



Identificación de las elevaciones potenciales de recarga mediante el uso de isótopos estables en la Región Metropolitana de Guatemala



El presente estudio fue posible gracias a la colaboración de múltiples instituciones y profesionales, por lo que, la FUNCAGUA agradece y reconoce la participación de cada uno de ellos:

Autoría, análisis e interpretación de resultados, infografías y mapas:

Dr. Ricardo Sánchez Murillo.

Grupo de Hidrología de Trazadores.

Universidad de Texas Arlington (UTA).

Coordinación general:

Dr. Ricardo Sánchez Murillo – UTA

Inga. Ángela Méndez – FUNCAGUA

Con el apoyo y colaboración de:

GREMIA – Gremial de Empresas para el Manejo Integral del Agua

Licda. Maricruz Villatoro – GREMIA

Ing. Julio Escoto Rosales – GREMIA

Ing. Jorge García Chiú – GREMIA

Colecta de muestras:

Ing. Óscar Ávalos – FUNCAGUA

Inga. Ángela Méndez – FUNCAGUA

Lorena Castillo – FUNCAGUA

El muestreo de pozos mecánicos, manantiales y colecta de agua de lluvia fue posible gracias a:

Mancomunidad Gran Ciudad del Sur (MGCS):

- Municipalidad de Amatitlán
- Municipalidad de Villa Nueva
- Municipalidad de Mixco
- Municipalidad de San Miguel Petapa
- Municipalidad de Villa Canales
- Municipalidad de Guatemala y Empresa Municipal del Agua (EMPAGUA)

Municipalidad de Santa Catarina Pinula

Municipalidad de Chinautla

Municipalidad de San Lucas Sacatepéquez

Defensores de la Naturaleza (Parque Nacional Naciones Unidas)

Finca privada Lomas de Emmanuel (San Antonio Las Flores, Chinautla)

Finca privada San Francisco (Chichimecas, Villa Canales)

Diseño y diagramación:

Eilyn Pineda – FUNCAGUA

Forma de citar el documento:

Sánchez-Murillo, R. FUNCAGUA. (2025). *Identificación de las elevaciones potenciales de recarga mediante el uso de isótopos estables en la Región Metropolitana de Guatemala*. Guatemala.

Índice de contenidos

1. Resumen Ejecutivo	3
2. Metodología	5
2.1 Muestreo	5
2.2 Análisis isotópicos	6
2.3 Análisis de datos	6
3. Área de Estudio	9
4. Resultados	10
4.1 Líneas meteóricas y transporte de humedad	10
4.2 Variación espacial de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) y d-ex (‰)	13
4.3 Gradiente isotópico de elevación	14
4.4 Elevaciones potenciales de recarga, procesos de recarga y conectividad hidrogeológica	17
5. Conclusiones, limitaciones y recomendaciones	19
6. Referencias	20

1. Resumen Ejecutivo

El método de identificación de las elevaciones potenciales de recarga basado en isótopos del agua, se utiliza para determinar la altitud probable donde ocurre la recarga de agua subterránea. Se basa en la variación natural de los isótopos estables de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) e hidrógeno ($\delta^2\text{H}$) en la precipitación, los cuales disminuyen a mayores altitudes debido al fraccionamiento isotópico. Para aplicarlo, se recopilan muestras de lluvia en diferentes elevaciones y se establece una relación isotópica-altitud. Luego, al comparar los valores isotópicos del agua subterránea con esta relación, se puede estimar su zona de recarga. Este método es útil para identificar fuentes de recarga, comprender la dinámica de los acuíferos y mejorar la gestión del agua, aunque puede verse afectado por la evaporación y variaciones climáticas locales.

En el estudio se colectaron 261 muestras entre precipitación (N=23), pozos (N=195) y manantiales (N=23) durante 2023-2024. El contenido isotópico ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) fue analizado en la Universidad de Texas (Arlington) mediante espectroscopía láser. Con la información isotópica, se determinó el gradiente isotópico de elevación y las áreas o elevaciones prioritarias para la recarga subterránea. Los resultados demuestran que: a) las composiciones isotópicas muestran concordancia con el espectro regional reportado en estudios previos en la región intermontañosa de Centroamérica; b) la evidencia isotópica sugiere: i) recarga local-urbana sin alteración isotópica (33.0%), ii) recarga a mayor altura (24.3%) que la elevación de extracción y iii) un componente local alterado isotópicamente (42.7%) (por ejemplo: aguas residuales, riego, cuerpos de agua superficial); c) el método fue efectivo en un 76% y 56% de los pozos y manantiales muestreados, respectivamente; d) las elevaciones potenciales de recarga varían entre ~1,100-2,350 m; e) las elevaciones de recarga abarcan uso del suelo mayoritariamente del suelo urbano y forestal y, en menor medida, agrícola.

Como parte de las acciones futuras es necesario: i) mejorar la resolución del gradiente isotópico con elevación, ii) extender la distribución espacial (mediante “snapshots” comunitarios en agua potable o de grifo), iii) mantener y generar series de tiempo isotópicas en lluvia, pozos, lagos, ríos y manantiales), que permitan desarrollar actividades de modelación; y iv) comunicar la información a la sociedad mediante boletín informativos, infografías o productos de audiovisuales (por ejemplo: videos cortos fácilmente distribuidos por redes sociales o aplicaciones de mensajería). Los hallazgos del presente estudio deben complementar los esfuerzos existentes de ordenamiento territorial urbano, así como orientar los planes de conservación para el resguardo del recurso hídrico en la Región Metropolitana de Guatemala. Por ejemplo, los resultados de esta investigación pueden converger en una política pública de pago por servicios ambientales ligada a zonas de recarga.

2. Metodología

2.1 Muestreo

En el presente estudio, se colectaron 261 muestras entre precipitación (N=43; rango de elevación: 1,241–1,879 m.s.n.m), pozos (N=195; profundidad entre 70–676m; rango de elevación: 1,022–2,110 m.s.n.m) y manantiales (N=23; rango de elevación: 1,212–2,260 m.s.n.m) durante 2023–2024. Las muestras contemplan los departamentos de Guatemala y Sacatepéquez, con énfasis en los siguientes municipios: Guatemala, Mixco, Chinautla, Sta. Catalina Pinula, Petapa, Amatitlán, Villa Canales, Villanueva y San Lucas. Los pozos y manantiales fueron colectados entre el 29 de marzo de 2023 y el 28 de noviembre de 2024, por personal de FUNCAGUA en envases de 4 ml (HDPE), sellados herméticamente con papel parafina y custodiados a 5°C hasta su envío a la Universidad de Texas en Arlington (Texas, USA). Para el muestreo de pozos se seleccionaron pozos en funcionamiento para evitar agua estancada o acumulada en las tuberías por largos periodos de tiempos. Los manantiales fueron muestreados buscando el punto más cercano del afloramiento del manantial. Las muestras de lluvia fueron colectadas semanal y bisemanalmente en colectores pasivos OPEnS 3.0 (Arellano et al., 2024). Las muestras fueron trasladadas a envases 4 mL (HDPE), sellados herméticamente con papel parafina y custodiados a 5°C hasta su envío a la Universidad de Texas en Arlington (Texas, USA). El Anexo I incluye un archivo de MS Excel ('FUNCAGUA_Guatemala_BaseDatos_Final.xlsx') con la información detallada de los sitios de muestreo, composición isotópica reciente e histórica y determinación de las elevaciones de recarga.

La información histórica corresponde con cuatro estaciones de monitoreo de lluvia de la red GNIP (N=143; frecuencia mensual entre 2018–2021; rango de elevación=10–1,578 m.s.n.m.) en la vertiente Pacífica de Guatemala y datos isotópicos, principalmente en aguas superficiales (N=188), a lo largo de varios transectos Pacífico-Caribe, disponibles en Lachniet et al. (2009). Los datos históricos de Lachniet et al. (2009) fueron digitalizados por personal de FUNCAGUA.

2.2. Análisis isotópico

El Grupo de Hidrología de Trazadores del Departamento de Ciencias de la Tierra y Ambientales de la Universidad de Texas en Arlington realizó el análisis isotópico utilizando un analizador de isótopos de agua GLA431-TLWIA. Se utilizaron tres estándares secundarios para la calibración: 5D ($\delta^2\text{H} = -10.5\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -3.00\text{‰}$), 4D ($\delta^2\text{H} = -48.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -7.63\text{‰}$) y 1D ($\delta^2\text{H} = -161.3\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -20.72\text{‰}$). Los datos fueron normalizados mediante un procedimiento de estandarización por bloques (LGR LWIA Post Analysis Software Versión 4.5.0.6). Se utilizó un estándar adicional como control interno de calidad: IC ($\delta^2\text{H} = -78.0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = -10.76\text{‰}$). Este control interno fue inyectado tres veces por lote analítico. El número total de inyecciones por muestra o estándar incluyó dos inyecciones de preparación y ocho inyecciones de medición. Las composiciones de isótopos estables se presentan en notación delta δ (‰, parte por mil), relacionando las razones $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ y $^2\text{H}/^1\text{H}$ (Vienna Standard Mean Ocean Water; V-SMOW2) de la siguiente manera:

$$\delta = \left[\left(R_s / R_{std} \right) - 1 \right] \cdot 1000$$

Donde R representa la razón de abundancia $^2\text{H}/^1\text{H}$ o $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, y R_s y R_{std} son las razones en la muestra y en el estándar, respectivamente. El exceso de deuterio (en adelante *d-ex*; Dansgaard, 1964) se calculó como:

$$d - ex = \delta^2\text{H} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$$

2.3. Análisis de datos

El análisis de datos incluyó la elaboración de diagramas duales ($\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$) y la generación de líneas meteóricas locales (LMWL, por sus siglas en inglés) para evaluar el origen meteórico de las fuentes de agua y posibles procesos de evaporación secundaria. Seguidamente, se evaluó la distribución espacial de las composiciones isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ y *d-ex*) en el área de estudio. Por último, se determinó el modelo de regresión lineal para evaluar el gradiente isotópico de elevación y las potenciales elevaciones de recarga en pozos y manantiales, siguiendo la metodología descrita por Sánchez-Murillo & Birkel (2016), Sánchez-Murillo et al. (2020 a,b) y García-Santos et al. (2022).

De igual forma se determinó el cociente entre la composición del agua subterránea (GW) y la precipitación (P), $GW/P [-]$, para evaluar la conectividad hidrológica entre el régimen de precipitación y el proceso de recarga, siguiendo la metodología descrita por Jasechko & Taylor (2015). La información espacial (SIG) que complementó el análisis fue proporcionada por FUNCAGUA. Los 'shapefile' utilizados incluyeron límites de departamentos y municipios, uso del suelo, geología y red hídrica. De igual forma se utilizó un modelo digital de elevación (en metros) para generar el gradiente de elevación en el área de estudio.

Se empleó un enfoque de agrupamiento no supervisado mediante análisis de k -medias con el algoritmo de Hartigan-Wong, agrupando las observaciones en k conglomerados según la similitud de variables clave ($\delta^{18}O$ y $d-ex$) (MacQueen, 1967). Se especificó la distancia euclidiana como métrica para cuantificar la similitud entre observaciones. El algoritmo divide las observaciones en k conglomerados minimizando la suma de los cuadrados dentro de cada conglomerado. Esto se logra a través de un proceso iterativo que asigna cada observación al centroide de conglomerado más cercano, recalcula los centroides basándose en las nuevas asignaciones y repite el proceso hasta que las asignaciones se estabilicen. Se utilizó el '*elbow method*' para determinar el número óptimo de conglomerados, identificando el punto en que la suma de cuadrados dentro del conglomerado se estabiliza, lo cual indica el número adecuado de conglomerados que mejor se ajusta a la variabilidad de los datos.

En los casos en que este punto estaba claramente definido, se empleó en su lugar el método de la silueta para evaluar la calidad del agrupamiento, midiendo la coherencia y separación entre conglomerados. Los resultados del análisis de conglomerados se exportaron posteriormente a SIG (Sistema de Información Geográfica) para representar la distribución espacial en el área de estudio. El programa R utilizado para este agrupamiento fue la función k -means, con los paquetes 'cluster' (Maechler et al., 2023) y 'factoextra' (Kassambara & Mundt, 2020).

Se utilizó el modelo Híbrido de Trayectorias Integradas Lagrangianas de Partículas Individuales (HYSPLIT, por sus siglas en inglés) (Draxler & Hess, 1998, 1997; Draxler, 1999; Stein et al., 2015) para comprender las fuentes de humedad en la región central de Guatemala durante 2024. El proceso de agrupamiento implica el cálculo de la varianza espacial (SV) entre cada punto final k de la trayectoria j dentro de su conglomerado i , utilizando la siguiente ecuación:

$$SV_{i,j} = \sum_k (P_{j,k} - M_{i,k})^2$$

donde $P_{j,k}$ es la posición del punto de la trayectoria y $M_{i,k}$ es el punto correspondiente en la trayectoria media del conglomerado. La varianza espacial del conglomerado (CSV) para cada conglomerado es entonces la suma de los valores SV de todas las trayectorias dentro de ese conglomerado:

$$CSV_i = \sum_j SV_{i,j}$$

Finalmente, la varianza espacial total (TSV) es la suma de todas las varianzas espaciales de los conglomerados:

$$TSV = \sum_i CSV_i$$

Inicialmente, cada trayectoria se asigna a su propio conglomerado. En cada iteración, se fusionan dos conglomerados para minimizar el aumento en la TSV, hasta que solo quede un conglomerado. El número óptimo de conglomerados se determinó analizando los cambios en la TSV e incorporando el conocimiento previo de los patrones atmosféricos en la región. Una vez establecidos los conglomerados, las trayectorias individuales dentro de cada grupo se promediaron para generar una trayectoria media del conglomerado, representando el patrón general de transporte para ese grupo (en %). Este enfoque permitió examinar la variabilidad en el transporte de masas de aire e identificar regímenes atmosféricos de transporte distintos que afectaron la región durante 2024.

3. Área de estudio

La Figura 1 muestra el área de estudio. Las estaciones de la red GNIP cubren un transecto desde San Antonio (10 m.s.n.m.) y Platanar (1,578 m.s.n.m.) (Figura 1A). Las estaciones de monitoreo de lluvia, instaladas por FUNCAGUA, corresponden a Chinautla (1,241 m.s.n.m.), Mixco (1,628 m.s.n.m.), Zona 11 (1,503 m.s.n.m.), Fraijanes (1,879 m.s.n.m.) y Villanueva (1,450 m.s.n.m.) (Figura 1A). Aunque estas estaciones cubren la Región Metropolitana de Guatemala en un transecto N-S y E-O, es aún necesario contar con estaciones cercanas a las máximas elevaciones en esta región. La Figura 1B muestra la distribución de los puntos de muestreo de pozos y manantiales en la Región Metropolitana de Guatemala. El área de estudio contempla los departamentos de Guatemala y Sacatepéquez, con énfasis en los siguientes municipios: Guatemala, Mixco, Chinautla, Sta. Catalina Pinula, Petapa, Amatitlán, Villa Canales, Villanueva y San Lucas.

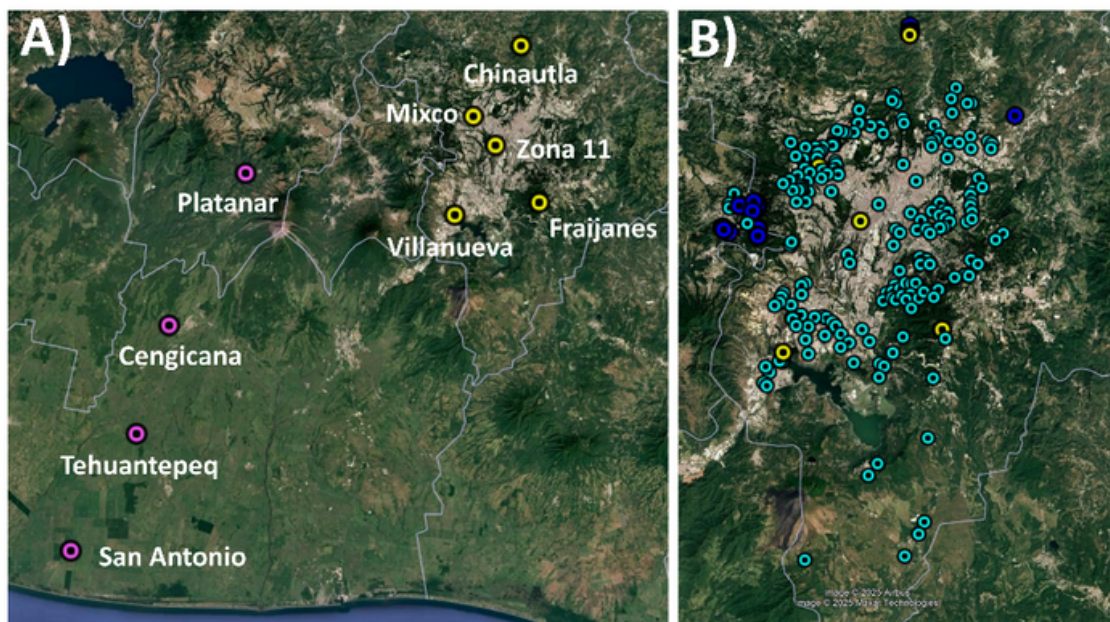


Figura 1: A) Sitios de monitoreo de precipitación correspondientes a la red GNIP (rosado) y FUNCAGUA (amarillo). B) Distribución espacial de los sitios de muestreo de pozos (turquesa) y manantiales (azul).

4. Resultados

4.1. Líneas meteóricas y transporte de humedad

La Figura 2 muestra el diagrama dual entre $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. Las líneas meteóricas locales basadas en la red GNIP y el monitoreo reciente por parte de Funcagua muestran pendientes (7.17–7.52) e interceptos (6.38–6.52) muy similares, pero por debajo de la línea meteórica global. La precipitación varía entre -15.0% y $+5.0\%$ en $\delta^{18}\text{O}$, lo cual corresponde con rangos previamente observados en la región centroamericana (Lachniet et al., 2009; Sánchez-Murillo & Birkel, 2016; Sánchez-Murillo et al., 2020 a, b; García-Santos et al., 2022). En general, las muestras de pozos y manantiales muestran un claro origen meteórico reciente. Las muestras de pozos fueron agrupadas en tres 'clusters'. Los 'clusters' evidencian: 1) condiciones meteóricas (rosado), 2) alto reciclaje de humedad (verde) y 3) condiciones de enriquecimiento (celeste) (Figuras 2 y 3C). Sin embargo, no se encontró un patrón espacial o altitudinal determinado en los agrupamientos (Figuras 3A y 3B).

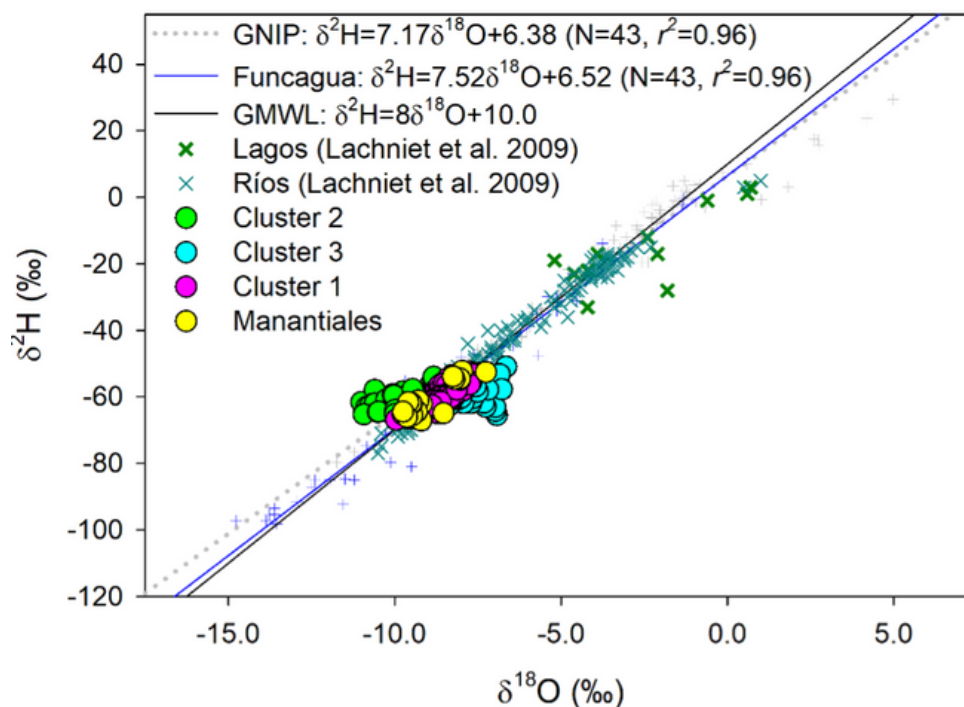


Figura 2: Diagrama dual entre $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ mostrando las líneas meteóricas globales (GMWL) y locales (GNIP y Funcagua), muestras de pozos agrupadas en clusters, manantiales, y datos históricos para ríos (magenta) y lagos (verde oscuro) en Guatemala (Lachniet et al., 2009), como referencia.

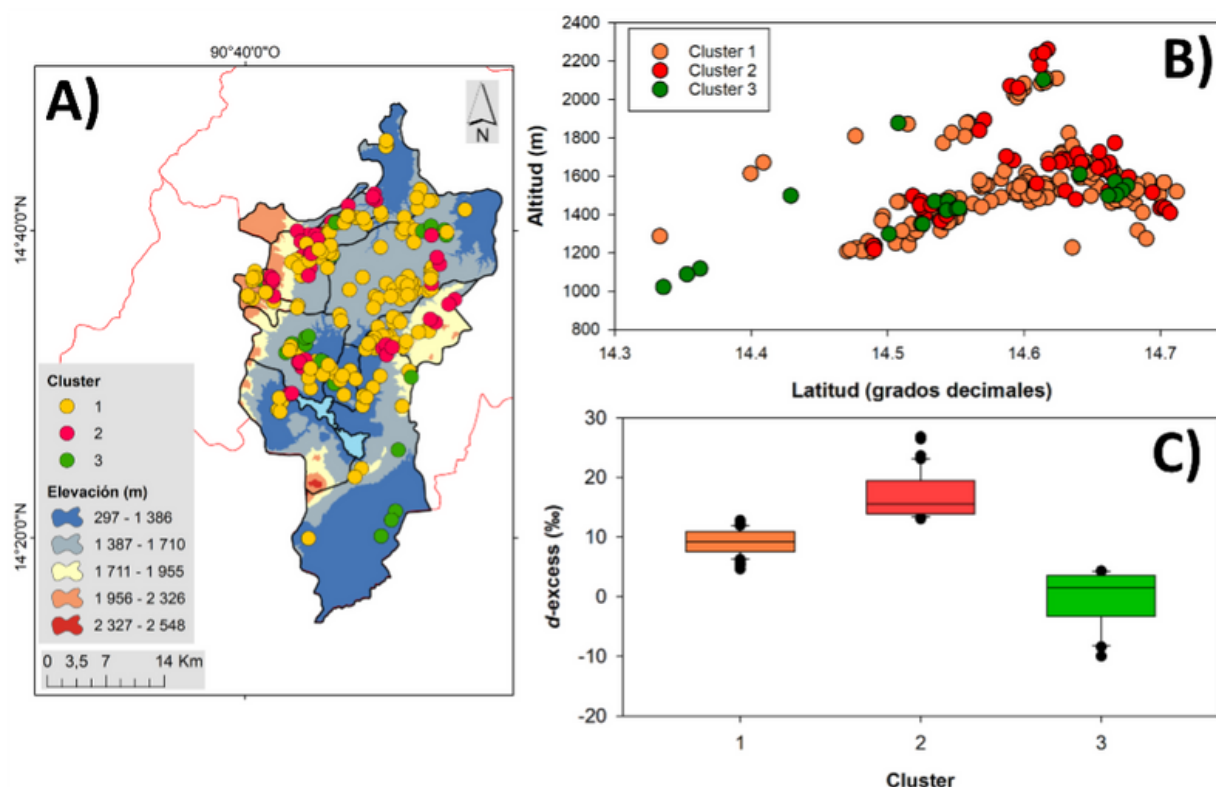


Figura 3: A) Distribución espacial de los ‘clusters’ en el área de estudio incluyendo la división por departamentos y municipios y el gradiente de elevación (m.s.n.m.). B) Distribución de los ‘clusters’ versus latitud. C) Distribución de los clusters versus d-ex (%). El valor de 10‰ en d-ex corresponde con condiciones de equilibrio, mientras que valores mayores o menores indican influencia de reciclaje de humedad y evapoconcentración, respectivamente.

Finalmente, la lluvia colectada en 2024 mostró un comportamiento típico de la región centroamericana (Figura 4A). En la región centroamericana, la estacionalidad la época seca (diciembre–abril) y lluviosa (mayo–noviembre) se caracteriza por dos patrones isotópicos notables en forma de V o W en la precipitación. Estos patrones son consistentes con la variabilidad intra-estacional de las precipitaciones, que típicamente da lugar a dos o tres excursiones isotópicamente empobrecidas durante la temporada de lluvias y dos pulsos enriquecidos durante la canícula, así como durante los meses de vientos alisios más intensos (enero–febrero). Por ejemplo, a mediados de mayo, cuando la Zona de Convergencia Intertropical se desplaza hacia la región y se acentúan las ondas tropicales del este, suele observarse una primera fuerte disminución en la composición isotópica. Se presenta un leve enriquecimiento durante la transición hacia la canícula. Más adelante, en septiembre y octubre, la composición isotópica muestra una segunda disminución significativa, a menudo acompañada por la influencia indirecta de ciclones tropicales. A medida que la Zona de Convergencia Intertropical migra hacia el sur a mediados de noviembre, se observa un segundo enriquecimiento hacia mediados de diciembre.

Estos patrones se amplifican en la vertiente del Pacífico de la región, mientras que en el dominio caribeño (es decir, las costas yuxtapuestas y las islas del mar Caribe interior) la composición isotópica es menos variable a lo largo del año. En general, la principal fuente de humedad en la región es el Mar Caribe (62%), con menor influencia del Golfo de México (10%). El Océano Pacífico también aporta humedad especialmente durante algunos eventos de la época lluviosa o durante el efecto indirecto de ciclones tropicales que arrastran humedad del Pacífico hacia el istmo (Figura 4B) (~28%). Los eventos que se registran durante la época seca corresponden al transporte de humedad por parte de los vientos alisios y frentes fríos (80%), mientras que un 20% corresponde a 'vaguadas' provenientes del Pacífico, cuando la intensidad de los vientos alisios disminuye. Patrones similares han sido ampliamente reportados en la región (ver Sánchez-Murillo et al., 2019; Sánchez-Murillo et al., 2020 a).

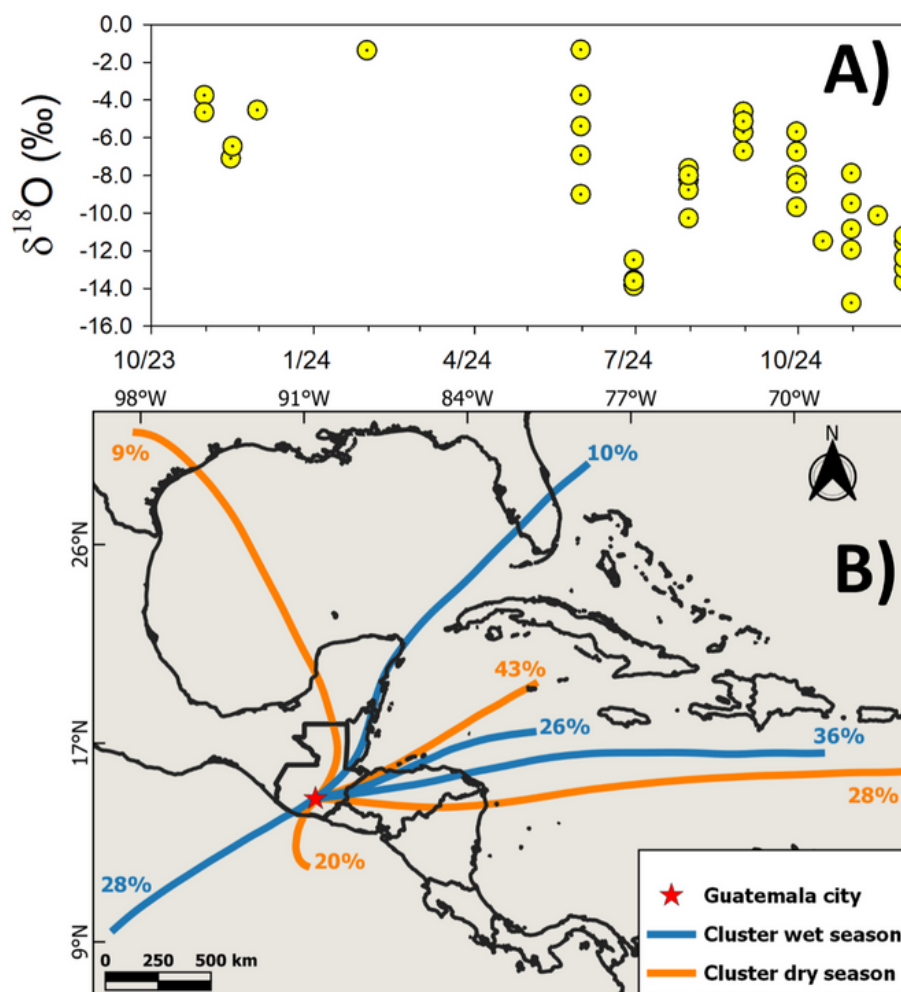


Figura 4: A) Variación temporal (2023-2024) en la composición de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) en la región metropolitana de Guatemala. B) Agrupamiento espacial del origen de las masas de aire durante la época seca (anaranjado) y lluviosa (azul) para la Ciudad de Guatemala.

4.2. Variación espacial de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) y d-ex (‰)

La Figura 5 muestra la variación espacial de $\delta^{18}\text{O}$ (‰), d-ex (‰) en el área de estudio. En general, valores más negativos (empobrecidos) de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) fueron reportados hacia la región noroeste, coincidiendo con zonas de mayor altitud. Los valores más positivos (enriquecidos) fueron reportados en zonas de menor elevación tanto hacia el norte, noreste y sur del área de estudio. Al norte del Lago Amatitlán, se reportaron valores empobrecidos a baja elevación, lo cual sugiere potencial recarga a mayor elevación y existencia de flujos subterráneos más regionales (Figura 5A). En cuanto al d-ex, los valores más altos se reportaron principalmente en las zonas de mayor elevación, tanto hacia el noroeste y sureste. En algunos sitios de muestreo de baja elevación también se encontraron valores altos de d-ex. Estos valores indican alto reciclaje de humedad, posiblemente afectados por el transporte de humedad del Caribe, condensación orográfica y alto aporte de evapotranspiración (Figura 5B). Los valores más bajos de d-ex, en zonas de baja elevación y metropolitana, sugieren la influencia de procesos secundarios de evaporación en la zona no saturada o flujos de retorno enriquecidos.

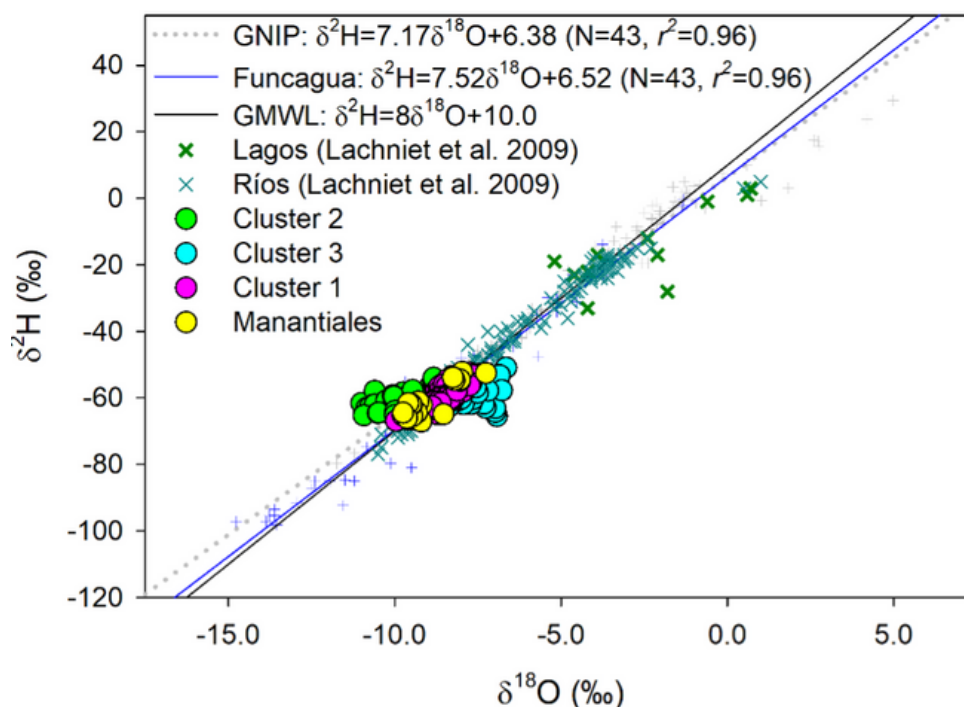


Figura 5: Diagrama dual entre $\delta^{2}\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ mostrando las líneas meteóricas globales (GMWL) y locales (GNIP y Funcagua), muestras de pozos agrupadas en clusters, manantiales, y datos históricos para ríos (magenta) y lagos (verde oscuro) en Guatemala (Lachniet et al., 2009), como referencia.

4.3. Gradiente isotópico de elevación

La Figura 6 muestra el gradiente isotópico de elevación (línea negra discontinua) construido con base en la composición media de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) en las estaciones GNIP (transecto Pacífico, rosado) y Funcagua (zona metropolitana, amarillo). La pendiente del gradiente isotópico de elevación corresponde con -2.5‰ en $\delta^{18}\text{O}$ por km de elevación, el cual es congruente con el gradiente centroamericano (-2.3‰ en $\delta^{18}\text{O}$ por km de elevación) reportado por Sánchez-Murillo et al. (2020 a).

En general, la relación δ -altitud (elevación) está influenciada principalmente por el gradiente vertical de temperatura (tasa adiabática; dT/dz) y la humedad relativa inicial (h) de las masas de aire ascendentes (Gonfiantini et al., 2001). Una vez que una parcela de aire alcanza la saturación, y considerando la simplificación de una atmósfera adiabática, la variación isotópica se convierte en una función de la tasa adiabática y de la humedad relativa. Si una parte del condensado permanece en la nube o si ocurre reciclaje de humedad dentro del sistema precipitante, la relación δ -altitud se debilita como resultado del intercambio de calor necesario para completar la transición de fase. Esto es evidente en el amplio espectro δ -altitud observado en regiones montañosas complejas dentro de los trópicos, particularmente en cordilleras de gran altitud ($>3,500$ m.s.n.m.). También se ha documentado que el efecto de sombra orográfica puede anular la variación isotópica en las laderas de sotavento (Gonfiantini et al., 2001).

A nivel estacional, la relación δ -altitud tiende a ser más fuerte durante las precipitaciones de la temporada lluviosa en comparación con los eventos de la temporada seca, ya que el tipo de precipitación puede ejercer un control adicional sobre la variabilidad isotópica. Cuando se analiza a partir de transectos individuales, las tasas de gradiente isotópico en los trópicos son más débiles ($-1.87 \pm 0.65\text{‰ km}^{-1}$) que el promedio global de -2.80‰ km^{-1} (Poage y Chamberlain, 2001) y el promedio pantropical de -2.20‰ km^{-1} ($N = 348$ estaciones; R^2 ajustado = 0.48; $p < 0.001$) (Sánchez-Murillo et al., 2020 b). Se han reportado relaciones δ -altitud más marcadas por encima de los 3,500 m.s.n.m. De manera similar, el d -ex tiende a aumentar con la altitud ($h > 80\%$), variando desde aproximadamente $+10\text{‰}$ (0–1,000 m.s.n.m.) hasta más de 15‰ en zonas de barlovento con alto relieve, mientras que valores de d -ex $< 10\text{‰}$ se reportan con frecuencia en regiones de sotavento, debido a una fuerte evaporación por debajo de la nube. Este efecto se amplifica en áreas con topografía accidentada.

Por ejemplo, en Costa Rica, el gradiente isotópico (barlovento) es comúnmente más pronunciada en la vertiente caribeña, con -1.90% en $\delta^{18}\text{O}$ por km de relieve orográfico (R^2 ajustado = 0.77; $p < 0.001$), mientras que la vertiente pacífica (sotavento) presenta una tasa de solo -1.10% en $\delta^{18}\text{O}$ por km (R^2 ajustado = 0.59; $p < 0.001$). El efecto de empobrecimiento isotópico más fuerte observado en el Caribe se relaciona con la influencia directa de los vientos alisios (dirección predominante NE) y el transporte cercano de humedad desde la cuenca semicerrada del mar Caribe, mientras que en la vertiente pacífica, la combinación de i) el efecto de sombra orográfica (sotavento), ii) una topografía más compleja y la humedad reciclada de la evapotranspiración (ET), y iii) la actividad convectiva profunda estacional (entre agosto y octubre, por tormentas originadas en el Pacífico) da como resultado un gradiente altitudinal más débil y variable.

En Centroamérica, las tasas de gradiente en el Pacífico suelen ser menores a $-1.90\% \text{ km}^{-1}$, mientras que en los dominios del Caribe y Golfo de México las tasas de barlovento pueden alcanzar hasta $-2.40\% \text{ km}^{-1}$. Factores similares que afectan las tasas de gradiente isotópico entre barlovento y sotavento han sido reconocidos en otras regiones tropicales (Gonfiantini et al., 2001). La gran sensibilidad de los gradientes $d\delta/dz$ a características locales de circulación, junto con el fuerte sesgo estacional e interanual, subraya la necesidad de contar con estaciones robustas y de largo plazo (>4 años; Putman et al., 2019), especialmente cuando se utilizan las tasas δ -altitud para derivar información crítica para la gestión del agua, como las elevaciones potenciales de recarga, ya sea mediante análisis de regresión simple o métodos bayesianos (Yamanaka y Yamada, 2017; Sánchez-Murillo et al., 2020 a).

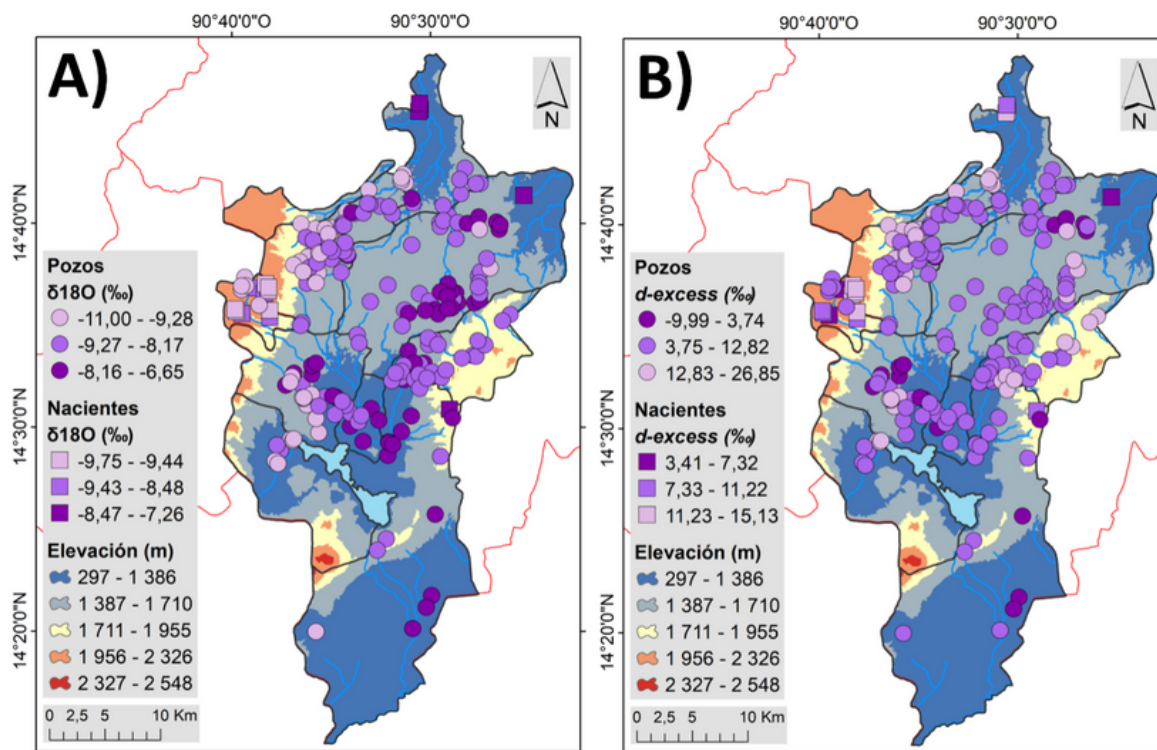


Figura 6: Variación espacial de la composición de A) $\delta^{18}\text{O}$ (‰) y B) d-ex (‰) en pozos y manantiales de la región metropolitana de Guatemala.

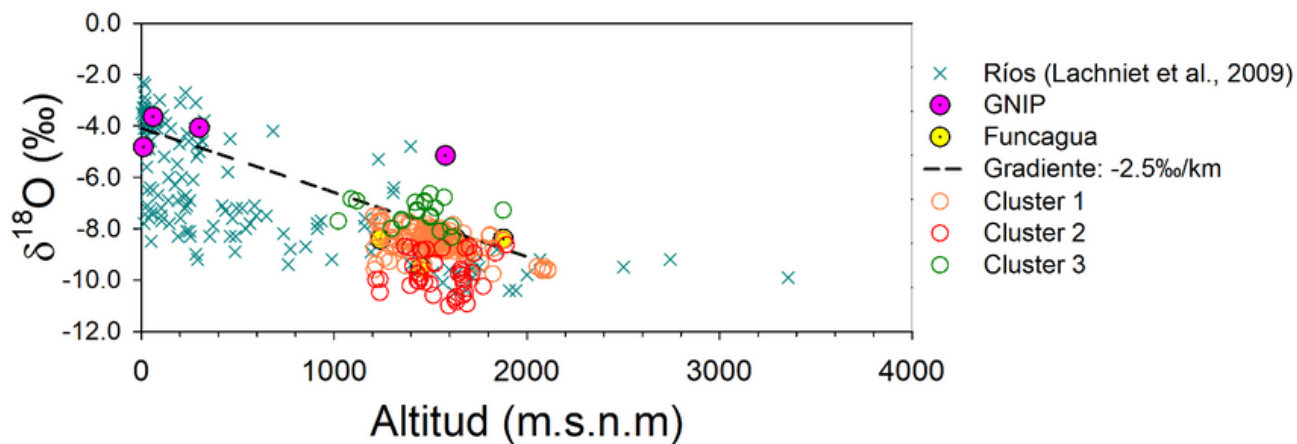


Figura 7: Gradiente isotópico de elevación (línea negra discontinua) construido con base en la composición media de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) en las estaciones GNIP (tránsito Pacífico, rosado) y Funcagua (zona metropolitana, amarillo). Se incluyen como referencia los tres diferentes 'clusters' y la información histórica en aguas superficiales (Lachniet et al., 2009). La pendiente del gradiente isotópico de elevación corresponde con -2.5 ‰ en $\delta^{18}\text{O}$ por km de elevación.

4.4. Elevaciones potenciales de recarga, procesos de recarga y conectividad hidrogeológica

Las elevaciones potenciales de recarga en la región metropolitana de Guatemala variaron entre 1,099 m.s.n.m. y 2,326 m.s.n.m., con un promedio de $1,797 \pm 260$ m.s.n.m. (Figura 7A). La determinación fue efectiva para un 76% y 57% de pozos y manantiales, respectivamente. En los casos restantes, la elevación potencial es menor al punto de muestreo o indica una elevación mayor a la cota máxima en la cuenca respectiva. Estos casos, donde el método no logra converger con resultados físicamente correctos se deben a dos situaciones principales: a) el gradiente isotópico de elevación no cubre el rango altitudinal completo (falta de estaciones a mayor elevación) y b) la muestra no es representativa de la composición promedio anual del reservorio.

En zonas como el municipio de San Lucas, las elevaciones de recarga concuerdan con la topografía local, indicando un fuerte componente de recarga local reciente (1,996–2,326 m.s.n.m.). En la zona central del área de estudio, las elevaciones oscilaron entre 1,387 y 1,995 m.s.n.m., indicando un componente local de recarga urbana (1,387 y 1,710 m.s.n.m.) y recarga desde zonas de mayor altura tanto hacia el noroeste y sureste. Al noroeste del Lago Amatitlán, existe evidencia de recarga a mayor altura y a mayor distancia, sugiriendo flujos subterráneos potencialmente regionales. La recarga ocurre en zonas urbanas, forestales/pastos y agrícolas, principalmente abarcando formaciones del Cuaternario y Terciario (Figuras 7B y 7C).

Las diferencias de elevación entre el punto de extracción (pozo o manantial) y la zona de recarga variaron entre 2 y 994 m.s.n.m., con un promedio de 278 ± 205 m.s.n.m. (Figuras 8A y 8B). En el '*cluster 1*' el cociente promedio GW/P [-] fue cercano a ~1, indicando alta conectividad hidrológica entre la precipitación y la recarga. Las mayores diferencias se registraron en el '*cluster 2*', con un valor promedio de GW/P [-] cercano a 1.2, sugiriendo recarga de mayor altura. El '*cluster 3*' presentó el menor valor promedio de GW/P [-], oscilando entre 0.8–0.9 unidades y menor variabilidad en la diferencia entre la elevación de recarga y extracción o uso (Figuras 8A y 8B). La evidencia isotópica sugiere: i) recarga local-urbana sin alteración isotópica (33.0%), ii) recarga a mayor altura (24.3%) que la elevación de extracción (uso) y iii) un componente local alterado isotópicamente (42.7%) (aguas residuales, riego, cuerpos de agua superficial).

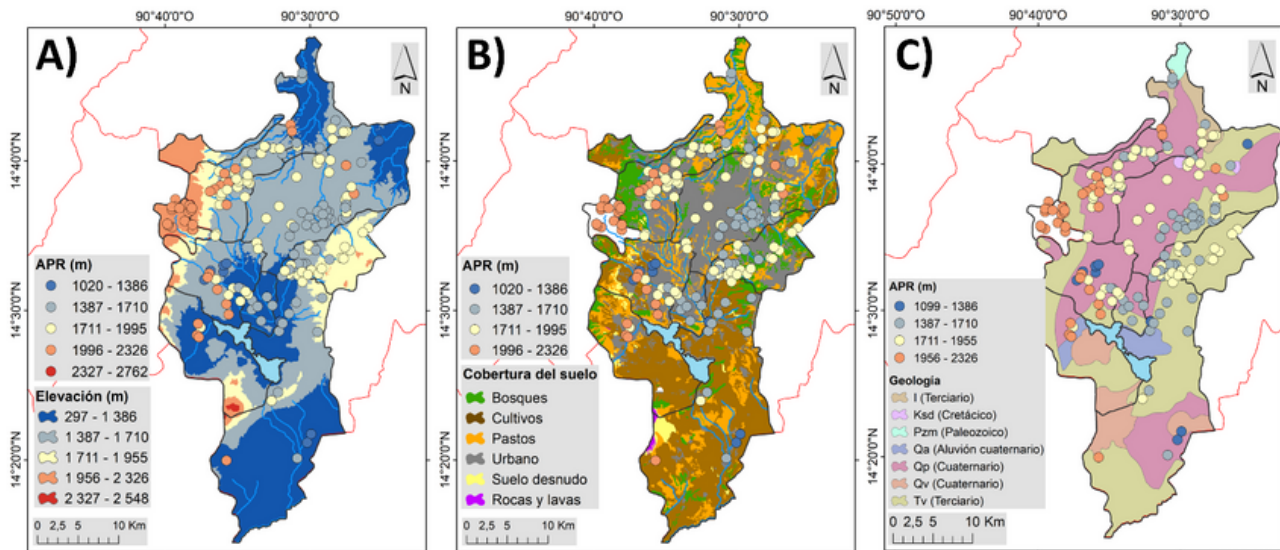


Figura 8: Asociación de las elevaciones potenciales de recarga versus A) gradiente topográfico de elevación, B) principales usos del suelo y C) principales tipos de roca.

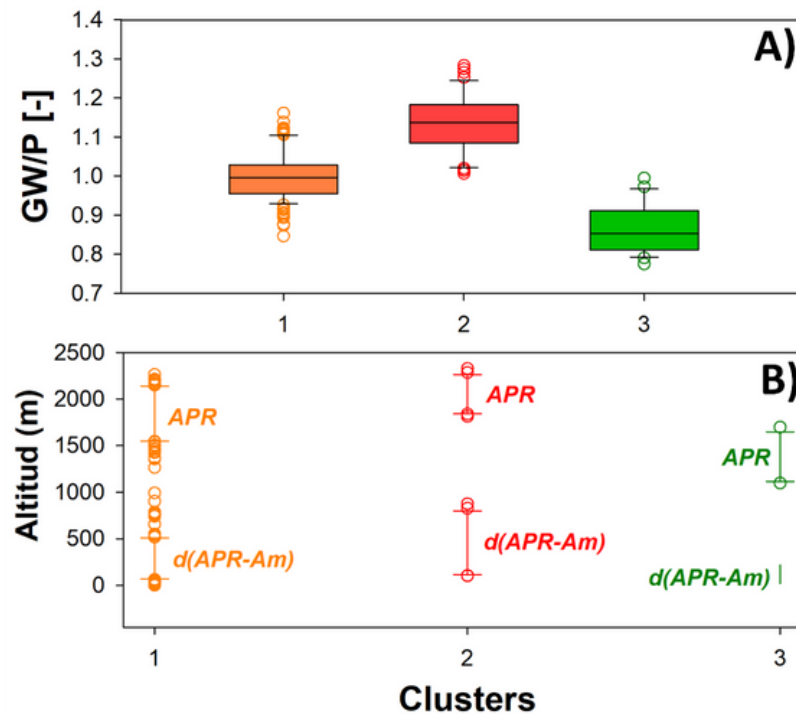


Figura 9: A) Cociente isotópico entre la composición del agua subterránea (GW) y la precipitación (P), $GW/P [-]$ por 'cluster'. B) Variabilidad entre las elevaciones o altitud potencial de recarga (APR) y la diferencia (d) entre APR y la elevación del uso o extracción (Am).

5. Conclusiones, limitaciones y recomendaciones

Los siguientes puntos subrayan las principales conclusiones del estudio junto a las limitaciones encontradas y recomendaciones para acciones futuras.

- Composiciones isotópicas muestran concordancia con el espectro regional reportado en estudios previos en la región centroamericana.
- Basado en el exceso de deuterio (d-ex) se identificaron tres grupos o 'clusters' reflejando: 1) condiciones meteóricas, 2) de alto reciclaje de humedad y 3) condiciones de enriquecimiento por evapoconcentración.
- El método para la determinación de elevaciones potenciales de recarga fue efectivo en un 76% y 56% de los pozos y manantiales muestreados, respectivamente.
- Las elevaciones potenciales de recarga tienen un rango entre ~1,100–2,350 m.
- La evidencia isotópica sugiere: i) recarga local-urbana sin alteración isotópica (33.0%), ii) recarga a mayor altura (24.3%) que la elevación de extracción (uso) y iii) un componente local alterado isotópicamente (42.7%) (por ejemplo, aguas residuales tratadas y no tratadas, riego, influencia de recarga desde cuerpos de agua superficial o barrancos).
- Las elevaciones de recarga abarcan uso del suelo urbano, forestal y, en menor medida, agrícola.
- Es necesario la instalación de colectores pasivos de lluvia en zonas de mayor elevación, que contemplen las cotas máximas de las cuencas en estudio.
- Los datos provenientes de la red GNIP contemplan (2018–2021), mientras que el monitoreo reciente de lluvia abarcó el final del 2023 y el 2024. Por ende, es necesario contar con líneas meteóricas más robustas, superiores a 4 años de monitoreo.
- Es posible que existiese mezcla entre la época seca (caudal base) y la época lluviosa en el muestreo de pozos y manantiales. Lo ideal es realizar este tipo de muestreos únicamente durante la época de estiaje o caudal base.

- Existen vacíos de información sobre las condiciones de muestreo en manantiales y, particularmente en pozos (por ejemplo, profundidad de rejillas, condiciones de nivel estático y dinámico, condiciones del estado de los pozos).
- Es necesario mejorar la resolución del gradiente isotópico con elevación mediante monitoreo de lluvia en distintas elevaciones.
- Para mejorar la cobertura espacial de las composiciones isotópicas se recomienda llevar a cabo muestreos o 'snapshots' comunitarios en agua potable como aproximación del valor isotópico subterráneo.
- Además, es necesario generar series de tiempo de la variabilidad isotópica en lluvia, pozos, lagos, ríos y nacientes.

6. Referencias

- Arellano, L. N., Beverly, E. J., Selker, J. S., Nelke, M., Singh, G., & Walter, C. (2024). Testing triple oxygen isotope preservation in the new OPEnS totalizer against conventional monthly rainfall collectors. *Chemical Geology*, 668, 122351.
- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16(4), 436-468.
- Draxler, R.R., and G.D. Hess, 1997: Description of the HYSPLIT_4 modeling system. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-224, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 24 pp.
- Draxler, R.R., and G.D. Hess, 1998: An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition. *Aust. Meteor. Mag.*, 47, 295-308.
- García-Santos, S., Sánchez-Murillo, R., Peña-Paz, T., Chirinos-Escobar, M. J., Hernández-Ortiz, J. O., Mejía-Escobar, E. J., & Ortega, L. (2022). Water stable isotopes reveal a complex rainfall to groundwater connectivity in central Honduras. *Science of The Total Environment*, 844, 156941.
- Gonfiantini, R., Roche, M. A., Olivry, J. C., Fontes, J. C., and Zuppi, G. M. (2001). The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains. *Chem. Geol.* 181 (1-4):147-167.
- Jasechko, S., & Taylor, R. G. (2015). Intensive rainfall recharges tropical groundwaters. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124015.

- Kassambara, A., & Mundt, F. (2020). factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R package version 1.0.7, <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>.
- Lachniet, M. S., & Patterson, W. P. (2009). Oxygen isotope values of precipitation and surface waters in northern Central America (Belize and Guatemala) are dominated by temperature and amount effects. *Earth and Planetary Science Letters*, 284(3–4), 435–446.
- MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*/University of California Press.
- Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M., & Hornik, K. (2023). cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions. R package version 2.1.4, <https://CRAN.R-project.org/package=cluster> of tap water sources using the isoscape approach. *Mt. Res. Dev.* 37 (2), 198–205.
- Poage, M. A., and Chamberlain, C. P. (2001). Empirical relationships between elevation and the stable isotope composition of precipitation and surface waters: considerations for studies of paleo-elevation change. *Am. J. Sci.*, 301 (1), 1–15.
- Putman, A. L., Fiorella, R. P., Bowen, G. J., and Cai, Z. (2019). A global perspective on local meteoric water lines: meta-analytic insight into fundamental controls and practical constraints. *Water Resour. Res.* 55 (8), 6896–6910.
- Sánchez-Murillo, R., and C. Birkel (2016), Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous region, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 5060–5069
- Sánchez-Murillo, R., Durán-Quesada, A.M., Esquivel-Hernández, G. et al. Deciphering key processes controlling rainfall isotopic variability during extreme tropical cyclones. *Nat Commun* 10, 4321 (2019).
- Sánchez-Murillo, R., Esquivel-Hernández, G., Birkel, C., Correa, A., Welsh, K., Durán-Quesada, A. M., ... & Poca, M. (2020b). Tracing water sources and fluxes in a dynamic tropical environment: From observations to modeling. *Frontiers in Earth Science*, 8, 571477.
- Sánchez-Murillo, R., Esquivel-Hernández, G., Corrales-Salazar, J. L., Castro-Chacón, L., Durán-Quesada, A. M., Guerrero-Hernández, M., ... & Terzer-Wassmuth, S. (2020a). Tracer hydrology of the data-scarce and heterogeneous Central American Isthmus. *Hydrological Processes*, 34(11), 2660–2675.
- Stein, A.F., Draxler, R.R, Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., and Ngan, F., (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 2059–2077.
- Yamanaka, T., and Yamada, Y. (2017). Regional assessment of recharge elevation



GREMIA
Gremial de Empresas para el Manejo Integral del Agua



Identificación de las elevaciones potenciales de recarga mediante el uso de isótopos estables en la Región Metropolitana de Guatemala