río Las Vacas en cinco distintos puntos varía de “Buena” a “Regular” a “Mala” y a “Pésima”.

Los datos del Índice de Calidad de Agua (ICA) publicados por AMSA para el año 2020 para el río Villalobos, indican que la mayor parte del río mantiene una calificación dentro del rango de “mala” a “pésima” calidad. El río Pinula fue el único clasificado en promedio, como “regular”; en cambio, transitar hacia la cuenca baja este sugiere altos niveles de contaminación y es clasificado como “Pésima”, tanto el río Villalobos alta, Frutal Zacatal, río Villalobos baja, río Platanitos y río Pansalic se clasifican con índice de “Pésima” y el promedio para el río San Lucas como “Mala” (Figura 9).

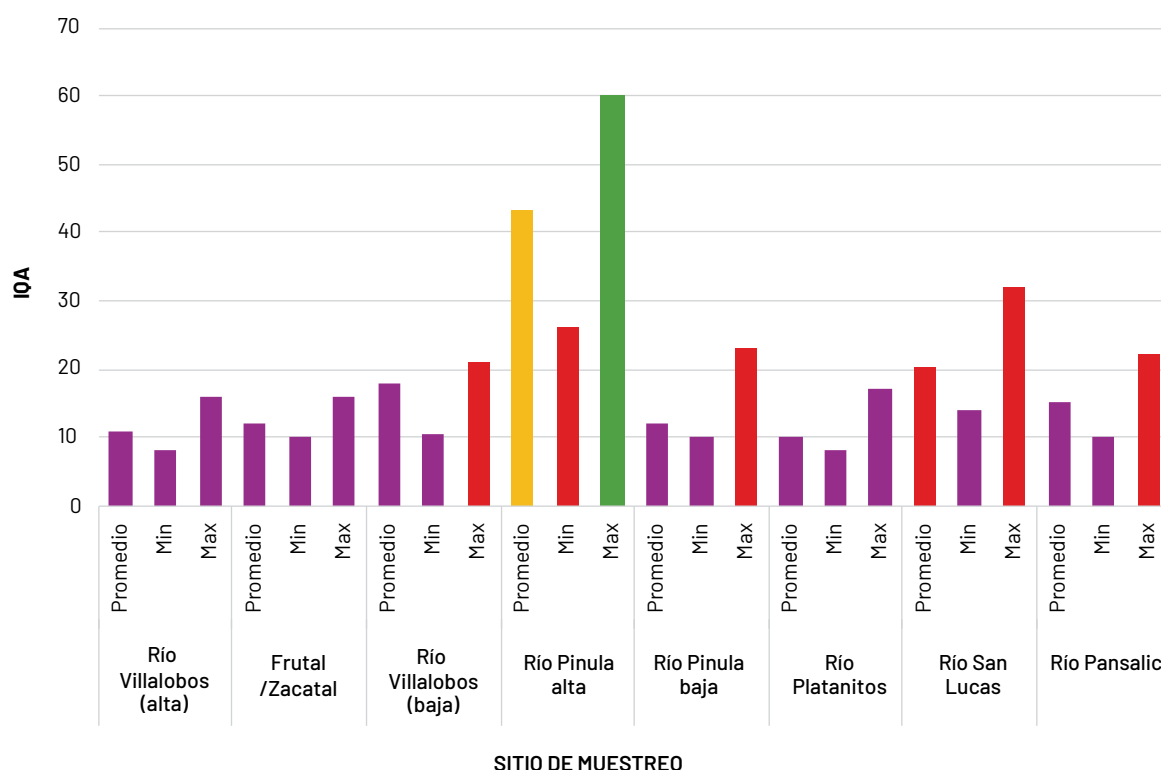


Figura 9. Índice de calidad de agua promedio, mínimos, máximos registrados en la cuenca del río Villalobos

Fuente: Elaboración propia con base en Amsa, 2020.

Cuadro 10. Estudios e indicadores de calidad de agua en la Región Metropolitana

Objetivo/ indicadores	Insivumeh et al., 1978 (Cuenca Norte : río Las Flores)	Insivumeh et al., 1978 (Cuenca Sur: Villalobos)	WWF-FOB 2017 Villalobos	Tnc-larna (2023) Zona metropolitana (datos 2017)	Amsa 2020 (Ríos tributarios del lago Amatitlán - río Villalobos)
Contaminación por aguas residuales	Contaminación severa desde la Ciudad de Guatemala	Contaminación fecal (coliformes totales elevados)		Altas concentraciones de coliformes fecales	Altas concentraciones de coliformes fecales en toda la cuenca.
Sólidos suspendidos	Probablemente elevados por aguas residuales	Elevados	210	-	Turbidez mencionada en el ICA. Transporte de sedimentos contribuye al hierro en el lago Amatitlán
Nutrientes (fósforo)	-	Altas concentraciones	<0,00079 (total)	-	Altas concentraciones de ortofosfato, superando criterios de la USEPA.
Nutrientes (nitritos)	-	Elevados, en algunos casos sobrepasando límites OMS	142.3 (total)	-	Amonio-nitrógeno (NH ₃ -N) elevado, superando niveles tóxicos para vida.
Sodio		Altas concentraciones	-	-	
Potasio		Altas concentraciones	-	-	
Oxígeno disuelto	Probablemente bajo por materia orgánica	-	-	-	Promedio bajo de 2.5 mg/l, con sitios de niveles críticos.
pH	-	-	-	-	Neutro a ligeramente básico (7.8 ± 0.27).
Conductividad	-	-	-	-	Alta (782.4 ± 262.06 µS/cm), indica sales disueltas y materia orgánica.
DBO/DQO	-	-	160/90	-	Niveles altos de DBO5 y DQO en la mayoría de los ríos.
Índice de Calidad del Agua (ICA)	-	-	-	Calidad "pésima" o "mala" y "regular"	La mayoría de los ríos presentan calidad "pésima".
Macroinvertebrados	-	-	-	-	Baja diversidad y alta abundancia de familias tolerantes a contaminación.

Por el otro lado, los datos del índice de calidad de agua para el río Las Vacas utilizado por Bocel (2021) los resultados son consistentes, ya que son clasificados como de mala a pésima calidad, de acuerdo con los índices BMWP e ISQA. Esto indica una fuerte contaminación que la hace no apta para ningún uso. Durante la época seca y en la parte baja de la época lluviosa, se reportan condiciones similares a aguas negras, con procesos de fermentación y olores desagradables.

Calidad del agua del lago Amatitlán

El lago Amatitlán puede actuar como un indicador del flujo superficial y también del flujo subterráneo. El informe de AMSA (2020) indica que este cuerpo de agua se encuentra en un estado eutrófico a hipereutrófico de forma persistente.

Dicho estado se determina por las concentraciones elevadas de nitrógeno total (promedio: 2.25 mg/L) y fósforo total (promedio: 0.185 mg/L), lo cual propicia floraciones algales, principalmente de cianobacterias tóxicas como *Microcystis spp.* Estas floraciones han sido registradas con regularidad durante la época seca, lo que representa un riesgo para la salud humana y para los ecosistemas acuáticos.

Asimismo, se ha observado una marcada reducción en la transparencia del agua, con valores promedio de 20 a 40 cm, medidos con disco de Secchi, muy por debajo del mínimo deseable para ecosistemas saludables.

Según AMSA (2020), el río Villalobos representa aproximadamente el 70% del volumen hídrico que ingresa al lago, junto con una carga significativa de materia orgánica, sedimentos y contaminantes industriales.

Las problemáticas que contribuyen en mayor proporción al deterioro del lago Amatitlán son la disposición inadecuada de los desechos sólidos, crecimiento urbano y poblacional desordenado, deforestación, desestabilización de los cauces de los ríos, degradación del suelo, falta de políticas públicas, contaminación industrial y desfogue de aguas residuales en los ríos tributarios. (FUNCAGUA, 2022)

IV. CONCLUSIONES

Existe información y publicaciones formales sobre el agua subterránea e hidrogeología de la Región Metropolitana de Guatemala. Sin embargo, esta es dispersa, heterogénea y en su mayoría corresponden a estudios aislados y parciales respecto al área de estudio. La información no responde a un programa de generación de información y actualización continua que fundamente acciones de seguridad hídrica o manejo planificado del abastecimiento hídrico.

Se estableció un promedio de al menos ≈ 100 m de descenso en el nivel freático en el sistema regional de acuíferos durante el período 1975-2025. Esto equivale a un nivel de vaciado del 30% del agua subterránea disponible en 1975. Insivumeh *et al.* (1978) estimó el volumen del sistema de acuíferos metropolitanos en 31,500 millones de m^3 .

Se prevé un aumento progresivo e incremental de los casos de inviabilidad técnica o financiera de pozos actuales y futuros. Además, de seguir con el déficit hídrico actual, es previsible un agotamiento significativo al llegar al 50% de vaciamiento a partir de la década de 2040.

Aunque se tiene alta incertidumbre sobre el estado actual de los acuíferos se logró estimar con un nivel aceptable de confiabilidad las tasas de sobreextracción documentadas por 50 años. Esto fue validado con el descenso del nivel freático, el cual se considera un indicador confiable para confirmar el nivel muy alto de vaciamiento del acuífero compuesto de la región.

Han existido esfuerzos sobre el estudio de la calidad del agua, especialmente sobre fuentes superficiales. Diversos estudios convergen en que el estado actual es de muy alto riesgo de contaminación del sistema de acuíferos. Especial afectación se espera en aquellos sitios con influencia de los cursos de agua superficiales en donde las tasas de infiltración o recarga del acuífero son altas.

Se considera relevante el caso del lago Amatitlán que recibe múltiples presiones. Por un lado aguas superficiales con muy altos niveles de contaminación y por otro la disminución significativa del flujo subterráneo. Es previsible eventos de acelerado desecamiento y eutroficación en las próximas décadas.

Es urgente e impostergable asumir el abordaje de la gestión integral de recursos hídricos, esto como un desafío histórico integrando elementos técnicos, sociales económicos e institucionales.

Referencias bibliográficas

1. Bocel, C. L. (2021). *Determinación de la calidad del agua del río Las Vacas del municipio de Guatemala, por medio del índice simplificado de calidad de agua (ISQA) y el índice biológico BMWP* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala] <http://www.repositorio.usac.edu.gt/16477/>
2. Cáceres Sobalvarro, E.A., y Paque López, C. (2024). *Estudio exploratorio de nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal en drenaje urbano de Guatemala*. Agua, Saneamiento & Ambiente, 19(1), 1-11. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v19i1.1719>
3. Chang, Villate, N. (2021). *Estudio hidrogeológico con énfasis en isótopos estables en el acuífero de la región metropolitana* [Tesis de licenciatura, Universidad Rafael Landívar] https://crailandivarlibrary.primo.exlibrisgroup.com/discovery/delivery/502URL_INST/502URL/1285536990007696
4. Cruz, M. (2019). *Análisis de la planificación territorial para garantizar la provisión del agua en la zona metropolitana* (Tesis). Universidad Rafael Landívar. <http://bibliod.url.edu.gt/Tesis/seol/2019/06/15/Cruz-Maria.pdf>
5. Fundación para la Conservación del Agua de la Región Metropolitana de Guatemala (Funcagua). (2022). *Informe del estado del agua de la Región Metropolitana de Guatemala 2022: el agua nos une*. Guatemala. <https://funcagua.org.gt/2022-informe-del-estado-del-agua-de-la-region-metropolitana-de-guatemala-2022-funcagua-url-uvg-wwf/>
6. González, B. (2018). Agua y ciudad: análisis y perspectivas del consumo de agua en el municipio de Guatemala. *Revista Análisis de la Realidad Nacional*, 24, 23.
7. Herrera, I. (2012). *Estudio hidrogeológico de la sub-cuenca del río Los Ocotes, para determinar las áreas principales de recarga hídrica e identificación de las áreas vulnerables a deslizamientos e inundaciones para proponer alternativas de prevención de la parte noreste de la Ciudad de Guatemala* (Proyecto FODECYT 2009/035). Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
8. Herrera, I. (2016). La importancia del bosque en la recarga hídrica natural del acuífero noreste de la ciudad de Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 3(1), 31-40.
9. Herrera, I., y Orozco, E. (2010). Hidrogeología de Ojo de Agua, cuenca sur de la Ciudad de Guatemala. *Revista Geológica de América Central*, 42, 85-97. <https://archivo.revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/view/4172>
10. Herrera, I. R., Manzo, D., y Hernández, E. (2016). *Informe final. Estudio hidrogeológico de los acuíferos volcánicos de la República de Guatemala*. Instituto de Investigaciones Agronómicas y Ambientales, USAC.
11. Instituto Biósfera (2017). *Estudio de hidrológico con énfasis en isótopos estables en la cuenca del río Villalobos*. Guatemala. Informe técnico.
12. Instituto Biósfera (2025). *Estado del clima en la Región Metropolitana de Guatemala*. Guatemala. Reporte científico.

13. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar (IARNA-URL), y The Nature Conservancy (TNC). (2013). *Bases técnicas para la gestión del agua con visión de largo plazo en la zona metropolitana de Guatemala*. Universidad Rafael Landívar. https://crailandivarlibrary.primo.exlibrisgroup.com/discovery/delivery/502URL_INST:502URL/12142568390007696
14. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar (IARNA-URL). (2014). *Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala. Bases fundamentales para la gestión del agua con visión a largo plazo*. Universidad Rafael Landívar. https://crailandivarlibrary.primo.exlibrisgroup.com/discovery/delivery/502URL_INST:502URL/12126147220007696
15. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar (IARNA-URL). (2023). *Módulo agua larna digital_agua*.
16. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh), Instituto Geográfico Nacional (IGN), y Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1978). *Estudio de las aguas subterráneas en el Valle de Guatemala*. Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas.
17. JICA (Japan International Cooperation Agency). (1986). *Informe final del estudio de factibilidad para el desarrollo del proyecto de agua subterránea (para Emergencia I)*. Ciudad de Guatemala
18. Manzo Barrientos, D. E. (2008). *Reconocimiento hidrogeológico para la determinación de zonas de recarga hídrica en la subcuenca del río Pinula, jurisdicción de Santa Catarina Pinula, Guatemala* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]
19. Manzo Barrientos, D. E. (2021). *Balance hídrico natural para determinar la oferta y demanda de agua en la subcuenca del río Villalobos*. Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC); Escuela de Postgrados de la Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala; Secretaría General del Consejo Superior Universitario Centroamericano (SG-CSUCA); Secretaría General del Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres en América Central y República Dominicana (SG-CEPREDENAC).
20. Morales Samayoa, J. I. (2012). *Evaluación del descenso del nivel freático en la parte Norte del acuífero Metropolitano del Valle de Guatemala* [Tesis Maestría, Universidad San Carlos de Guatemala] http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0424_MT.pdf
21. Muñoz, M. A., y Lemus, C. (2022). *Determinación de contaminantes emergentes, metales ecotóxicos, nutrientes y parámetros generales de calidad en agua y sedimentos del río Las Vacas*. Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas (IIQB). Universidad San Carlos de Guatemala. <https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puirna/INF-2021-67.pdf>
22. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN). (2023). *Resumen Ejecutivo. Estrategia de Seguridad Hídrica MGCS*. Empresa Municipal de Agua. https://Empagua.com/wp-content/uploads/2024/03/Resumen-Ejecutivo_Estrategia-Seguridad-Hídrica-MGCS.pdf
23. World Wildlife Fund (WWF) (2016). *Informe técnico del Estudio de calidad de agua en la cuenca Motagua y río Villalobos*. Guatemala.