

Identificación de zonas potenciales de recarga de agua subterránea en el acuífero Siguatepeque, Honduras, mediante evaluación multicriterio

Identification of potential recharge zones of groundwater in the Siguatepeque aquifer, Honduras, by means of multicriteria evaluation

Nelson Geovanny Mejía Pineda^{1,*}, Mario Murillo Álvarez²

¹ Universidad Nacional de Ciencias Forestales (UNACIFOR), Escuela de Ambiente y Desarrollo, Colonia Las Américas, Siguatepeque, Honduras, C.P. 12111.

² GeoTec, Barrio Arriba, Siguatepeque, Honduras, C.P. 12111.

* Autor para correspondencia:
(N.G. Mejía Pineda) n.mejia@unacifor.edu.hn

Cómo citar este artículo:

Mejía Pineda, N.G., Murillo Álvarez, M., 2025, Identificación de zonas potenciales de recarga de agua subterránea en el acuífero Siguatepeque, Honduras, mediante evaluación multicriterio: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 77(1), A260624. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2025v77n1a260624>

Manuscrito recibido: 26 de Abril, 2024
Manuscrito corregido: 12 de Junio, 2024
Manuscrito aceptado: 26 de Junio, 2024

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

En la gestión de las aguas subterráneas es necesario disponer de información del entorno hidrogeológico para guiar la toma de decisiones. La identificación de las zonas potenciales de recarga es una tarea crucial, especialmente en ciudades como Siguatepeque en donde el agua subterránea es actualmente la fuente más importante de abastecimiento para la población. En el presente estudio se determinan las zonas potenciales de recarga de agua subterránea (ZPRAS) del acuífero de Siguatepeque mediante un análisis multicriterio basado en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), además, se empleó técnicas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se utilizaron seis criterios: geología, densidad de lineamientos, pendiente, densidad de drenaje, tipo de suelo y uso del suelo. Mediante el AHP se asignaron ponderaciones a cada criterio y se definen diferentes clases de acuerdo con su grado de influencia relativa sobre el potencial de recarga. El estudio revela que el 28% del área total presenta un potencial de recarga alto, 40% medio y el 32% bajo. La validación en campo muestra que el 83% de los pozos perennes se encontraron en las zonas identificadas con un potencial de recarga alto. La validación de las zonas con un potencial de recarga bajo no fue posible debido a la falta de pozos de observación en estas áreas. Finalmente, se presenta una zonificación especial de las áreas con un potencial de recarga alto para facilitar la interpretación y la toma de decisiones en cuanto al diseño e implementación de estrategias para la conservación de las aguas subterráneas y el manejo sostenible del acuífero de Siguatepeque.

Palabras clave: zonas potenciales de recarga, Proceso Jerárquico Analítico, hidrogeología, países en vías de desarrollo, Sistemas de Información Geográfica.

ABSTRACT

To manage groundwater effectively, it is necessary to have information about the hydrogeological environment that can guide the decision-making process. The identification of potential recharge zones is a crucial task, especially in cities like Siguatepeque where groundwater is currently the most important source of water supply for the population. In the present study, the potential groundwater recharge zones (PGWRZ) of the Siguatepeque aquifer are determined through a multicriteria analysis based on the Analytical Hierarchical Process (AHP). In addition, remote sensing techniques and Geographic Information Systems (GIS) were used. Six criteria were established: geology, lineament density, slope, drainage density, soil type, and land use. Through an AHP, weights were assigned to each criterion, and different classes were defined according to their relative influence on the recharge potential. The study revealed that 28% of the total area has a good recharge potential, 40% medium and 32% low. Field validation shows that 83% of the monitored perennial wells were found in areas identified with a good recharge potential. Validation of low recharge potential zones was not possible due to the lack of observation wells in these areas. Finally, a special zoning of areas with a high recharge potential is presented to facilitate interpretation and decision-making regarding the design and implementation of strategies for the conservation of groundwater and the sustainable management of the Siguatepeque aquifer.

Keywords: potential recharge zones, Analytical Hierarchical Process, hydrogeology, developing countries, Geographic Information Systems.

1. Introducción

El agua subterránea representa el principal suministro de agua dulce líquida de la Tierra (Naciones Unidas, 2022). En América Latina, la distribución, accesibilidad y calidad de este recurso varía enormemente según cada país, los cuales enfrentan problemas y desafíos de diferente índole (Vargas *et al.*, 2020). En Centroamérica el agua subterránea satisface la mayor parte de las necesidades de agua para consumo humano, industrial y de riego, representando aproximadamente entre el 80% y el 90% del suministro total, en comparación con la mayoría de las otras regiones del mundo en donde el agua subterránea representa del 30% al 50% del suministro total (Bethune y Ryan, 2010). La importancia de las aguas subterráneas radica en la disponibilidad de agua a largo plazo, calidad natural para el consumo humano y un servicio a bajo costo que favorece a regiones con limitaciones en sus sistemas de abastecimiento, por lo que se vuelve esencial monitorear y preservar estos recursos (Tiwari y Kushwaha, 2020).

En Honduras, el uso del agua subterránea fluctúa entre un 60% y 80% para uso doméstico, industrial y agrícola (UNAH, 2015), y su alta demanda, especialmente en las zonas urbanas, amenaza la futura disponibilidad de este recurso (Vargas *et al.*, 2020). La gestión sostenible de las aguas subterráneas se basa en información hidrogeológica que suele ser inexistente, obsoleta o incompleta en países como Honduras. Tal es el caso del acuífero de Siguatepeque donde no se implementan estrategias de manejo adecuadas, poniendo en riesgo la sostenibilidad del acuífero, que actualmente es la fuente más importante para el abastecimiento de agua. El agua subterránea representa en promedio el 50.5% del suministro total y en época seca más del 70% (Mejía *et al.*, 2023).

En Siguatepeque se contabilizan un total de 506 pozos con fines de suministro de agua para el consumo humano, industrial y comercial, los cuales extraen aproximadamente 4.5 millones de m³/año (Mejía *et al.*, 2023). Esto representa

aproximadamente el 42% de la recarga promedio estimada de 10.7 millones de m³/año. En el área urbana, se encuentra casi el 80% de los pozos y la extracción supera la recarga en aproximadamente 93%, se ha comprobado un descenso de los niveles de agua subterránea, lo que podría indicar que la zona urbana esté sufriendo una sobreexplotación (Mejía *et al.*, 2023).

Según Gaur *et al.* (2011) la recarga inadecuada de los acuíferos es una de las principales causas de la reducción del agua subterránea en diferentes partes del mundo. La recarga ocurre cuando el agua fluye más allá del nivel freático y se infiltra en la zona saturada (Yeh *et al.*, 2016). Varios factores afectan el movimiento de las aguas subterráneas, como la litología, la pendiente, el patrón de drenaje, la forma del relieve, el uso/cobertura del suelo y el clima (Gaur *et al.*, 2011; Jaiswal *et al.*, 2003; Thapa *et al.*, 2017); así mismo influyen la textura del suelo (Lara-Vásquez *et al.*, 2021; Palacio y Betancur, 2007), la densidad de drenaje y la densidad de lineamientos (Roy *et al.*, 2020; Shahid *et al.*, 2000). En consecuencia, es necesario considerar todos los factores anteriores para comprender el potencial de recarga de agua subterránea de un área (Singh *et al.*, 2019).

La identificación de las zonas de recarga es importante para utilizar y salvaguardar adecuadamente los recursos de agua subterránea (Anbarasu *et al.*, 2020; Jaiswal *et al.*, 2003). De hecho, Singh *et al.* (2019) sostienen que la recarga de aguas subterráneas es un requisito previo para la gestión sostenible de las aguas subterráneas; no obstante, según Hamdi *et al.* (2020), este tema puede representar una gran incógnita para los responsables de la toma de decisiones, tal es el caso del acuífero de Siguatepeque. Las zonas potenciales de recarga de agua subterránea se determinan con el objetivo de aumentar el agua subterránea en el área, incluso también para ubicar infraestructuras para la recolección e infiltración de agua lluvia (Gaur *et al.*, 2011). En este contexto el objetivo del estudio fue identificar las zonas potenciales de recarga de agua subterránea (ZPRAS) del acuífero de Siguatepeque mediante el Proceso Jerárquico

Analítico basado en Sistemas de Información Geográfica.

El estudio representa un hito para el conocimiento hidrogeológico en Honduras, y proporciona insumos que pueden ser utilizados para la planificación e implementación de estrategias de ordenamiento territorial y regulaciones locales, así como para orientar futuros estudios e inversiones.

2. Descripción del área de estudio

El área de estudio se ubica en el municipio de Siguatepeque en el Departamento de Comayagua, Honduras (Figura 1). Siguatepeque tiene una extensión de 397.8 km² y una población de 115,000 habitantes (UNAH, 2022).

El área de estudio específica se circunscribe a lo que conceptualmente se definió como el acuífero de Siguatepeque por Mejía *et al.* (2023). Su geología está dominada principalmente por el Grupo Padre Miguel, una secuencia volcánica silícica que forma parte del arco volcánico del Mioceno Centroamericano (Garza *et al.*, 2012). Está formado por un conjunto heterogéneo de materiales volcánicos, entre ellos piroclastos, capas inferiores de ignimbrita y tobas (Trochez, 2000). Contiene fracturas que pueden mejorar la permeabilidad (Heiken *et al.*, 1991). Este grupo también está formado por andesitas y riolitas, con diferentes intrusiones basálticas y piroclásticas (Geólogos del Mundo, 2014).

El acuífero de tipo volcánico fracturado cuenta con un área de 228 km². Este tiene un espesor

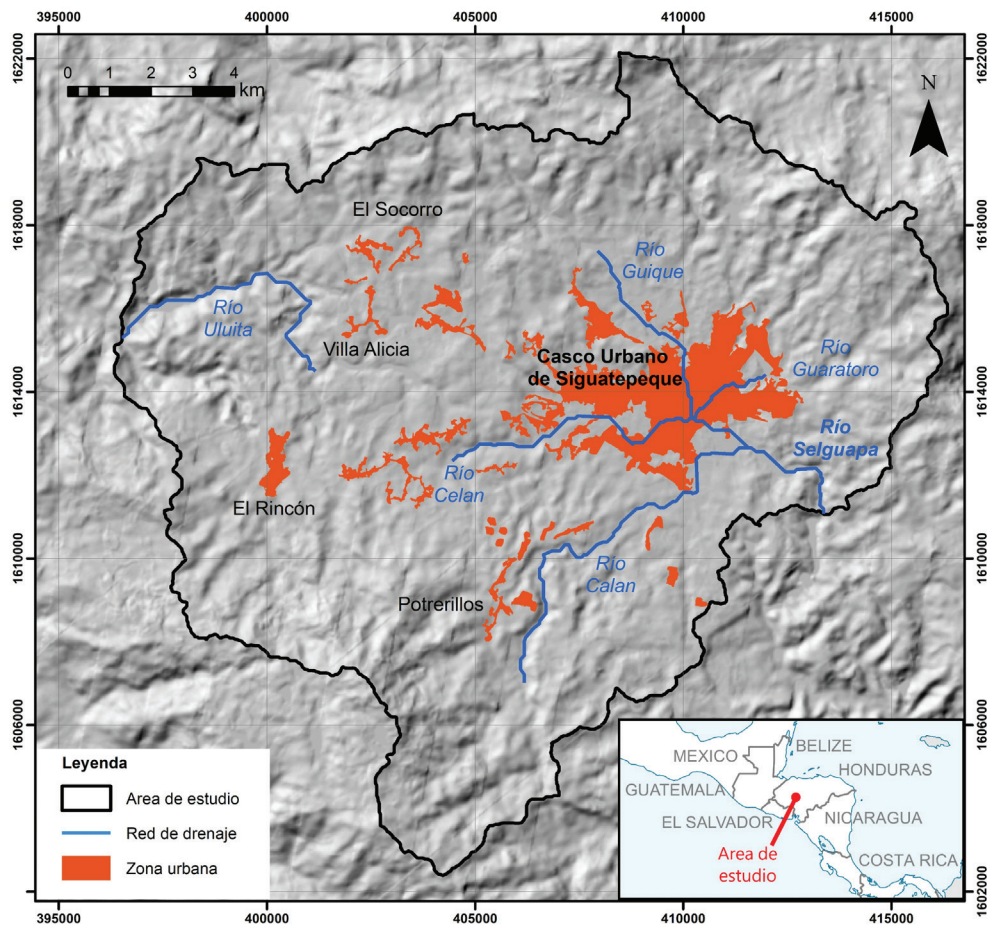


Figura 1 Ubicación geográfica del acuífero de Siguatepeque, Honduras.

aproximado de entre 360 y 400 m, posee valores de transmisividad (T) que oscilan entre 3 y 78 m²/día, con un potencial de suministro de agua de intermedio a bajo según la clasificación de transmisividad de Krasny. Los valores de conductividad hidráulica (K) oscilan entre 10⁻⁷ y 10⁻⁶ m/s, indicando una capacidad media a baja del agua para atravesar el suelo o la roca. Los valores del coeficiente de almacenamiento (S) oscilan entre 10⁻² y 10⁻³. Al observar integralmente los valores de T, K y S, el acuífero puede clasificarse como semiconfinado (Geólogos del Mundo, 2010; Mejía *et al.*, 2023; Trochez, 2000).

El área de estudio posee un clima subtropical con una temperatura promedio de 21 °C y una precipitación promedio anual de 1006 mm. Las elevaciones van desde los 2150 msnm en la cordillera de Montecillos en el sur, hasta los 900 msnm en el oeste. El acuífero drena principalmente a la red hidrológica formada por el río Selguapa hacia el este; en menor medida hacia el río Uluita al oeste (Mejía *et al.*, 2023). En cuanto a su explotación, se contabilizan un total de 506 pozos que

extraen agua subterránea para diferentes propósitos domésticos, industriales y comerciales (Mejía *et al.*, 2023).

3. Materiales y métodos

Las ZPRAS fueron definidas a partir del análisis de seis criterios: geología, densidad de lineamientos, pendiente, densidad de drenaje, tipo de suelo y uso del suelo. Para cada criterio se elaboraron diferentes capas temáticas. En el caso de la geología, tipo de suelo y uso del suelo 2018, se elaboraron a partir de bases de datos oficiales del Instituto Geográfico Nacional de Honduras (IGN), Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT; alojado en la Plataforma Agua de Honduras) y el Instituto de Conservación Forestal (ICF) respectivamente. Las capas de densidad de lineamientos, pendiente y densidad de drenaje se elaboraron a partir de un modelo de elevación digital con resolución de 30x30 m obtenido del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2015). La

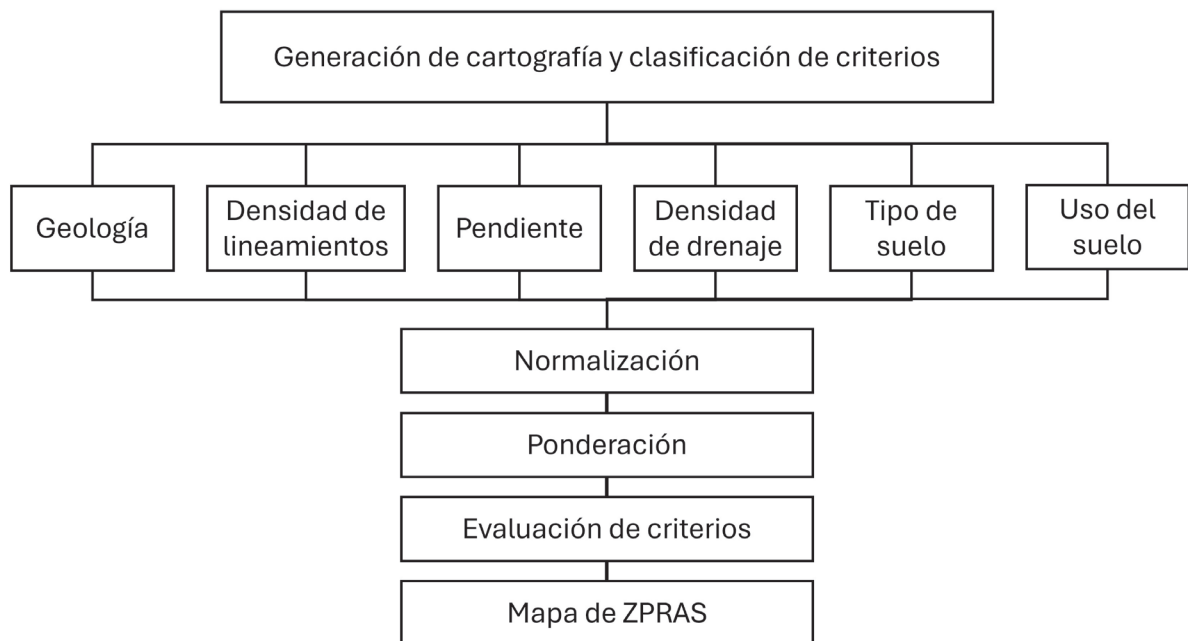


Figura 2 Esquema metodológico.

Figura 2 presenta los pasos metodológicos que se han desarrollado para el cumplimiento del objetivo de la presente investigación.

3.1. GENERACIÓN DE CARTOGRAFÍA Y CLASIFICACIÓN DE CRITERIOS

3.1.1. GEOLOGÍA

La geología juega un papel significativo en el potencial de recarga de agua subterránea (Anbarasu *et al.*, 2020; Lara-Vásquez *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2020). Con el uso del software ArcMap 10.0 se actualizó y digitalizó el mapa geológico de Siguatepeque 1973, elaborado por el Instituto Geográfico Nacional de Honduras (IGN) en colaboración con el Cuerpo de Paz de los Estados Unidos y el Estudio Geodésico Interamericano (IAGS). Cada unidad geológica identificada fue clasificada de acuerdo con su permeabilidad y condicionamiento del proceso de recarga.

3.1.2. DENSIDAD DE LINEAMIENTOS

De la presencia de lineamientos (contactos, fallas, fracturas, entre otros) se inducen importantes características sobre la superficie que son responsables de la infiltración de la escorrentía superficial hacia el subsuelo, además, del movimiento y almacenamiento del agua subterránea (Anbarasu *et al.*, 2020; Devi *et al.*, 2001; Rao *et al.*, 2001; Roy *et al.*, 2020). Los lineamientos se definieron y delimitaron a partir de las fallas identificadas en el mapa geológico de Siguatepeque (IGN, 1973). El análisis se complementó con la herramienta de análisis espacial sombreado de laderas del software ArcMap 10.0 identificando y trazando características lineales formadas naturalmente en el terreno sobre un modelo de elevación digital (resolución 30 x 30 m) y finalmente generando la capa de densidad de lineamientos (km/km²).

3.1.3. PENDIENTE

Por lo general, zonas planas y con pendiente suave promueven una menor velocidad de los flujos de agua y presentan condiciones más favorables

para la infiltración y por ende un alto potencial de recarga de agua subterránea; por el contrario, los terrenos con pendientes pronunciadas promueven una mayor velocidad y poca o ninguna infiltración (Abdalla *et al.*, 2020; Anbarasu *et al.*, 2020; Kadam *et al.*, 2020; Zhu y Abdelkareem, 2021).

Se utilizaron los rangos de pendiente propuestos por Schosinsky y Losilla (2000) y utilizados en Mejía *et al.* (2023) para determinar la capacidad de infiltración del suelo. Pendientes menores a 1° representan un alto potencial de recarga, ya que se asocian a una capacidad de infiltración alta y una escorrentía superficial baja; por el contrario, pendientes mayores a 4° se asocian a un menor potencial de recarga. La capa de pendientes se creó a partir del modelo de elevación digital utilizando la herramienta de análisis espacial en el software ArcMap.

3.1.4. DENSIDAD DE DRENAJE

La densidad de drenaje refleja la proximidad del espaciamiento de los canales naturales de drenaje en el terreno, así como las características de la superficie (Manap *et al.*, 2013). Las observaciones de diversas zonas geológicas y climáticas indican que las regiones planas suelen ser propias de una baja densidad de drenaje, mientras que relieves montañosos se caracterizan por una alta densidad de drenaje (Waikar y Nilawar, 2014). Una densidad de drenaje alta produce una alta escorrentía y por ende una baja capacidad de infiltración, en comparación a una densidad de drenaje baja que aumenta la capacidad de infiltración del suelo y por consiguiente mejora el potencial de recarga (Murasingh, 2014; Prasad *et al.*, 2008). La densidad de drenaje tiene un efecto inverso sobre la permeabilidad (Anbarasu *et al.*, 2020; Roy *et al.*, 2020).

La definición de la red de drenaje se llevó a cabo de acuerdo con un orden 5 de Strahler¹ y se derivó del modelo de elevación digital utilizando

¹ Método para identificar y clasificar los tipos de cursos basado en la cantidad de afluentes con el objetivo de jerarquizar la red de drenaje.

Tabla 1. Matriz de comparación de criterios.

Parámetro	Geología	Lineamientos	Pendiente	Drenaje	Tipo de suelo	Uso del suelo
Geología	1	3	3	4	6	6
Lineamientos	1/3	1	2	3	3	3
Pendiente	1/3	1/2	1	2	3	3
Drenaje	1/4	1/3	1/2	1	2	3
Tipo de suelo	1/6	1/3	1/3	1/2	1	3
Uso del suelo	1/6	1/3	1/3	1/3	1/3	1
Total	2.25	5.50	7.17	10.83	15.33	19.00

la herramienta hidrología del software ArcMap 10.0. Con la herramienta de análisis espacial se generó la capa de densidad de drenaje (km/km²).

3.1.5. TIPO DE SUELO

El tipo de suelo, particularmente su textura, es un parámetro que también condiciona el potencial de recarga de aguas subterráneas. Los suelos arenosos de textura gruesa favorecen los procesos de infiltración y recarga, mientras que los suelos arcillosos más finos dificultan el movimiento de agua (Anbarasu *et al.*, 2020; Lara-Vásconez *et al.*, 2021).

La capa de tipo de suelo se generó a partir de la base de datos de mapeo digital de las propiedades del suelo (CIAT, 2016) en donde se identificaron los diferentes tipos de textura encontrados en los suelos del área de estudio. Siguiendo el criterio de ponderación de la recarga hídrica del suelo según su textura propuesto por Matus *et al.* (2009) se clasificó el suelo según su potencial de recarga: Muy alto para suelos franco arenosos y muy bajo para suelos arcillosos.

3.1.6. USO DEL SUELO

El uso del suelo de una región influye directamente en varios procesos hidrogeológicos del ciclo hidrológico como la evapotranspiración, escorrentía superficial y la infiltración (Kaliraj *et al.*, 2014; Matomela *et al.*, 2020). En las tierras forestales y agrícolas, la escorrentía es generalmente menor y la infiltración es mayor, mientras que, en las áreas

de asentamientos, la tasa de infiltración suele ser menor (Roy *et al.*, 2020).

La capa de uso del suelo se elaboró a partir de la base de datos oficial de cobertura forestal 2018 (ICF, 2018) en donde se identificaron los diferentes usos del suelo presentes en el área de estudio. Las áreas forestales y con cobertura vegetal se clasifican como áreas con un buen potencial de recarga, mientras que aquellas áreas con superficies más impermeables como los asentamientos humanos se clasifican con un potencial de recarga bajo.

3.2. NORMALIZACIÓN DE CRITERIOS Y PONDERACIÓN

Considerando el conocimiento y la experiencia en el sitio de estudio, la opinión de expertos y actores involucrados, así como la consulta de literatura existente (Anbarasu *et al.*, 2020; Lara-Vásconez *et al.*, 2021; Roy *et al.*, 2020; Tapia *et al.*, 2015; Waikar y Nilawar, 2014), se asignaron valores a cada criterio según la Escala de Saaty (Anexo 1) en una matriz de comparaciones basada en un Proceso Jerárquico Analítico de acuerdo con el grado de influencia de cada criterio sobre el potencial de recarga (Tabla 1). El AHP (por sus siglas en inglés) es un método analítico de matrices por pares que se utiliza para calcular el peso normalizado de criterios (Kaliraj *et al.*, 2014). Se normalizó la matriz de comparaciones y se determinó el vector de prioridades (peso) para cada criterio (Tabla 2). Posteriormente se realizó una prueba de consistencia para medir la dependencia dentro y

Tabla 2. Matriz normalizada y peso.

Parámetro	Geología	Lineamientos	Pendiente	Drenaje	Tipo de suelo	Uso del suelo	Peso
Geología	0.4444	0.5455	0.4186	0.3692	0.3913	0.3158	0.41
Lineamientos	0.1481	0.1818	0.2791	0.2769	0.1957	0.1579	0.21
Pendiente	0.1481	0.0909	0.1395	0.1846	0.1957	0.1579	0.15
Drenaje	0.1111	0.0606	0.0698	0.0923	0.1304	0.1579	0.10
Tipo de suelo	0.0741	0.0606	0.0465	0.0462	0.0652	0.1579	0.08
Uso del suelo	0.0741	0.0606	0.0465	0.0308	0.0217	0.0526	0.05
Total	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

entre los conjuntos de criterios (Saaty, 1987). Para esto primero se calcula el Índice de Consistencia (C_i ; Ecuación 1), posteriormente el Índice de Consistencia Aleatorio (R_{ci} ; Ecuación 2) y finalmente la Razón de Consistencia (CR; Ecuación 3), la cual debería ser menor al 10% para proceder con el análisis (Saaty, 1987).

$$C_i = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$R_{ci} = \frac{1.98 \times (n - 2)}{n} \quad (2)$$

$$CR = \frac{C_i}{R_{ci}} \quad (3)$$

Siendo λ_{max} el valor propio máximo y n el número de criterios. El valor de C_i y R_{ci} fue de 0.057 y 1.32 respectivamente, obteniendo un valor de CR de 0.043 (4.3%) encontrándose dentro de los límites aceptables.

En este proceso metodológico, la geología tuvo el mayor peso, seguido de la densidad de lineamientos, en vista de la alta influencia que tienen las fallas y fracturas en la recarga del acuífero (Geólogos del Mundo, 2014). Seguidamente en orden de importancia se estableció la pendiente, la densidad de drenaje, el tipo de suelo y el uso del suelo.

Posteriormente, los criterios se clasificaron con un rango uniforme de 1 a 5, donde 1 representa un potencial de recarga de agua subterránea muy bajo y 5 un potencial de recarga muy alto. Al igual que en estudios similares, se consideró un rango del 1 al 5 para describir con mayor detalle el potencial

de recarga representando las siguientes categorías: Muy bajo (1), Bajo (2), Medio (3), Alto (4) y Muy alto (5) (Hernández-Juárez *et al.*, 2020; Shaban *et al.*, 2006; Singh *et al.*, 2019). La Ecuación 4 permitió calcular el peso general según cada criterio y rango respectivo (Tabla 3).

$$Peso\ general = \%Influencia \times Valor\ de\ rango \quad (4)$$

3.3. EVALUACIÓN DE CRITERIOS

Las ZPRAS se definieron superponiendo las capas temáticas utilizando una técnica de superposición ponderada (Anbarasu *et al.*, 2020; Gaur *et al.*, 2011; Lara-Vásquez *et al.*, 2021; Murasingh, 2014; Roy *et al.*, 2020; Saiz-Rodríguez *et al.*, 2019; Singh *et al.*, 2019; Thapa *et al.*, 2017; Tiwari y Kushwaha, 2020; Waikar y Nilawar, 2014; Yeh *et al.*, 2016; Zhu y Abdelkareem, 2021) con la herramienta de análisis superposición/unión en el software ArcMap 10.0. Esta técnica consiste en integrar todas las capas temáticas entre sí para generar una sola capa en donde se pueda visualizar el potencial de recarga del sitio de estudio en función de los pesos y rangos asignados a cada criterio. Dicha integración se realizó sumando los pesos generales de la Tabla 3 con la Ecuación 5. A mayor resultado de la suma, mayor potencial de recarga.

$$PR = PG(Geología) + PG(Lineamientos) + PG(Pendiente) + PG(Drenaje) + PG(Suelo) + PG(Uso\ del\ suelo) \quad (5)$$

Donde PR es el potencial de recarga y PG es el peso general.

Tabla 3. Pesos y valores asignados para los diferentes criterios que condicionan la recarga de agua subterránea.

Criterio	Clasificación	Peso	Influencia (%)	Valor	Peso general
Geología	Miembro Guíque	0.41	41	5	205
	Valle de Ángeles inferior			4	164
	Miembro Potrerillos			3	123
	Miembro Ocote Arrancado			3	123
	Miembro Cerro Verde			2	82
	Valle de Ángeles superior			2	82
	Basalto terciario			1	41
	Basalto cuaternario			1	41
	Formación Matagalpa			1	41
	Miembro Jaitique			1	41
Densidad de lineamientos (km/km ²)	0-0.5	0.21	21	1	21
	0.6-1.3			2	42
	1.4-2.2			3	63
	2.3-3.3			4	84
	3.4-5.7			5	105
Pendiente (grados)	0-1	0.15	15	5	75
	1.1-2			4	60
	2.1-3			3	45
	3.1-4			2	30
	>4			1	15
Densidad de drenaje (km/km ²)	0-0.4	0.10	10	5	50
	0.5-0.9			4	40
	1.0-1.4			3	30
	1.5-1.9			2	20
	2.0-3.2			1	10
Tipo de suelo	Franco arenoso	0.08	8	5	40
	Franco arcilloso arenoso			4	32
	Franco			3	24
	Franco arcilloso			2	16
	Arcilloso			1	8
Uso del suelo	Bosque latifoliado húmedo	0.05	5	5	25
	Bosque mixto			5	25
	Bosque de conífera denso			5	25
	Bosque latifoliado deciduo			5	25
	Bosque de conífera ralo			4	20
	Pino plagado			4	20
	Vegetación secundaria húmeda			3	15
	Vegetación secundaria decidua			3	15
	Cafetales			3	15
	Árboles dispersos			3	15
	Pastos/Cultivos			3	15
	Suelo desnudo continental			2	10
	Zonas industriales y comerciales			1	5
	Zona urbana continua			1	5

3.4. VALIDACIÓN DE LAS ZPRAS

Para validar las zonas identificadas con un alto potencial de recarga se consideró el estado de varios pozos como indicadores de la disponibilidad de agua subterránea. El nivel de agua subterránea fue monitoreado tanto en la época seca como al final de la temporada de lluvias en 27 pozos del año 2021 al 2024 (Anexo 2). De acuerdo con los estudios de Roy *et al.* (2020) y Anbarasu *et al.* (2020), se asume que las zonas con una potencial de recarga alto se ven acompañadas de pozos perennes o cuyo nivel piezométrico no varía significativamente en las diferentes épocas del año, y que los pozos de las zonas con un potencial de recarga bajo muestran una tendencia a disminuir su nivel piezométrico, especialmente en la época

seca. Fluctuaciones menores a un metro fueron consideradas como indicador de un alto potencial de recarga. Debido a la limitada cantidad de pozos que pueden ser monitoreados en el área de estudio (Mejía *et al.*, 2023), dicho criterio no pudo ser utilizado para validar todas las zonas de recarga identificadas.

4. Resultados y discusión

El análisis realizado permitió identificar los criterios con mayor influencia en el potencial de recarga de agua subterránea en el acuífero de Siguatepeque. La técnica multicriterio empleada permitió obtener cartografía que identifica las

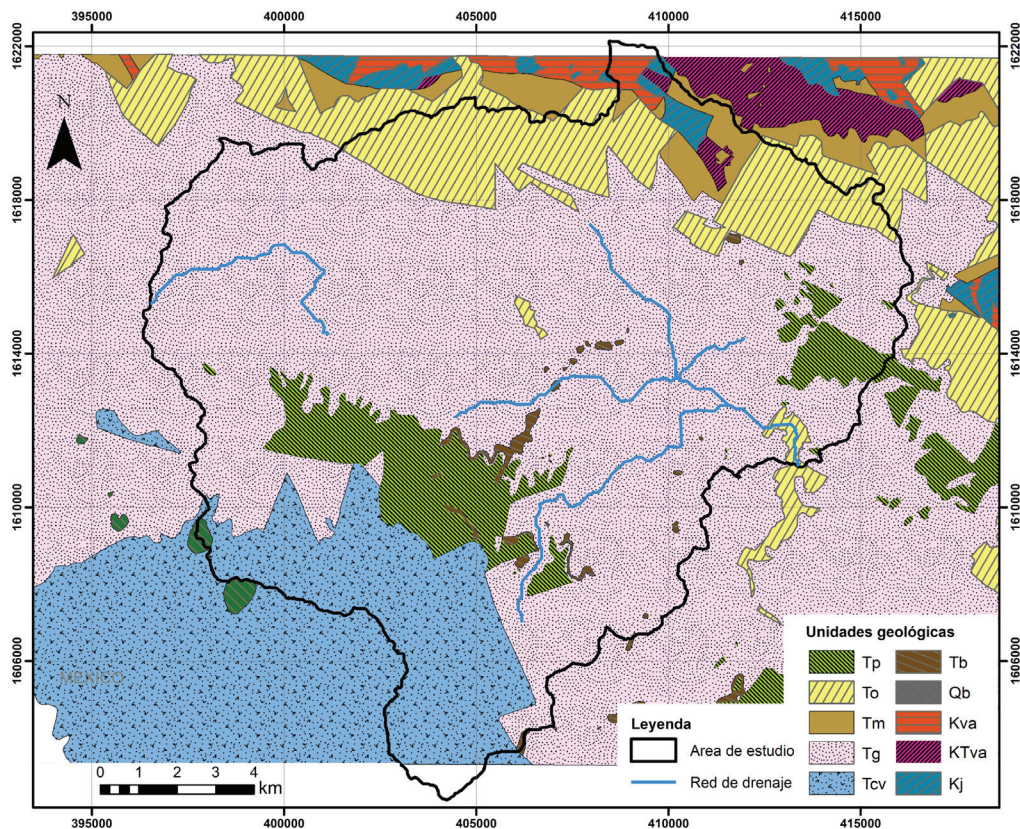


Figura 3 Mapa del criterio *Geología* (modificado de IGN (Instituto Geográfico Nacional) (1973) y Naciones Unidas (2020)). Nota: Un proyecto del IGN elaboró mapas geológicos detallados en Honduras para algunas regiones seleccionadas. Una pequeña porción del área de estudio en el norte y sur no está cubierta por este proyecto. De acuerdo con las condiciones observadas en el campo, se supone que la geología en estas áreas es una continuación del miembro Tcv en el sur y del miembro Kva en el norte.

zonas potenciales de recarga a nivel acuífero y las cuales fueron validadas en la mayoría de los casos.

4.1. CARTOGRAFÍA Y CLASIFICACIÓN DE CRITERIOS

4.1.1. GEOLOGÍA

La principal formación geológica encontrada en el área de estudio es el miembro Guique (Tg), constituido principalmente por piroclásticos re trabajados en agua, areniscas, algunas tobas depositadas por el aire e ignimbritas delgadas; brindando una relativamente buena permeabilidad para el flujo de agua subterránea. Condiciones similares fueron encontradas en el estudio de Lara-Vásquez *et al.* (2021) en la subcuenca del río Chambo en Ecuador en donde las rocas de tipo sedimento fluvial, incluyendo tobas y piroclastos, presentaron

la mejor permeabilidad.

En el estudio de Hernández-Juárez *et al.* (2020) desarrollado en la cuenca del río Ayuquila-Armerías, México, las tobas fueron también clasificadas como roca de buena permeabilidad. Según Trochez (2000), las formaciones con mayor producción acuífera son el miembro Guique y el miembro Ocote Arrancado. Además, Geólogos del Mundo (2014), sostienen que el miembro Guique presenta una baja porosidad, aunque suficiente para constituir un acuífero de tipo freático. Asimismo, esta formación geológica se encuentra a nivel superficial en la zona central más plana del área de estudio, aunado a un mayor potencial de recarga.

En la zona norte del área de estudio predomina el miembro Ocote Arrancado (To), una secuencia de ignimbritas constituidas por fenocristales

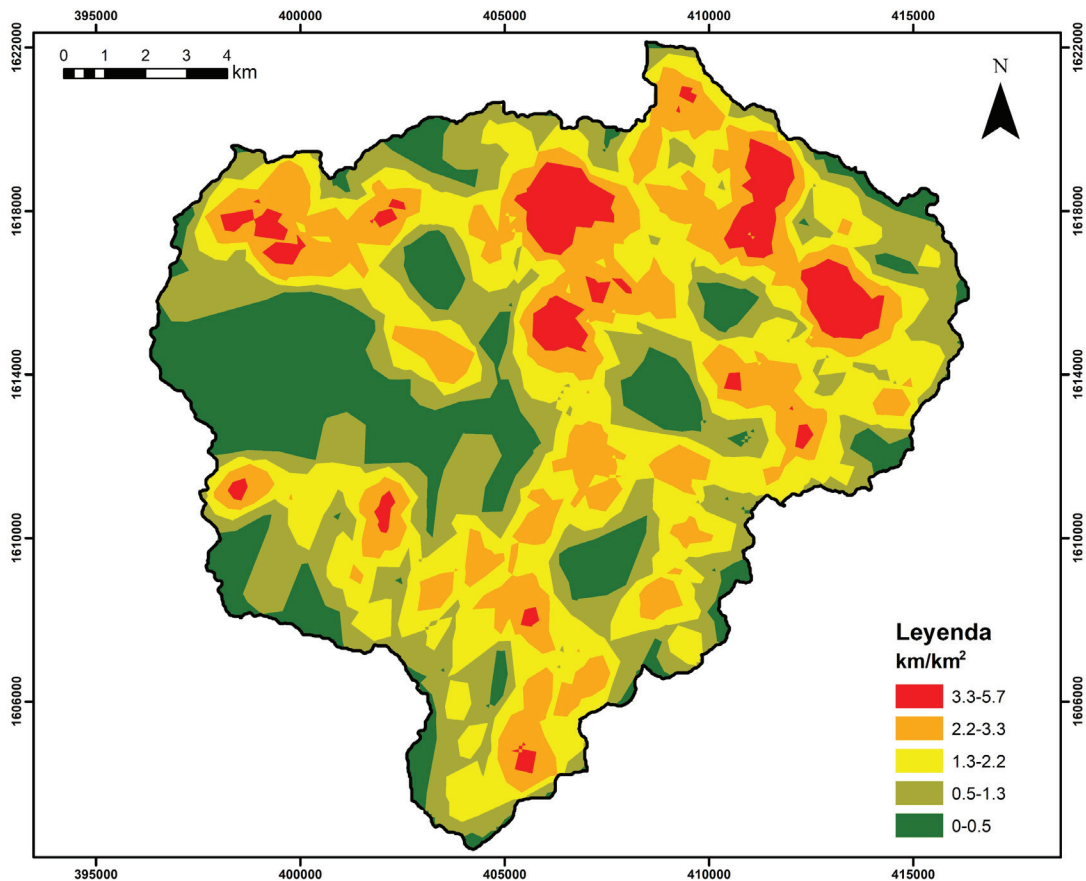


Figura 4 Mapa del criterio *Densidad de lineamientos*. Elaborado a partir de modelo de elevación digital (USGS, 2015).

de biotita, cuarzo, sanidina y plagioclasa. Según Geólogos del Mundo (2014), el miembro Ocote Arrancado no presenta porosidad alguna, no obstante, en zonas fracturadas del mismo existe abundante circulación de agua, por lo que constituye un acuífero de tipo fisurado. Superficialmente esta formación se encuentra en una de las partes altas de la zona de estudio en donde predominan pendientes pronunciadas, resultando en un potencial de recarga medio.

El sur está dominado por el miembro Cerro Verde (Tcv) y el miembro Potrerillos (Tp). El primero se conforma de ignimbritas félsicas bien endurecidas, conteniendo fenocristales de biotita, plagioclasa, sanidina y cuarzo. El segundo está constituido de una colada de riolita fenocristalina, con cuarzo, plagioclasa y sanidina. Ambas formaciones fueron consideradas como de media a baja

permeabilidad. En los estudios de Lara-Vásquez *et al.* (2021) y Hernández-Juárez *et al.* (2020), las formaciones de riolita fueron también clasificadas como de baja permeabilidad. Adicionalmente, ambos miembros se encuentran superficialmente en pendientes pronunciadas de la región montañosa de la zona sur, resultando en un potencial de recarga de medio a bajo.

Asimismo, se encuentran presentes otras formaciones geológicas: (Qb) Basalto cuaternario, flujo de basalto con fenocristales de plagioclasa y algo de olivino y ceniza cuaternaria. (Tb) Basalto terciario, fenocristales basálticos de plagioclasa y olivino (alterados). (KTva) Valle de Ángeles Superior, areniscas cuarcíticas de grano fino, lutitas calcáreas y limolitas. (Kj) Miembro Jaitique, piedra caliza mal estratificada, los 30 m superiores de la unidad están bien estratificados con láminas

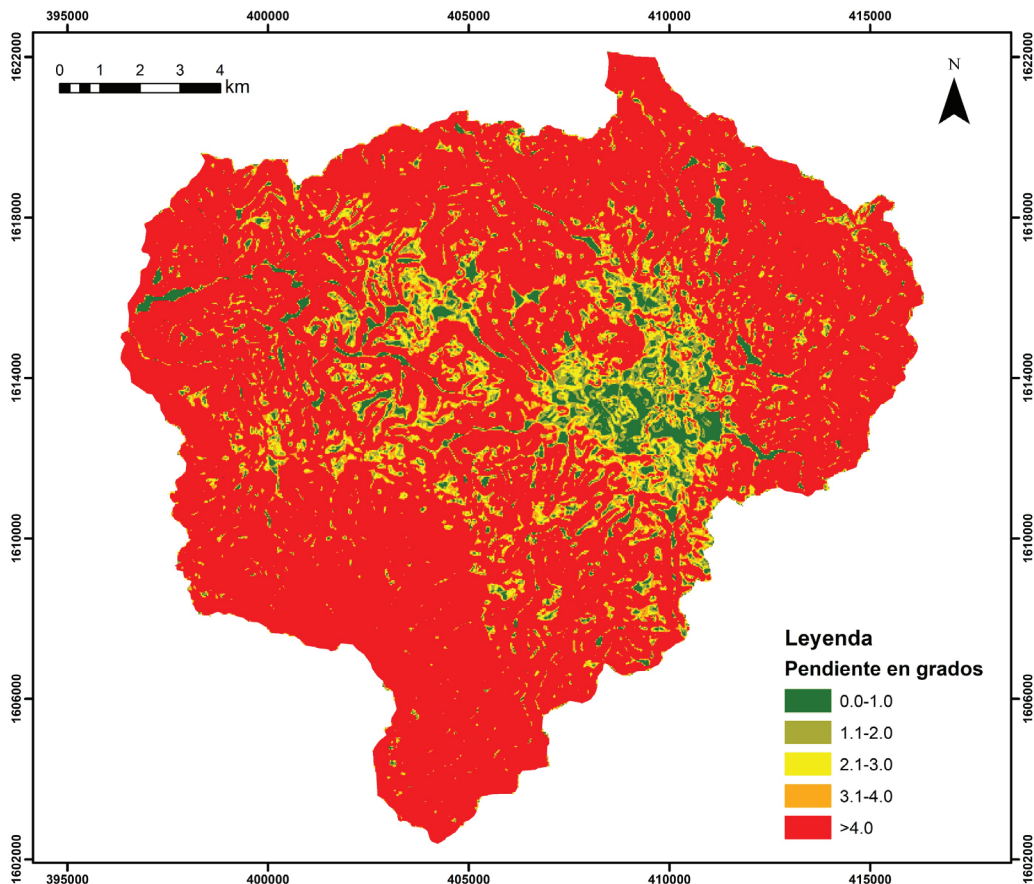


Figura 5 Mapa del criterio *Pendientes*. Elaborado a partir de modelo de elevación digital (USGS, 2015).

de 1 a 2 mm de espesor. (Kva) Valle de Ángeles inferior, conglomerado masivo con cantos rodados de cuarzo y areniscas feldespáticas. Algunas limolitas ricas en feldespatos. Formación Matagalpa, piezas fundidas de grano fino meteorizadas en bloques. En la Figura 3 se pueden observar las diferentes unidades geológicas presentes en el sitio de estudio.

4.1.2. DENSIDAD DE LINEAMIENTOS

El área de estudio posee fracturas orientadas de NO-SE y NE-SO, lo que condiciona la morfología de los sistemas fluviales existentes y la circulación preferencial de las aguas subterráneas, dando lugar a un acuífero fracturado (Geólogos del Mundo, 2014). Por esta razón dicho parámetro tiene un peso relevante en el potencial de recarga del acuí-

fero. En la Figura 4 se muestra la clasificación de la densidad de lineamientos en el área de estudios. El 26% del área cuenta con una densidad de lineamientos alta, el 30% media y el 44% baja. Las áreas con una densidad de lineamientos muy alta (3.4 – 5.7 km/km²) se clasificaron con un potencial de recarga muy alto, mientras que las áreas con muy baja densidad de lineamientos (0-0.5 km/km²) poseen muy bajo potencial de recarga.

4.1.3. PENDIENTES

La Figura 5 muestra la clasificación de las pendientes en el área de estudio. La pendiente en su mayoría varía entre 0° y 24° (en porcentaje 0 y 45%).

El 79% del área de estudio posee una pendiente mayor a 4°, indicando un bajo potencial de

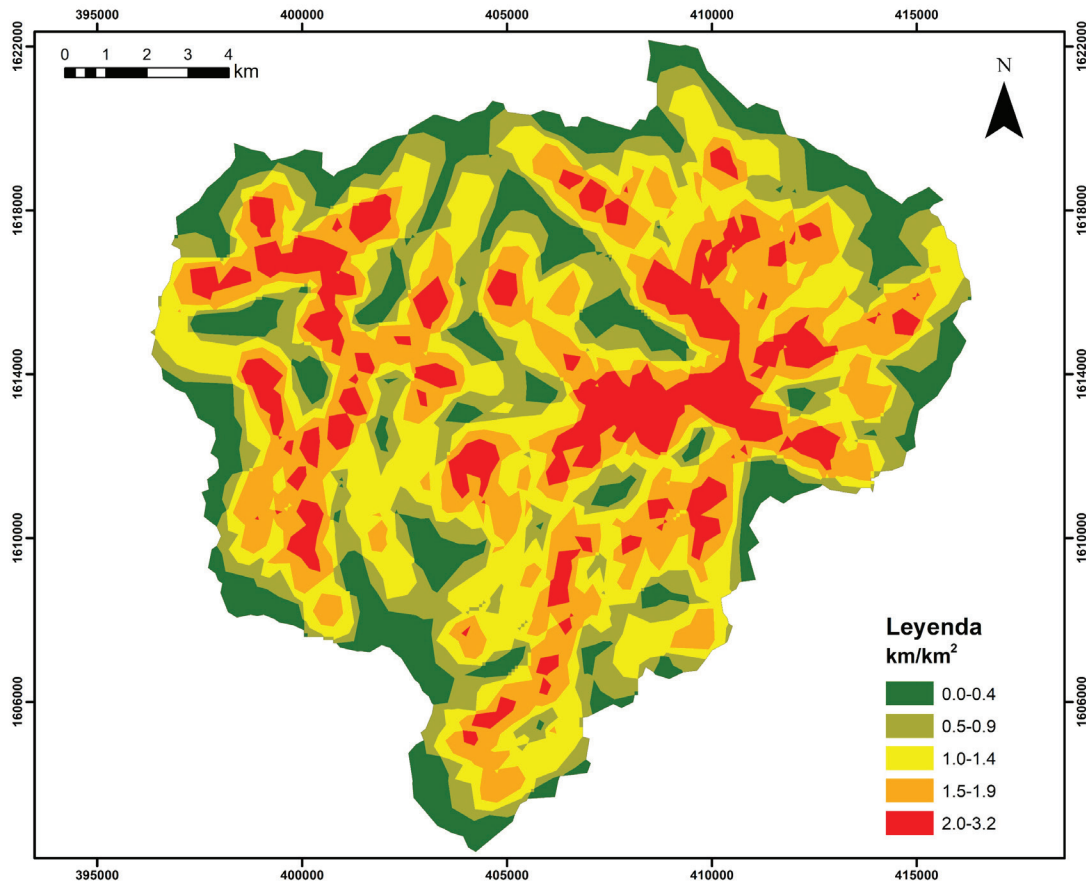


Figura 6 Mapa del criterio *Densidad de drenaje*. Elaborado a partir de modelo de elevación digital (USGS, 2015).

recarga; el 16% del área posee pendientes entre 1° y 4°, indicando un potencial de recarga medio; y el 5% del área, con una pendiente menor a 1°, representa el potencial de recarga más alto.

4.1.4. DENSIDAD DE DRENAJE

En cuanto a la densidad de drenaje, se encontró que el 37% del área de estudio posee una densidad alta (3.2 -1.5 km/km²), indicando un potencial de recarga bajo debido al efecto inverso de este criterio.

El 26% del área cuenta con una densidad media (1.4 -1.0 km/km²), y el restante 37% del área posee una densidad de drenaje baja (0.9 - 0 km/km²), indicando un potencial de recarga alto.

En la Figura 6 se observa la distribución espacial de la densidad de drenaje en el área de estudio.

4.1.5. TIPO DE SUELO

En el acuífero predominan suelos que van de franco a franco-arcillosos, indicando un potencial de recarga general entre medio a bajo. En la Figura 7 se puede apreciar la distribución espacial de las diferentes texturas encontradas en el sitio de estudio. El 82% del área es dominada por suelos francos indicando un potencial de recarga medio; 17% del área presenta suelos franco-arcillosos con un bajo potencial de recarga. El restante 1% se distribuye entre suelos franco-arenosos y arcillosos.

4.1.6. USO DEL SUELO

En la Figura 8 se puede apreciar la distribución del uso del suelo. El 45% del área está cubierta por bosques, principalmente bosque de coníferas

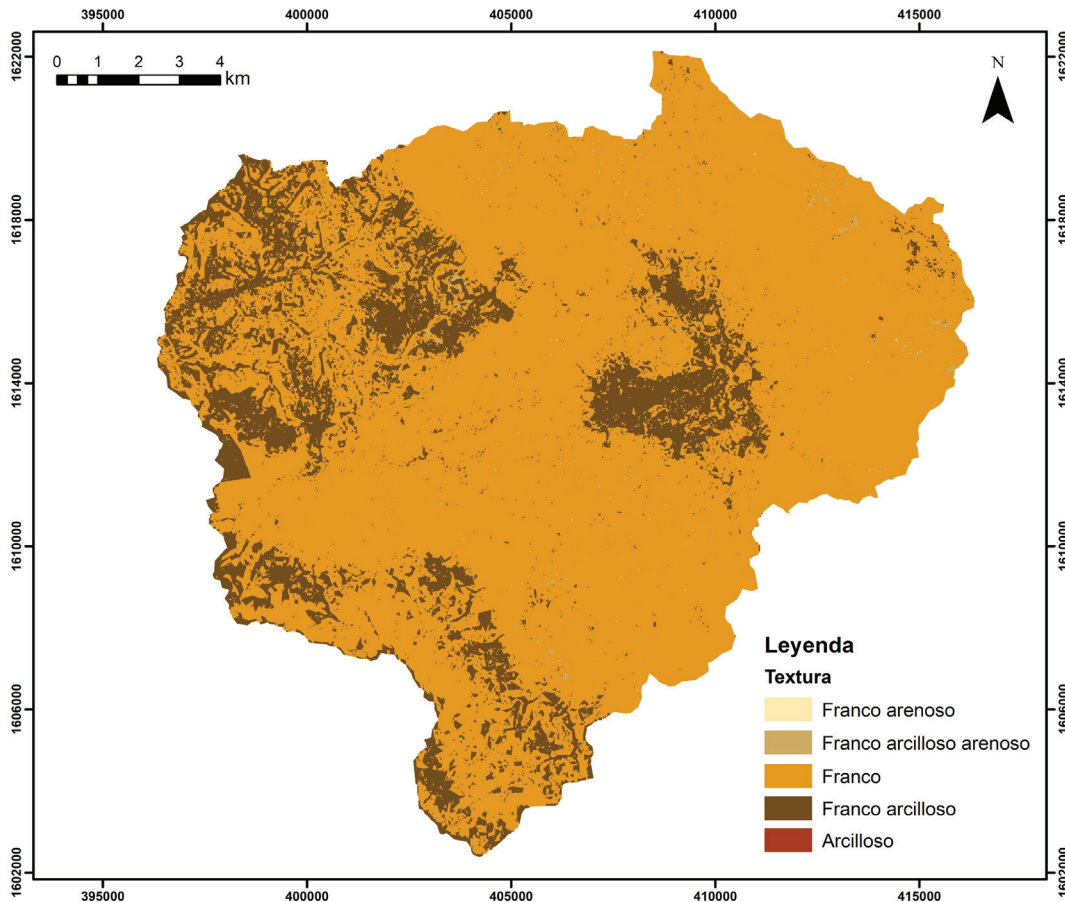


Figura 7 Mapa del criterio *Textura del suelo*. Elaborado a partir de base de datos oficial: Textura del suelo (CIAT, 2016).

denso, seguido de bosque latifoliado y bosque mixto; el 17% por pastos y cultivos, y el 14% por cafetales. Los usos del suelo se distribuyen aleatoriamente a lo largo y ancho del sitio de estudio, y representan un potencial de recarga que va de medio a alto. El resto del área (24%) se distribuye entre los demás usos del suelo.

4.2. ZONAS POTENCIALES DE RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA

Honduras carece de una base científica adecuada sobre la distribución espacial y temporal de la recarga de agua subterránea, así lo confirma García-Santos *et al.* (2022) en su estudio desarrollado en la zona central del país.

La disponibilidad de agua subterránea depende de diferentes características de la superficie y el

subsuelo; por consiguiente, la evaluación de la recarga es una tarea difícil debido a la complejidad de los marcos hidrogeológicos y la selección del método a utilizar para su evaluación depende del grado de comprensión y conceptualización del área de estudio (Hamdi *et al.*, 2020). En el caso de la técnica de superposición ponderada basada en SIG, el grado de precisión en la definición de las zonas potenciales de recarga depende de la calidad de las capas temáticas y del número de criterios considerados en el estudio (Anbarasu *et al.*, 2020).

En general, al igual que en el presente estudio, la geología es considerada como uno de los criterios de mayor influencia sobre el potencial de recarga (Anbarasu *et al.*, 2020; Hernández-Juárez *et al.*, 2020; Jaiswal *et al.*, 2003; Lara-Vásquez *et al.*, 2021; Manap *et al.*, 2013; Roy *et al.*, 2020;

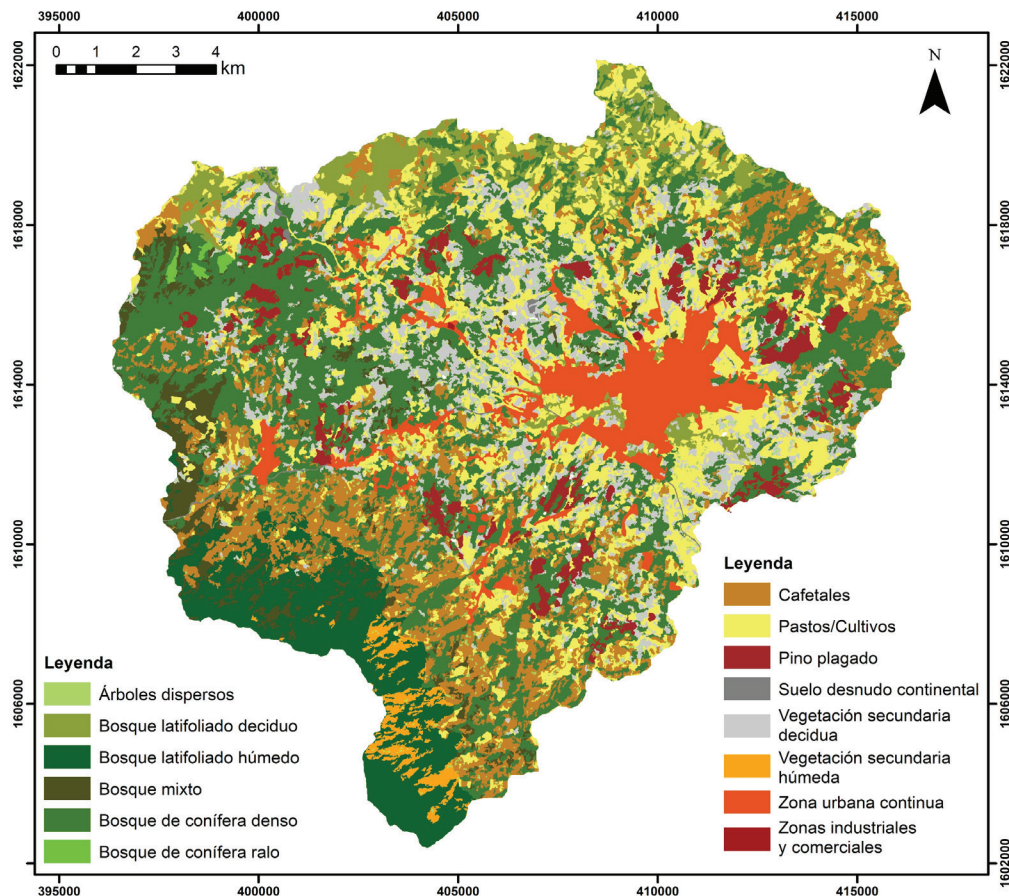


Figura 8 Mapa del criterio *Uso del suelo del área de estudio*. Elaborado a partir de base de datos oficial: Mapa de cobertura forestal (ICF, 2018).

Shaban *et al.*, 2006; Shahid *et al.*, 2000; Singh *et al.*, 2019; Thapa *et al.*, 2017; Yeh *et al.*, 2016), así como la densidad de lineamientos (Manap *et al.*, 2013; Roy *et al.*, 2020) y la pendiente (Chamorro Castillo, 2016; Lara-Vásquez *et al.*, 2021; Roy *et al.*, 2020; Shahid *et al.*, 2000; Singh *et al.*, 2019; Thapa *et al.*, 2017; Waikar y Nilawar, 2014). Por el contrario, el uso del suelo fue considerado como uno de los factores de menor influencia (Lara-Vásquez *et al.*, 2021; Waikar y Nilawar, 2014).

La Tabla 4 muestra las clases utilizadas para caracterizar las ZPRAS en función de su potencial de recarga “Muy alto”, “Alto”, “Medio”, “Bajo” y “Muy bajo” en una escala del 1 al 5, así como el área representada por cada clasificación. Los resultados se presentan en la Figura 9 que muestra que, exceptuando el casco urbano, las zonas con un potencial de recarga muy alto y alto se encuentran distribuidas en la región central del área de estudio con un área de 2 y 65 km² respectivamente, representando el 29% del área total.

En esta región predomina el miembro Guique y las pendientes más bajas del sitio de estudio. Las zonas con un potencial de recarga medio cubren el 39% del área de estudio con 89 km² y se encuentran también distribuidas en la zona central, especialmente donde predominan densidades de drenaje alta, suelos arcillosos y zonas urbanas. Las zonas con un bajo y muy bajo potencial de recarga se encuentran distribuidas en el norte y sur del área de estudio, en donde predominan las pendientes más fuertes y los miembros “Ocote arrancado” en el norte y “Cerro verde” y “Potrerillos” en el sur, cubriendo el 32% del área total con 72 km². Resultados similares fueron obtenidos en los estudios de Singh *et al.* (2019) en Nueva Zelanda, Saiz-Rodríguez *et al.* (2019) en la Cuenca del Valle de Guadalupe, México y Zhu y Abdelkareem (2021) en Kom Ombo, Egipto, donde los asentamientos urbanos y zonas montañosas con pendientes pronunciadas fueron clasificadas con un potencial bajo, mientras que las zonas menos elevadas y terrenos planos se clasificaron con un alto potencial de recarga de aguas subterráneas. En la región de Coquimbo, Chile, Tapia *et al.* (2015) también

Tabla 4. Clasificación de las ZPRAS en función de su potencial de recarga.

Escala	Potencial de recarga	Área (km ²)
5	Muy alto	2
4	Alto	65
3	Medio	89
2	Bajo	47
1	Muy bajo	25
Total		228

encontraron mejores potenciales de recarga en las zonas con pendientes más bajas, al igual que Thapa *et al.* (2017) en Bengala Occidental, India. En el estudio de Shaban *et al.* (2006) en Líbano Occidental, las áreas con asentamientos humanos densos también presentaron un potencial de recarga bajo.

La identificación de ZPRAS es importante para la selección de sitios para el establecimiento de estructuras que estimulen la recarga del acuífero, como por ejemplo recolectores de agua lluvia (Gaur *et al.*, 2011); diques subterráneos (Matomela *et al.*, 2020); pozos de infiltración perforados como en el caso de Torreón, México (Murillo, 1978) y el Valle de México, donde también se comprobó el incremento en un 15.9% de los volúmenes de extracción sin disminución de los niveles de agua subterránea (Silva-Hidalgo *et al.*, 2017); desviaciones de ríos hacia regiones de mayor permeabilidad como en el caso de la desviación del cauce del río Magdalena de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (Mendoza-Cázares *et al.*, 2010); y embalses de infiltración como en el caso del río Balsas de la Comarca Lagunera, México (Gutiérrez y Ortíz, 2000). Asimismo, Souifer (2010), en su trabajo desarrollado en el Arco Seco de Panamá, y Chamorro Castillo (2016), después de evaluar diferentes acuíferos en Ibarra, Ecuador, proponen la forestación de las zonas de recarga para mejorar la retención del agua y la infiltración.

Los mecanismos que estimulan la recarga del agua subterránea son sumamente importantes especialmente en acuíferos altamente explo-

tados como es el caso de Siguatepeque (Mejia *et al.*, 2023), al mismo tiempo permite que las comunidades locales se apropien y gestionen sus recursos hídricos (Musayev *et al.*, 2018). Otros problemas asociados se analizan en el estudio de Saiz-Rodríguez *et al.* (2019) en México en donde se corroboró que la recarga natural no es suficiente para mitigar los efectos de la sobreexplotación.

Otros estudios han analizado la explotación de las aguas subterráneas en las ZPRAS. Gaur *et al.* (2011) en su estudio desarrollado en la Subcuenca del Río Banganga, India, demostró que aumentar la descarga de los pozos en las zonas potenciales disminuye la presión sobre el acuífero en general. En el estudio de Jaiswal *et al.* (2003) en la Subcuenca de Gorna, India, esta información fue utilizada para identificar lugares adecuados para la extracción de agua para consumo humano en el

abastecimiento de poblaciones.

Por otro lado, las zonas de recarga en general se presentan como regiones altamente vulnerables a la contaminación de las aguas subterráneas, ya que, por sus características, son más propensas a la lixiviación y transmisión de contaminantes a las aguas subterráneas (Shaban *et al.*, 2006; Silva-Hidalgo *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2019), especialmente en las épocas más lluviosas como concluyen Reynoso *et al.* (2005) en su estudio desarrollado en el acuífero Pampeano, Argentina.

Según Losilla (2001) en Centroamérica la principal amenaza de deterioro y contaminación de las aguas subterráneas está dada por el crecimiento urbano desordenado sobre las áreas de recarga de los acuíferos, generando lixiviados de desechos sólidos y líquidos de origen doméstico e industrial; así como contaminación dispersa por

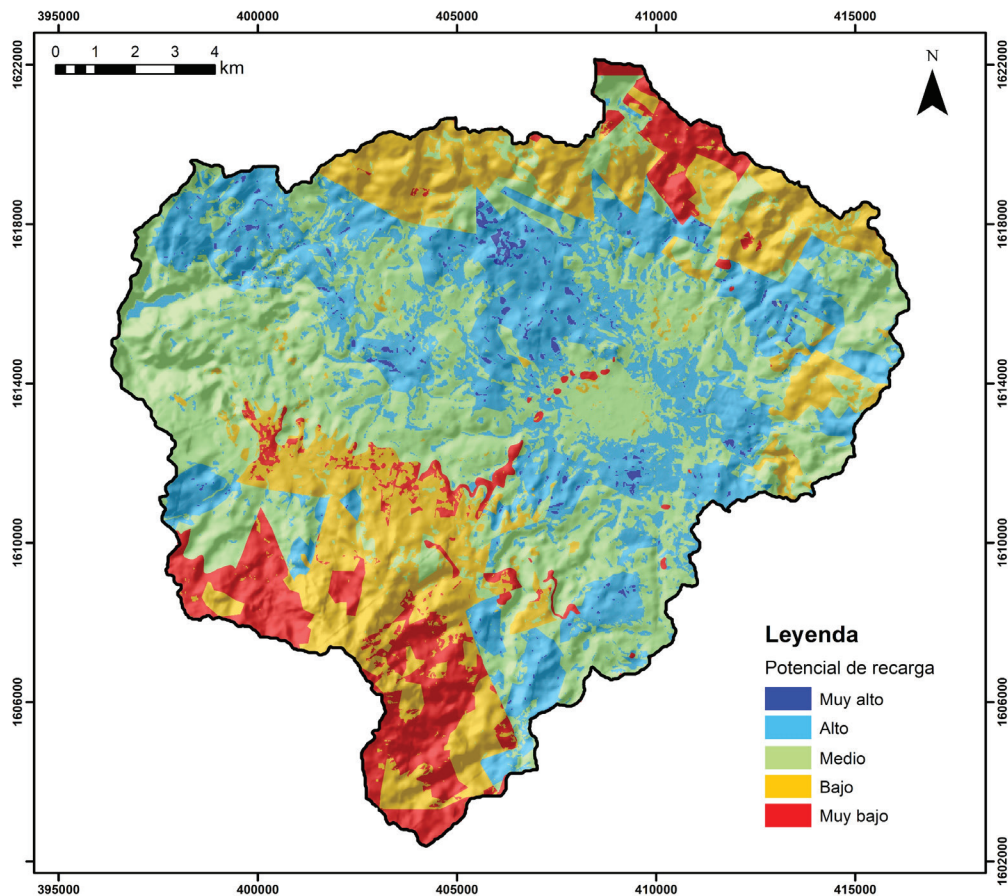


Figura 9 Mapa de zonas potenciales de recarga de agua subterránea (ZPRAS).

agroquímicos utilizados en la agricultura intensiva y la impermeabilización de las zonas de recarga por cambios de uso de la tierra provocados por la deforestación y la ganadería intensiva, que reducen la capacidad de infiltración de los suelos y como consecuencia la recarga de los acuíferos.

La información generada en el presente estudio puede servir como base para la generación de mapas de vulnerabilidad ante la contaminación del acuífero, pudiendo así diseñar e implementar medidas de control y mitigación como lo establece Gómez-Isidro *et al.* (2011) en su estudio desarrollado en la cuenca superior del río Lebrija, Bucaramanga, Colombia. En el estudio desarro-

llado en la cuenca del río Choluteca, Honduras por García-Santos *et al.* (2022), también se reconoce la necesidad de implementar medidas para garantizar la calidad (regulación del uso de sustancias químicas) y cantidad (protección de áreas críticas de recarga) de las aguas subterráneas.

4.3. VALIDACIÓN DE LAS ZPRAS

En las zonas identificadas con un alto potencial de recarga las fluctuaciones no variaron más de un metro (pozos perennes). En los estudios de campo se encontró que 18 de los pozos monitoreados se sitúan en las zonas identificadas con un potencial

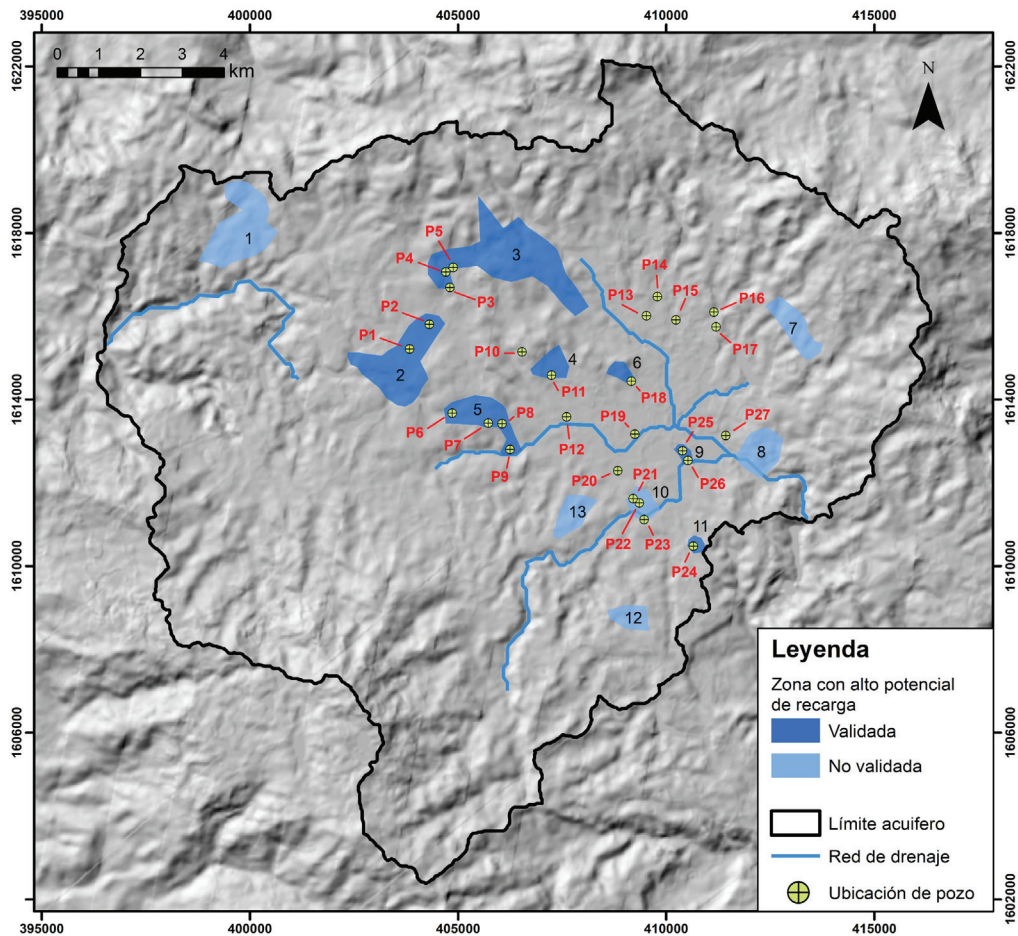


Figura 10 Mapa de zonificación especial de las áreas con mayor potencial de recarga. Zona 1. Villa Alicia, La Germania, El Socorro; Zona 2. Buenas Casas; Zona 3. Aguas del Padre, Chorreritas, Birichiche; Zona 4. Noe Cruz Villeda; Zona 5. San Fernando, Buena Vista; Zona 6. Calanterique; Zona 7. Las Casitas, El Pedregal; Zona 8. Orellana, Víctor Chavez; Zona 9. Las Américas, San Juan; Zona 10. Calan, Monte Pinar; Zona 11. Calan; Zona 12. Llanos del Rodeo; Zona 13. Sitio La Esperanza. Nota: En el Anexo 2 se muestra una descripción de los pozos monitoreados.

de recarga de medio a alto, lo que indica, según Roy *et al.* (2020), la existencia de un reservorio permeable con un almacenamiento sustancial de agua subterránea. Por tanto, de los 18 pozos, el 83 % se encontraron en las zonas con un alto potencial de recarga, y el 17% en zonas con un potencial medio.

Resultados similares fueron obtenidos por Zhu y Abdelkareem (2021) en la cuenca del río Nilo donde el 86.17% de los pozos monitoreados coincidieron con zonas de potencial muy alto a medio. En el estudio de Roy *et al.* (2020), el 81% de los pozos se encontraron en las zonas con un alto potencial y el 19% en zonas con un potencial medio. La validación del estudio de Manap *et al.* (2013) por su parte mostró una precisión de predicción del 76% en la cuenca superior del Langat, Malasia.

Los 9 pozos identificados como no perennes se encontraron en zonas con un potencial de recarga medio. En estos casos la fluctuación promedio del nivel piezométrico fue de 5.6 m, con una máxima de 12.3 m y una mínima de 2.4 m. A pesar de que en este estudio estos pozos se clasificaron como no perennes (fluctuaciones mayores a 1 m), las fluctuaciones presentadas no fueron tan altas y podrían coincidir con un potencial de recarga medio a alto.

Tal es caso del estudio de Anbarasu *et al.* (2020) en el distrito de Perambalur en el sur de India en donde incluso fluctuaciones entre 1.9 y 12.4 m (promedio de 3.1 m) fueron consideradas como indicador de un buen potencial de agua subterránea. No se pudo realizar la validación de las zonas identificadas con un potencial de recarga de bajo a muy bajo debido a que en dichas zonas no se encontraron pozos para observación por lo que se recomienda la instalación de piezómetros que permitan ampliar el monitoreo hacia estas zonas.

Para facilitar la interpretación de los resultados y mejorar la visualización de las áreas identificadas con un alto potencial de recarga, en la Figura 10 se propone una zonificación especial basada en las regiones que muestran una concentración de zonas con un potencial de recarga alto y muy

alto, la validación en campo, la opinión técnica de expertos y funcionarios involucrados. Las zonas 2, 3, 4, 5, 6, 9 y 11 pudieron ser validadas en campo debido a la presencia de pozos de observación que mostraron ser perennes en el tiempo.

Las zonas 1, 7, 8, 12 y 13 fueron identificadas como zonas con un alto potencial de recarga, no obstante, su validación no fue posible debido a la inexistencia de pozos de observación en estas áreas. En el caso de la zona 10, solamente uno de los tres pozos monitoreados muestra fluctuaciones menores a 1 m. Los otros dos muestran una fluctuación promedio de 3.1 m, que podría ser considerado aún como indicador de un buen potencial de recarga.

5. Conclusiones

En este estudio se determinaron las zonas potenciales de recarga de agua subterránea para el acuífero de Siguatepeque mediante el método AHP y la superposición ponderada de diferentes criterios: geología, densidad de lineamientos, pendiente, densidad de drenaje, tipo de suelo y uso del suelo.

La técnica de superposición ponderada aplicada mediante SIG se presenta como una buena opción para países como Honduras en donde los recursos económicos y la información son limitados. La metodología utilizada podría replicarse en otras partes del país y la región centroamericana en donde el agua subterránea ya se ha convertido en la fuente de suministro de agua más importante.

Los resultados muestran que las zonas identificadas con un alto potencial de recarga representan el 28% del área total y se concentran principalmente en la región central del área de estudio en donde predominan formaciones geológicas con buena permeabilidad y las pendientes más bajas. El 83% de los pozos de monitoreo identificados se encontraron en dicha región confirmando de esta forma la efectividad del análisis desarrollado, extremo que también pudo ser corroborado por otros autores en estudios similares.

La ausencia de pozos de observación impidió la

validación de las zonas identificadas con un bajo potencial de recarga, por lo que se recomienda el establecimiento de piezómetros en las diferentes regiones del sitio de estudio para mejorar la representatividad de los muestreos realizados.

Por lo tanto, una aplicación importante de este estudio y de la información generada es servir de base para la gestión sostenible de las aguas subterráneas a través de las autoridades locales y así definir acciones de restauración y diseñar estructuras que estimulen la recarga artificial, disminuyendo de esta forma la presión sobre el acuífero. Asimismo, el estudio sirve como sustento para la implementación de medidas y el diseño de normativas encaminadas a reducir los riesgos de contaminación de las aguas subterráneas.

Un aspecto importante enfocado a mejorar el análisis sería la incorporación de información sobre la distribución espacial de la precipitación, lo cual permitiría localizar espacialmente los valores de recarga y mejorar el análisis multicriterio. Se recomienda el establecimiento de estaciones meteorológicas (al menos pluviómetros y termómetros) en zonas estratégicas del área de estudio, especialmente en las regiones montañosas más elevadas.

Finalmente, los expertos consultados sugirieron el desarrollo de investigaciones a futuro tales como estudios geofísicos enfocados en el dimensionamiento y determinación de la saturación de la capa freática, así como sondeos para la determinación de la densidad, apertura y orientación de la fracturación y caracterizaciones hidrogeológicas más detalladas de las ZPRAS.

Contribuciones de los autores

(1) Conceptualización: NM, MM; (2) Análisis o adquisición de datos: NM, MM; (3) Desarrollo metodológico/técnico: NM, MM; (4) Redacción del manuscrito original: NM; (5) Redacción del manuscrito corregido y editado: NM; (6) Diseño gráfico: NM; (7) Trabajo de campo: NM; (8) Interpretación: NM, MM.

Financiamiento

Este estudio fue financiado con el apoyo de la Universidad Nacional de Ciencias Forestales (UNACIFOR) de Honduras, así como la Fundación de la “Wissenschaftlichen Schule Zunker-Busch - Luckner” (Escuela Científica Zunker - Busch - Luckner) y la Asociación “Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg” (Amigos y Patrocinadores de TU Bergakademie Freiberg) de Alemania.

Agradecimientos

Un reconocimiento especial para la UNACIFOR por brindar logística y financiamiento. También se agradece al personal técnico del prestador de servicio local “Aguas de Siguatepeque” por todo el apoyo en campo e información brindada para la investigación. Gracias al equipo del Departamento de Hidrogeología e Hidroquímica de la universidad TU Bergakademie Freiberg por sus aportes conceptuales a la investigación.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

Editor a cargo

María Vicenta Esteller-Alberich.

Referencias

- Abdalla, F., Moubark, K., Abdelkareem, M., 2020, Groundwater potential mapping using GIS, linear weighted combination techniques and geochemical processes identification, west of the Qena area, Upper Egypt: Journal of Taibah University for Science, 14, 1350-1362. <https://doi.org/10.1080/16583655.2020.1822646>
- Anbarasu, S., Brindha, K., Elango, L., 2020, Multi-influencing factor method for

- delineation of groundwater potential zones using remote sensing and GIS techniques in the western part of Perambalur district, southern India: *Earth Science Informatics*, 13, 317-332. <https://doi.org/10.1007/s12145-019-00426-8>
- Bethune, D.N., Ryan, M. C., 2010, The CARA Network: Building Latin American capacity in hydrogeology and water resource management: *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 145, 45-50. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2010.00081.x>
- Chamorro Castillo, K.M., 2016, Identificación y caracterización de las zonas de recarga hídrica mediante herramientas Sig de los acuíferos la carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha y Santa Clara para la protección de las fuentes de aprovisionamiento de agua en la zona urbana de Ibarra: Ibarra, Ecuador, Universidad Técnica del Norte, tesis de ingeniería, 149.
- Centro Internacional para la Agricultura Tropical (CIAT), 2016, Digital mapping of soil properties in the West of Honduras, Central America: USA, Harvard Dataverse, disponible en <<https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/QVXA7U>>, consultado 15 de noviembre de 2022.
- Devi, S.P., Srinivasulu, S., Raju, K.K., 2001, Delineation of groundwater potential zones and electrical resistivity studies for groundwater exploration, *Environmental Geology*, 40, 1252-1264. <https://doi.org/10.1007/s002540100304>
- García-Santos, S., Sánchez-Murillo, R., Peña-Paz, T., Chirinos-Escobar, M., Hernández-Ortiz, J., Mejía-Escobar, E., Ortega, L., 2022, Water stable isotopes reveal a complex rainfall to groundwater connectivity in central Honduras, *Science of The Total Environment*, 844, 156941. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156941>
- Garza, R.S.M., van Hinsbergen, D.J., Rogers, R.D., Ganerød, M., Dekkers, M.J., 2012, The Padre Miguel Ignimbrite Suite, central Honduras: paleomagnetism, geochronology, and tectonic implications: *Tectonophysics*, 574, 144-157. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.013>
- Gaur, S., Chahar, B.R., Graillot, D., 2011, Combined use of groundwater modeling and potential zone analysis for management of groundwater: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 127-139. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.09.001>
- Geólogos del Mundo, 2010, Gestión integral del recurso hídrico para el abastecimiento de agua potable en el municipio de Siguatepeque: Comayagua, Honduras, 115 p.
- Geólogos del Mundo, 2014, Mejora y ampliación de los sistemas de agua potable y saneamiento, con participación comunitaria, en los barrios periféricos de Siguatepeque: Comayagua, Honduras, Memoria final del proyecto 2013-2014, 52 p.
- Gómez-Isidro, S., Gutiérrez-Lozano, F.J., Torres, C.M., 2011, Vulnerabilidad, amenaza y peligro a la contaminación de las aguas subterráneas en la región de Bucaramanga: *Revista UIS Ingenierías*, 10, 52-64.
- Gutiérrez, C., Ortíz, G., 2000, Proyectos de recarga artificial de acuíferos en la Comarca Lagunera, México, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Informe técnico.
- Hamdi, M., Goïta, K., Jerbi, H., Zagrarni, M.F., 2020, Modeling of the natural groundwater recharge under climate change: Sisseb El Alem Nadhour Saouaf basin (Central Tunisia) case study: *Environmental Earth Sciences*, 79, 1-25. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09010-6>
- Heiken, G., Ramos, N., Duffield, W., Musgrave, J., Wohletz, K., Priest, S., Aldrich, J., Flores, W., Ritchie, A., Goff, F., 1991, Geology of the Platanares geothermal area, Departamento de Copán, Honduras: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 45, 41-58. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(91\)90021-Q](https://doi.org/10.1016/0377-0273(91)90021-Q)

- Hernández-Juárez, R.A., Martínez Rivera, L.M., Peñuela-Arévalo, L.A., Rivera-Reyes, S., 2020, Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio, *Investigaciones geográficas*, 101. <https://doi.org/10.14350/rig.59892>
- ICF (Instituto de Conservación Forestal), 2018, Cobertura Forestal 2018, Geoportal del Sector Forestal de Honduras, disponible en <<https://geoportal.icf.gob.hn/geoportal/main>>, consultado 15 de noviembre de 2022.
- IGN (Instituto Geográfico Nacional), 1973, Mapa geológico de Siguatepeque, Escala 1:110000: Honduras, Instituto Geográfico Nacional, Cuerpo de Paz de Estados Unidos en Honduras, Estudio Geodésico Interamericano, 1 mapa con texto.
- Jaiswal, R., Mukherjee, S., Krishnamurthy, J., Saxena, R., 2003, Role of remote sensing and GIS techniques for generation of groundwater prospect zones towards rural development-an approach: *International Journal of Remote Sensing*, 24, 993-1008. <https://doi.org/10.1080/01431160210144543>
- Kadam, A.K., Umrikar, B.N., Sankhua, R., 2020, Assessment of recharge potential zones for groundwater development and management using geospatial and MCDA technologies in semiarid region of Western India: *SN Applied Sciences*, 2, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2079-7>
- Kaliraj, S., Chandrasekar, N., Magesh, N., 2014, Identification of potential groundwater recharge zones in Vaigai upper basin, Tamil Nadu, using GIS-based analytical hierarchical process (AHP) technique: *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 1385-1401. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0849-x>
- Lara-Vásquez, N.X., Cushquicullma-Colcha, D.F., Guaiña-Yungán, J.I., Espinoza, V.M., Ati-Cutiupala, G.M., 2021, Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la subcuenca del Río Chambo mediante los sistemas de información geográfica y el análisis multicriterio: *Polo del Conocimiento*, 6, 122-148.
- Lee, S., Hyun, Y., Lee, S., Lee, M.-J., 2020, Groundwater potential mapping using remote sensing and GIS-based machine learning techniques: *Remote Sensing*, 12, 1200. <https://doi.org/10.3390/rs12071200>
- Losilla, M., 2001, Los acuíferos volcánicos y el desarrollo sostenible en América Central: Costa Rica, Editorial Universidad de Costa Rica.
- Manap, M.A., Sulaiman, W.N.A., Ramli, M.F., Pradhan, B., Surip, N., 2013, A knowledge-driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the Upper Langat Basin, Malaysia: *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 1621-1637. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0469-2>
- Matomela, N., Li, T., Ikhumhen, H.O., 2020, Siting of rainwater harvesting potential sites in arid or semi-arid watersheds using GIS-based techniques: *Environmental Processes*, 7, 631-652. <https://doi.org/10.1007/s40710-020-00434-7>
- Matus, O., Faustino, J., Jiménez Otárola, F., 2009, Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica: aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua: Managua, Programa Focuecas II.
- Mejía, N., Scheytt, T.J., Murillo, M., 2023, Hydrogeological characterization and utilization of the Siguatepeque aquifer, Honduras: *Hydrogeology Journal*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02718-2>
- Mendoza, A., Solano, C., Palencia, D., Garcia, D., 2019, Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos, *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, 27, 348-360. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000300348>
- Mendoza-Cázares, E.Y., Gutiérrez-Ojeda, C.,

- 2010, Proyecto piloto de recarga controlada al acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México: Ciudad de México, informe técnico, 1–12.
- Murasingh, S., 2014, Analysis of groundwater potential zones using electrical resistivity, rs & gis techniques in a typical mine area of odisha: Rourkela, India, National Institute of Technology, doctoral thesis, 64 p.
- Murillo, F., 1978, Pozos de absorción como solución al drenaje pluvial urbano en Torreon, Coahuila, Mexico, in Memorias de la Tercera Reunión Nacional de Perforación de Pozos: México, D.F., Camara Nacional de la Industria de la Construcción.
- Musayev, S., Burgess, E., Mellor, J., 2018, A global performance assessment of rainwater harvesting under climate change: Resources, Conservation and Recycling, 132, 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.023>
- Naciones Unidas, 2020, Datos geoespaciales y de ubicación para un mundo mejor. Visión General: Centroamérica, 1 mapa.
- Naciones Unidas, 2022, Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022: Aguas subterráneas, Hacer visible el recurso invisible: París, UNESCO, 266 p.
- Palacio, P.A., Betancur, T., 2007, Identificación de Fuente y Zonas de Recarga a Un Sistema Acuífero Apartir de Isótopos Estables Del Agua. Caso de Estudio Bajo Cauca Antioqueño: Gestión y Ambiente, 10, 167-181.
- Prasad, R., Mondal, N., Banerjee, P., Nandakumar, M., Singh, V., 2008, Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS, Environmental Geology, 55, 467-475. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0992-3>
- Rao, N. S., Chakradhar, G., Srinivas, V., 2001, Identification of groundwater potential zones using remote sensing techniques in and around Guntur town, Andhra Pradesh, India: Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 29, 69-78. <https://doi.org/10.1007/BF02989916>
- Reynoso, L., Sasal, C., Portela, S., Andriulo, A., 2005, Vulnerabilidad del acuífero pampeano a la contaminación en el norte de la provincia de Buenos Aires. Aplicación de la metodología Drastic, RIA: Revista de Investigaciones Agropecuarias, 34, 85-99.
- Roy, S., Hazra, S., Chanda, A. y Das, S., 2020, Assessment of groundwater potential zones using multi-criteria decision-making technique: a micro-level case study from red and lateritic zone (RLZ) of West Bengal, India: Sustainable Water Resources Management, 6, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00373-z>
- Saaty, T.L., 1987, Risk—its priority and probability: the analytic hierarchy process: Risk Analysis, 7, 159-172.
- Saiz-Rodríguez, J.A., Lomeli Banda, M.A., Salazar-Briones, C., Ruiz-Gibert, J.M., Mungaray-Moctezuma, A., 2019, Allocation of groundwater recharge zones in a rural and semi-arid region for sustainable water management: case study in Guadalupe Valley, Mexico: Water, 11, 1586. <https://doi.org/10.3390/w11081586>
- Schosinsky, G. y Losilla, M., 2000, Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual: Revista Geológica de América Central, 23, <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i23.8579>
- Shaban, A., Khawlie, M., Abdallah, C., 2006, Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon: Hydrogeology Journal, 14, 433-443. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0437-6>
- Shahid, S., Nath, S., Roy, J., 2000, Groundwater potential modelling in a soft rock area using a GIS: International Journal of Remote Sensing, 21, 1919-1924. <https://doi.org/10.1080/014311600209823>
- Silva-Hidalgo, H., González-Núñez, M., Pinales,

- A., Villalobos, A., 2017, Proyecto de manejo de recarga de acuíferos en los ojos de Chuvíscar, Chihuahua, México, en *Manejo de la recarga de acuíferos: Un enfoque hacia Latinoamérica: México*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 191-225.
- Singh, S.K., Zeddies, M., Shankar, U., Griffiths, G.A., 2019, Potential groundwater recharge zones within New Zealand: *Geoscience Frontiers*, 10, 1065-1072. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.05.018>
- Souifer, A., 2010, Delimitación de Acuíferos y establecimiento de zonas de recarga, para identificar su vulnerabilidad y el desarrollo de una estrategia para su protección y conservación en el Arco Seco: República de Panamá, manual técnico 54 p.
- Tapia, S., Oyarzún, R., Nuñez, J., Oyarzún, J., 2015, Identificación de zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas en el sector de la mina Brillador (resumen), en XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena: Chile, 4-8.
- Thapa, R., Gupta, S., Guin, S., Kaur, H., 2017, Assessment of groundwater potential zones using multi-influencing factor (MIF) and GIS: a case study from Birbhum district, West Bengal: *Applied Water Science*, 7, 4117-4131. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0571-z>
- Tiwari, R.N., Kushwaha, V.K., 2020, An integrated study to delineate the groundwater potential zones using geospatial approach of Sidhi Area, Madhya Pradesh: *Journal of the Geological Society of India*, 95, 520-526. <https://doi.org/10.1007/s12594-020-1471-7>
- Trochez, R.A., 2000, Estudio hidrogeológico del acuífero de Siguatepeque, Comayagua, Honduras: Programa de Estudios de Posgrado en Geología, Universidad de Costa Rica, 147p.
- UNAH (Universidad Nacional Autónoma de Honduras), 2015, Plan de estudios de la carrera de recursos hídricos con orientación en hidrogeología en el grado académico de maestría: Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra, Tegucigalpa MDC, 124p.
- UNAH (Universidad Nacional Autónoma de Honduras), 2022, Perfil Sociodemográfico de Siguatepeque, 37p.
- USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos), 2015, Landsat Collection DEM Source Products.
- Vargas, C.R., Samaniego, L., Medina, M.R., 2020, Estado actual del Monitoreo de agua subterránea en América Latina e Introducción al programa GGMN: *Aqua-LAC*, 12, 118-126. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2020-v12-1-10>
- Waikar, M., Nilawar, A.P., 2014, Identification of groundwater potential zone using remote sensing and GIS technique: *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3, 12163-12174.
- Yeh, H.-F., Cheng, Y.-S., Lin, H.-I. y Lee, C.-H., 2016, Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan, *Sustainable Environment Research*, 26, 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2015.09.005>
- Zhu, Q., Abdelkareem, M., 2021, Mapping groundwater potential zones using a knowledge-driven approach and GIS analysis, *Water*, 13, 579. <https://doi.org/10.3390/w13050579>

Datos suplementarios

Anexo 1. Escala de juicio de Saaty. Tomado de Mendoza *et al.* (2019).

Escala numérica	Escala verbal	Descripción
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio
3	El elemento es moderadamente más importante respecto al otro	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente a otro
5	El elemento es fuertemente más importante respecto al otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente a otro
7	La importancia del elemento es muy fuerte respecto al otro	Un elemento domina fuertemente
9	La importancia del elemento es extrema respecto al otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes	
Incrementos 0.1	Valores intermedios entre incrementos	
Inversos 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9	Se utiliza cuando el segundo elemento es mayor en el criterio a comparar	

Anexo 2. Pozos de observación utilizados para la validación de las ZPRAS.

Id	Nombre/Propietario	Coordenadas UTM		Uso
		X	Y	
P1	M. A. Erazo	403826	1615277	Consumo humano
P2	J.A. Mancía	404322	404322	Consumo humano
P3	B. Gómez	404776	1616730	Consumo humano
P4	Providence Word Ministries 1	404799	1617089	Consumo humano
P5	Providence Word Ministries 2	404869	1617102	Consumo humano
P6	Construcciones Midence	404838	1613701	Consumo humano
P7	Residencial Lomas de San Fernando	405712	1613448	Consumo humano
P8	A. Raudales	406029	1613458	Consumo humano
P9	J.H. Vásquez	406227	1612835	Consumo humano
P10	JAA Altos de Santa Marta	406543	1615158	Consumo humano
P11	SIGURBAN (El Circular)	407273	1614569	Consumo humano
P12	Hotel Hollywood	407604	1613605	Comercial
P13	Serve Hope (San Francisco)	409519	1616060	Comercial
P14	SESCO (Brisas de San Francisco)	409774	1616488	Consumo humano
P15	SESCO (Las Acacias)	410224	1615938	Consumo humano
P16	Residencial Loma Alta	411139	1616149	Consumo humano
P17	ADS Colinas	411184	1615773	Consumo humano
P18	Hospital Evangélico	409160	1614441	Comercial
P19	Residencial Beit Jala	409247	1613193	Consumo humano
P20	L. Domínguez	408814	1612311	Comercial
P21	O. Guerrero	409211	1611650	Consumo humano
P22	Residencial Monte Fresco	409316	1611554	Consumo humano
P23	ADS Vivero Municipal	409451	1611151	Consumo humano
P24	SESCO (Calan)	410634	1610497	Comercial
P25	Parque Experimental San Juan	410351	1612807	Comercial
P26	As. Iglesias Centroamericanas HN	410496	1612541	Consumo humano
P27	ADS Curtiembre	411415	1613170	Consumo humano