

## ESTIMACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA DEL RÍO PORTOVIEJO MEDIANTE ANÁLISIS JERÁRQUICO BASADO EN SIG Y TELEDETECCIÓN

Jorge Chonlong<sup>1\*</sup>, Henry Pacheco<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Estudiante del Programa de Maestría Académica con Trayectoria Profesional en Hidráulica, mención Gestión de Recursos Hídricos del Instituto de Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí. Ecuador. E-mail: [jchonlong7108@utm.edu.ec](mailto:jchonlong7108@utm.edu.ec)

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad Técnica de Manabí. Ecuador. E-mail: [henry.pacheco@utm.edu.ec](mailto:henry.pacheco@utm.edu.ec)

\*Autor para la correspondencia: [jchonlong7108@utm.edu.ec](mailto:jchonlong7108@utm.edu.ec)

Recibido: 15-09-2020 / Aceptado: 11-01-2021 / Publicación: 30-04-2021

Editor Académico: Julio Cesar Marin Leal

### RESUMEN

La utilización del agua subterránea en Ecuador se ha venido incrementando y cada día gana importancia debido al agotamiento, contaminación o inexistencia de fuentes superficiales. Sin embargo, la información hidrogeológica de la cual dispone el país es incompleta, desactualizada y dispersa, faltando implementar estrategias para la gestión del recurso hídrico subterráneo, iniciando con el proceso de legalización y regularización de los concesionarios formales e informales. El presente estudio tuvo como objetivo determinar las zonas potenciales de aguas subterráneas en la cuenca del río Portoviejo aplicando el método de análisis jerárquico (AHP, según sus siglas en inglés) basado en el sistema de información geográfica (SIG) y teledetección de acceso libre. A partir de este análisis se obtuvo el índice de potencial de aguas subterráneas (GWPI, según sus siglas en inglés), utilizado para la creación del mapa de zonas potenciales, el cual fue comparado con datos existentes en el inventario de puntos de agua. En la validación, se obtuvo una efectividad del 87 % para el mapa resultante, el cual ha sido influenciado en mayor grado por la permeabilidad de la roca, la precipitación y la densidad de drenajes, y en menor proporción por la pendiente del terreno y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, según sus siglas en inglés).

**Palabras clave:** agua subterránea, AHP, GWPI.

### ESTIMATION OF POTENTIAL GROUNDWATER ZONES IN THE PORTOVIEJO RIVER BASIN THROUGH HIERARCHICAL ANALYSIS BASED ON GIS AND REMOTE SENSING

### ABSTRACT

The use of groundwater in Ecuador has been increasing and is gaining importance every day due to the depletion, contamination, or non-existence of surface sources. However, the hydrogeological information available in the country is incomplete, outdated, and dispersed, and there is a lack of strategies for managing subway water resources, starting with the process of legalization and regularization of formal and informal concessionaires. The objective of this study was to determine the potential groundwater areas in the Portoviejo River basin by applying the hierarchical analysis method

(AHP) based on geographic information system (GIS) and remote sensing with free access. From this analysis, the groundwater potential index (GWPI) was obtained, used to create the map of potential areas, which was compared with existing data in the inventory of water points. In the validation, effectiveness of 87 % was obtained for the resulting map, which has been influenced in greater degree by the permeability of the rock, the precipitation and the density of drainages, and in smaller proportion by the slope of the land and the normalized difference vegetation index (NDVI).

**Keywords:** AHP, groundwater, GWPI.

## **ESTIMATIVA DE POTENCIAIS ÁREAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA BACIA DO RIO PORTOVIEJO ATRAVÉS DE ANÁLISE HIERÁRQUICA BASEADA EM SIG E EM DETECÇÃO REMOTA**

### **RESUMO**

A utilização de águas subterrâneas no Equador vem aumentando e ganha importância todos os dias devido ao esgotamento, contaminação ou não existência de fontes superficiais. Contudo, a informação hidrogeológica disponível no país é incompleta, desatualizada e dispersa, e as estratégias de gestão dos recursos hídricos subterrâneos ainda não foram implementadas, começando com o processo de legalização e regularização dos concessionários formais e informais. O objetivo deste estudo foi determinar as potenciais áreas de águas subterrâneas na bacia do rio Portoviejo através da aplicação do método de análise hierárquica (AHP, de acordo com sua sigla em inglês) baseado em sistema de informação geográfica (SIG) e teledetecção com acesso livre. A partir dessa análise, foi obtido o índice de potencial das águas subterrâneas (GWPI, de acordo com sua sigla em inglês), utilizado para criar o mapa de áreas potenciais, que foi comparado com os dados existentes no inventário de pontos de água. Na validação, obteve-se uma eficácia de 87 % para o mapa resultante, o qual foi influenciado em maior grau pela permeabilidade da rocha, precipitação e densidade de drenagem, e em menor grau pela inclinação do terreno e pelo índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI, de acordo com sua sigla em inglês).

**Palavras chave:** água subterrânea, AHP, GWPI.

---

Citación sugerida: Chonlong, J., Pacheco, H. (2021). Estimación de zonas potenciales de aguas subterráneas en la cuenca del río Portoviejo mediante análisis jerárquico basado en sig y teledetección. Revista Bases de la Ciencia, 6(1), 1-18. DOI: [https://doi.org/10.33936/rev\\_bas\\_de\\_la\\_ciencia.v%vi%i.2648](https://doi.org/10.33936/rev_bas_de_la_ciencia.v%vi%i.2648) Recuperado de: <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Basedelaciencia/article/view/2648>

---

## 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas Ecuador ha incurrido en pérdidas de más de \$ 4 mil millones por causa de la sequía, una de las provincias más afectadas por este tipo de eventos es Manabí, con cuatro sequías en doce años desde 1988 (Zambrano Mera, 2020). Sumpsi et al. (1998) mencionaron que el agua subterránea continúa siendo la más efectiva respuesta unitaria contra la sequía. A pesar de ello, no debe perderse de vista que los acuíferos son una fuente no renovable a corto plazo, y que su uso masivo conduce inexorablemente a situaciones de mayor riesgo. La utilización del agua subterránea se ha venido incrementando (Morillo Ortiz, 2019) y cada día gana importancia debido al agotamiento, contaminación o no existencia de fuentes superficiales. No obstante, la información de agua subterránea de la cual dispone el país es incompleta, desactualizada y limitada (Camacho-López & Astudillo-Fernández, 2020).

Los recursos subterráneos en la cuenca del río Portoviejo no han sido cuantificados; sin embargo, se han explotado durante muchos años. Burbano et al. (2011) realizaron la determinación de zonas potencialmente acuíferas y áreas prioritarias para la explotación del recurso hídrico subterráneo en las cuencas de los ríos Portoviejo y Chone; pero concluyeron que, al estar fundamentado solamente en dos parámetros: levantamiento hidrogeológico e inventario de puntos de agua, la identificación de zonas acuíferas no era confiable; y por lo tanto, era una limitante para evaluar las reservas y potencial hidrogeológico de los diferentes sistemas acuíferos.

Existen abundantes investigaciones realizadas con base en la teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) como método de obtención de información, en ellos se ha abordado la determinación del potencial de aguas subterráneas. En India, diferentes autores han determinado la presencia de aguas subterráneas utilizando datos SIG e imágenes satelitales, como en el distrito de Purulia (Das et al., 2019), el distrito de Perambalur (Anbarasu et al., 2019) y en Maharashtra (Ajay Kumar et al., 2020). Trabajos similares se ejecutaron en Irán, donde, Naghibi et al. (2016), Rahmati et al. (2016), Mohammadi-Behzad et al. (2019) y Arabameri et al. (2019), determinaron en la cuenca de Koohrang, Mehran, la cuenca de Leylia–Keynow y la llanura de Shahroud, respectivamente, el potencial de aguas subterráneas. Oh et al. (2011) analizaron las relaciones entre la capacidad específica de agua subterránea y sus factores hidrológicos relacionados, para evaluar la sensibilidad de cada factor y establecer un mapa acerca del potencial de agua subterránea regional para el área de la ciudad de Pohang, Corea, utilizando SIG y una probabilidad modelo.

Hamdani & Baali (2020) y Benjmel et al. (2020), por su parte, desarrollaron una metodología multicriterio que combina varios factores para controlar la disponibilidad de los recursos hídricos



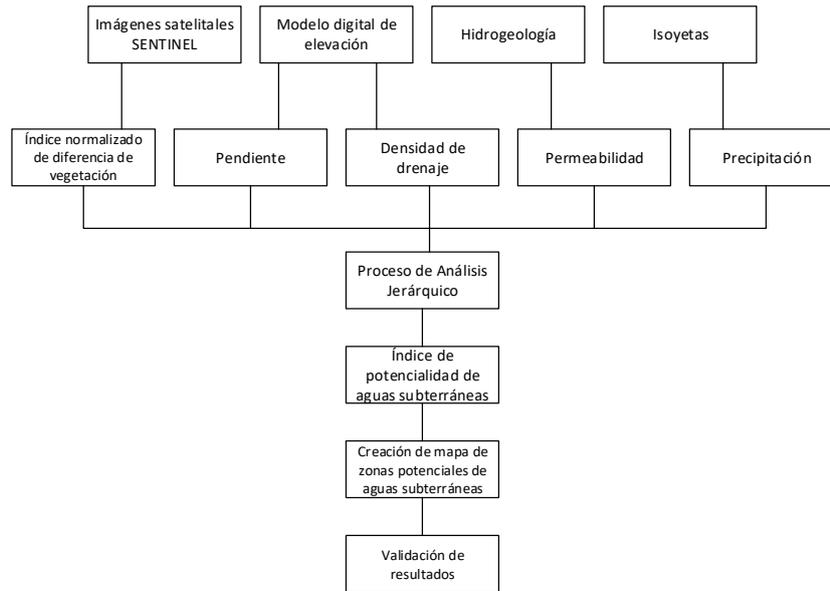
La cuenca del río Portoviejo pertenece a la demarcación hidrográfica Manabí ubicada al oeste de Ecuador, cubriendo una extensión aproximada de 11.500,68 km<sup>2</sup>, situada en el sexto lugar respecto al tamaño de las demarcaciones hidrográficas del Ecuador. Fue establecida y delimitada según el acuerdo 66-2010 de SENAGUA (2010), quien ejerce la planificación y gestión integrada de los recursos hídricos en el territorio nacional.

La cuenca del río Portoviejo tiene cerca de 320.000 habitantes (64 % urbana y 36 % rural), es considerada como una zona de elevada densidad poblacional (154 hab/km<sup>2</sup> vs. 47,4 hab/km<sup>2</sup> de la media nacional) (Neira et al., 2009). La actividad económica más importante es la agricultura, que ocupa a más del 50 % de la población económicamente activa. Un 52 % de las unidades de producción agropecuaria se dedican a la agricultura de subsistencia (Thielen et al., 2016), siendo el río Portoviejo la fuente de agua más substancial de Manabí, abasteciendo de agua a más de 600.000 personas en ciudades locales como Portoviejo, Santa Ana, Rocafuerte e incluso a otras fuera de su cuenca, como son Manta, Montecristi, Jaramijó y Jipijapa (Zevallos, 2015). Según Engelbertz et al. (2015) la cuenca aporta 1.590 hm<sup>3</sup>/año o el equivalente al 2 % nacional.

## 2.2. Bases de datos

Para la obtención de las zonas potenciales de aguas subterráneas, se utilizaron las siguientes capas temáticas: permeabilidad de la roca, precipitación de la lluvia, densidad de drenaje, pendiente del terreno e índice normalizado de diferencia de vegetación (*normalized difference vegetation index*, NDVI) (Macas-Espinosa & López-Escobar, 2018).

Las capas fueron pre-procesadas de acuerdo a su naturaleza, donde se aplicó el análisis de decisión multicriterio (MCDA, según sus siglas en inglés), mediante el proceso de análisis jerárquico (AHP, según sus siglas en inglés), de acuerdo a lo sugerido por Rahmati et al. (2015). A partir del índice de potencialidad de aguas subterráneas (GWPI, según sus siglas en inglés) obtenido, se construyó el mapa de zonas potenciales de aguas subterráneas en la cuenca del río Portoviejo. En la **Figura 2** se muestra el esquema de la metodología utilizada.



**Figura 2.** Metodología para la determinación de las zonas potenciales de agua subterránea de la cuenca del río Portoviejo. (El autor, 2020)

### 2.3. Generación de capas temáticas

Para la generación de la capa de permeabilidad de la roca, se obtuvo la disponibilidad de los recursos hidrogeológicos de la zona de estudio a partir del Sistema Nacional de Información (SNI). Asimismo, la capa de precipitación se construyó con los datos históricos de 30 años (1981-2010), descargados del portal del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). El modelo digital de elevación utilizado para la generación de las capas de densidad de drenajes y pendientes, fue provisto por el Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS), con una resolución de 4 m, pero trabajada a una resolución de 10 m. Por último, para la capa de NDVI se utilizaron las imágenes proporcionadas por el satélite SENTINEL de la zona de estudio, descargadas del portal del *U.S. Geological Survey*, a partir de las bandas números 4 y 8 que corresponden al rojo e infrarrojo cercano, respectivamente, aplicando la Ecuación 1:

$$NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red) \quad (1)$$

Donde: NDVI es el índice normalizado de diferencia de vegetación, NIR la banda infrarroja cercana y Red la Banda Roja.

### 2.4. Preparación del mapa de zonas potenciales de agua subterránea

Para la aplicación del MCDA, se utilizó el AHP, el cual permite proporcionar pesos normalizados para cada capa escogida. La jerarquía de cada capa se obtuvo mediante la escala de comparación (1-

9), establecida por Saaty (1980), la cual ha tomado como base los resultados de encuestas a expertos del tema de estudio.

Con la matriz de comparaciones pareadas, se calculó el peso normalizado (W) para cada capa temática, el cual se consiguió dividiendo el valor de cada celda para la suma de la columna, y luego se calculó la media de cada fila. Para verificar la validez de los pesos normalizados obtenidos, se calculó la relación de consistencia (CR) (Saaty, 1980), de acuerdo con la Ecuación 2:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

Donde: RI es un índice aleatorio de consistencia que depende del orden de la matriz, en este caso para el orden  $n=5$ ,  $RI=1,12$  (Saaty, 1980), y CI es el índice de consistencia, el cual puede ser expresado utilizando la Ecuación 3:

$$CI = \frac{(\lambda_{max}-n)}{n-1} \quad (3)$$

Donde:  $n$  es el orden de la matriz, en este caso  $n=5$ , y  $\lambda_{max}$  es el mayor valor propio de la matriz. El valor de CR debe ser menor que 0,10; para que los pesos normalizados sean consistentes.

## 2.5. Índice de potencialidad de aguas subterráneas

Las categorías de cada capa se jerarquizaron para calcular su peso normalizado (Rahmati et al., 2015). De acuerdo con Çelik (2019), el GWPI es una magnitud adimensional formada por la suma de los pesos relativos,  $W$  y  $W_f$ , de los parámetros que afectan al potencial de las aguas subterráneas. Este coeficiente se obtuvo calculando los pesos de los criterios que conformaban el potencial de las aguas subterráneas, por el método MCDA basado en AHP y SIG.

El GWPI se evaluó mediante una combinación lineal ponderada, tal como se indica en la Ecuación 4 (Ajay Kumar et al., 2020):

$$GWPI = \sum_{i=1}^n \sum_{w=1}^m (W_i X_j) \quad (4)$$

Donde:  $W_i$  es el peso normalizado de la capa temática  $j$ ,  $X_j$  es el valor de rango de cada clase con respecto a la capa  $j$ ,  $m$  es el número total de capas temáticas, y  $n$  es el número total de clases en una capa temática. Para el presente caso de estudio la Ecuación 5 queda de la siguiente manera:

$$GWPI = Pm_W Pm_{w_f} + Pr_W Pr_{w_f} + Dd_W Dd_{w_f} + Pt_W Pt_{w_f} + NDVI_W NDVI_{w_f} \quad (5)$$

Donde:  $W$  corresponde al peso normalizado obtenido para cada capa temática, y  $w_f$  es el peso normalizado para cada categoría en cada capa temática.

## **2.6. Generación y validación del mapa de zonas potenciales**

Todas las capas temáticas fueron procesadas en el modelo de datos raster, a una resolución espacial de 10 m, las cuales fueron reclasificadas de acuerdo a su peso normalizado, para finalmente calcular el GWPI mediante la combinación lineal ponderada en la calculadora raster. Los valores de GWPI fueron agrupados en 5 categorías, utilizando el método de clasificación por cuantiles (Rahmati et al., 2015): muy alto, alto, moderado, bajo y muy bajo.

Para la validar el mapa GWPI, se determinó la efectividad de los resultados, utilizando la ubicación geográfica del inventario de puntos de agua generado por el INAMHI, obtenidos mediante la recopilación y análisis de información relacionada a la hidrogeología subterránea (Burbano et al., 2015). Se realizó un análisis de superposición espacial y se obtuvo el valor del GWPI para cada punto de agua, y se cuantificó el número de puntos de agua y el porcentaje por cada categoría del GWPI. La efectividad se calculó sumando los porcentajes de las categorías muy alto, alto y moderado.

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **3.1. Mapas de capas temáticas de la cuenca del río Portoviejo**

#### **3.1.1. Permeabilidad de la roca**

Tomando en cuenta la litología y la densidad de lineamientos, la permeabilidad fue clasificada de acuerdo a la información provista por el INAMHI, generando la capa de permeabilidad como se observa en la **Figura 3**, donde se muestra que las permeabilidades alta, media e impermeable predominan en la zona de estudio. De acuerdo con Ayazi et al. (2010), la litología influye tanto en la porosidad como en la permeabilidad de las rocas acuíferas.

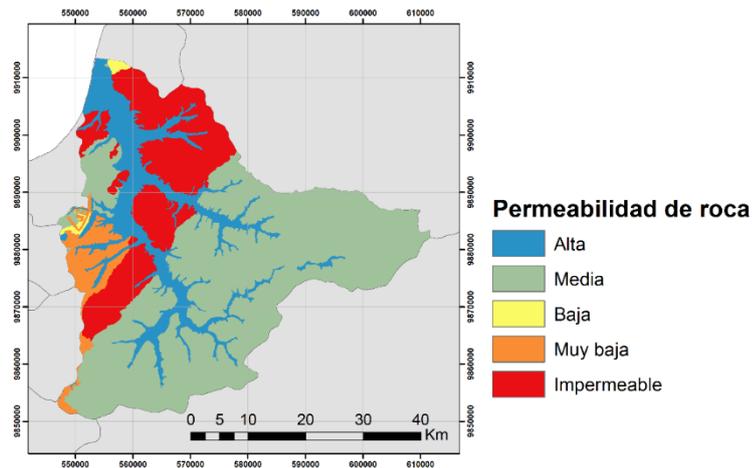


Figura 3. Mapa de permeabilidad de la roca de la cuenca del río Portoviejo. (El autor, 2020)

### 3.1.2. Precipitación

La precipitación media anual de la zona de estudio, con una serie de datos correspondiente a un período de 30 años (1981-2010), presenta una variación entre 250 a 1.500 mm, teniendo una mayor acentuación de lluvia al sureste de la cuenca. En la **Figura 4** se muestra el mapa generado con los datos, clasificados en 5 categorías de rangos.

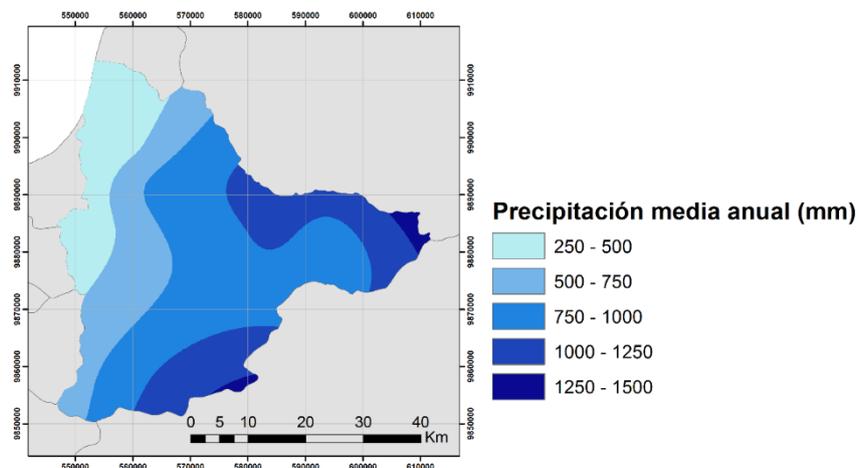
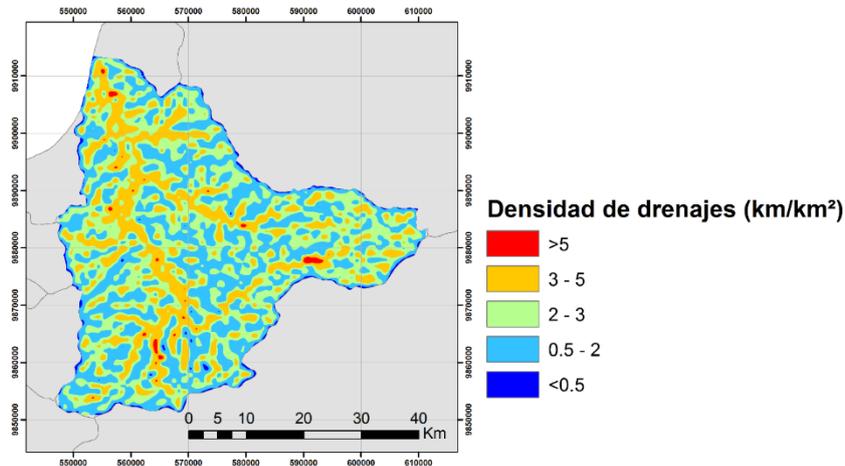


Figura 4. Mapa de precipitación de la cuenca del río Portoviejo elaborado a partir de datos históricos de precipitación. (El autor, 2020)

### 3.1.3. Densidad de drenajes

La densidad del drenaje se clasificó de acuerdo a los criterios de Mandviwala et al. (2016):  $<0,5$ ;  $0,5-2$ ;  $2-3$ ;  $3-5$  y  $>5$ . El área de estudio está caracterizada por una densidad de drenaje de entre  $0,5$  y  $3$   $\text{km}/\text{km}^2$ . De acuerdo con Agarwal & Garg (2016), las densidades más altas indican una baja

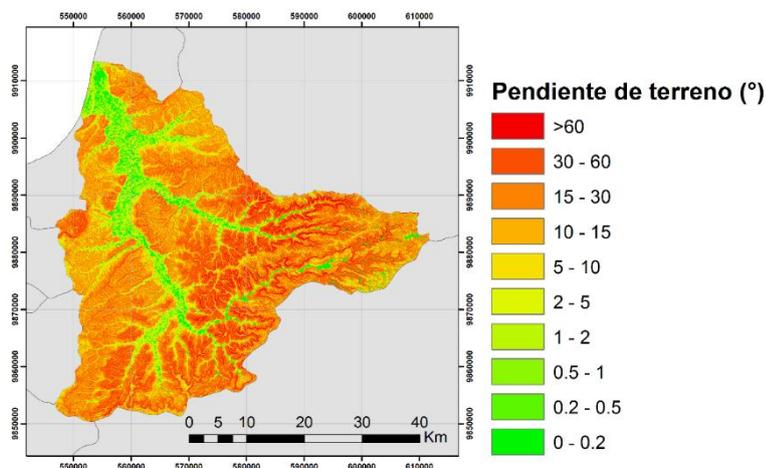
probabilidad de presencia de agua subterránea, por lo tanto, los pesos más altos fueron asignados a la densidad de drenaje más baja. Por el contrario, las zonas con una baja densidad producen una mayor infiltración y disminuyen la escorrentía superficial. En la **Figura 5** se muestra la densidad de drenaje de la zona de estudio.



**Figura 5.** Mapa de densidad de drenajes de la cuenca del río Portoviejo a partir del modelo digital de elevación. (El autor, 2020)

### 3.1.4. Capa de pendiente de terreno

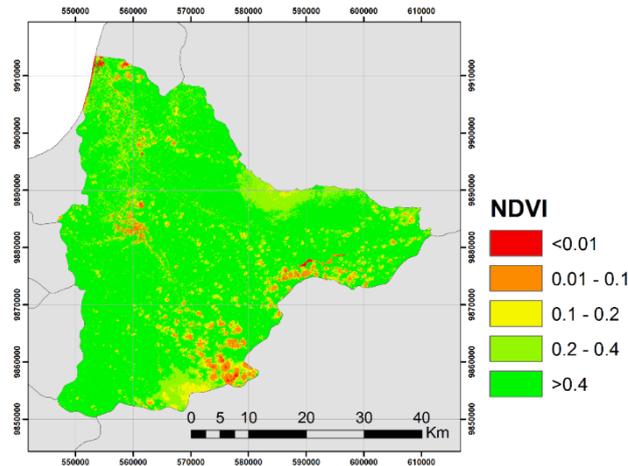
El mapa de pendientes del terreno del área de estudio se muestra en la **Figura 6**. La pendiente del área de estudio varió de 0 a >60°, clasificados de acuerdo con los criterios de Vargas-Rojas (2009). En general, se aprecia que en la cuenca prevalecen pendientes altas. Además, el ángulo de la pendiente es un factor importante en el proceso de recarga (Macas-Espinosa & López-Escobar, 2018), siendo las zonas con menos pendiente las más idóneas para la recarga de aguas subterráneas (Rahmati et al., 2015).



**Figura 6.** Mapa de pendiente de terreno de la cuenca del río Portoviejo a partir del modelo digital de elevación. (El autor, 2020)

### 3.1.5. Capa de índice de vegetación de diferencia normalizada

En el mapa presentado en la **Figura 7**, se muestra el NDVI clasificado en 5 categorías, de acuerdo a lo establecido por López-Pérez et al. (2015). Los valores más altos de NDVI corresponden a las zonas con mayor densidad de vegetación, y se asocian con una acumulación de mayor humedad en el suelo.



**Figura 7.** Mapa de NDVI de la cuenca del río Portoviejo. (El autor, 2020)

### 3.2. Asignación de pesos normalizados

La jerarquía de cada capa temática se presenta en la **Tabla 1**, obteniéndose luego W para cada una, con la matriz de comparaciones pareadas (**Tabla 2**).

**Tabla 1.** Matriz de comparaciones pareadas para el proceso AHP. (El autor, 2020)

Capa	Permeabilidad de la roca	Precipitación	Densidad de drenajes	Pendiente del terreno	Índice de vegetación de diferencia normalizada
Permeabilidad de la roca	1	2	5	6	8
Precipitación	1/2	1	3	3	5
Densidad de drenajes	1/5	1/3	1	4	6
Pendiente del terreno	1/6	1/3	1/4	1	3
Índice de vegetación de diferencia normalizada	1/8	1/5	1/6	1/3	1
<b>SUMA DE COLUMNAS</b>	<b>1,99</b>	<b>3,87</b>	<b>9,42</b>	<b>14,33</b>	<b>23,00</b>

**Tabla 2.** Determinación de los pesos normalizados para cada capa temática. (El autor, 2020)

Capa	Pm	Pr	Dd	Pt	NDVI	W
<b>Pm</b>	1/1,99=0,502	2/3,87=0,517	5/9,42=0,531	6/14,33=0,419	8/23,00=0,348	<b>(0,502+0,517+0,531+0,419+0,348)/5=0,463</b>
<b>Pr</b>	0,251	0,259	0,319	0,209	0,217	<b>0,251</b>
<b>Dd</b>	0,100	0,086	0,106	0,279	0,261	<b>0,167</b>
<b>Pt</b>	0,084	0,086	0,027	0,070	0,130	<b>0,079</b>
<b>NDVI</b>	0,063	0,052	0,018	0,023	0,043	<b>0,040</b>

Pm: permeabilidad de la roca. Pr: precipitación. Dd: densidad de drenaje. Pt: pendiente de terreno. NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada. W: peso normalizado de cada capa temática.

La CR de los pesos normalizados fue de 0,08, lo cual indica que la relación de consistencia fue satisfactoria, y que los pesos normalizados fueron consistentes (Saaty, 1980).

### 3.3. Pesos normalizados para las capas temáticas

Las categorías de cada capa se muestran en la **Tabla 3**, cuyos valores representan el rango de importancia de clasificación de cada capa.

**Tabla 3.** Pesos normalizados de las capas temáticas. (El autor, 2020)

Capa	Categoría	Posición	wf
<b>Pm</b>	Impermeable	1	1/15=0,067
	Muy baja	2	2/15=0,133
	Baja	3	3/15=0,200
	Media	4	4/15=0,267
	Alta	5	5/15=0,333
<b>Pr</b>	250 – 500	1	1/15=0,067
	500 – 750	2	2/15=0,133
	750 – 1.000	3	3/15=0,200
	1.000 – 1.250	4	4/15=0,267
	1.250 – 1.500	5	5/15=0,333

**Continuación Tabla 3.** Pesos normalizados de las capas temáticas. (El autor, 2020)

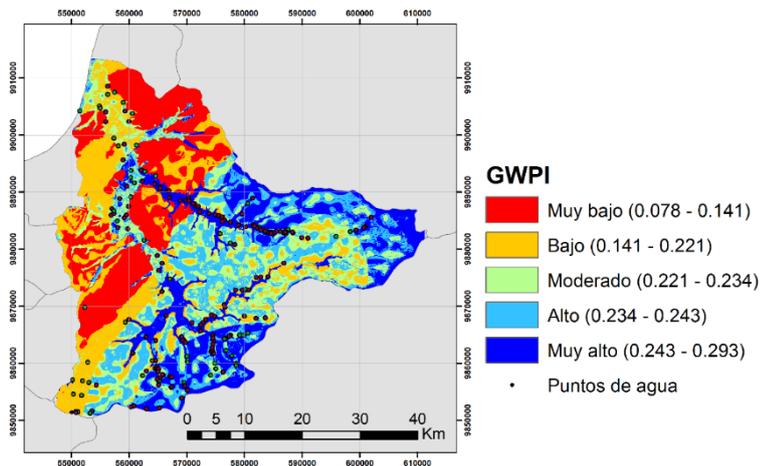
Capa	Categoría	Posición	wf
<b>Dd</b>	>5	1	1/15=0,067
	3 – 5	2	2/15=0,133
	2 – 5	3	3/15=0,200
	0,5 – 2	4	4/15=0,267
	<0,5	5	5/15=0,333
<b>Pt</b>	>60	1	1/55=0,018
	30 – 60	2	2/55=0,036
	15 – 30	3	3/55=0,055
	10 – 15	4	4/55=0,073
	5 – 10	5	5/55=0,091
	2 – 5	6	6/55=0,109
	1 – 2	7	7/55=0,127
	0,5 – 1	8	8/55=0,145
	0,2 – 0,5	9	9/55=0,164
	0 – 0,2	10	10/55=0,182
<b>NDVI</b>	<0,01	1	1/15=0,067
	0,01 – 0,1	2	2/15=0,133
	0,1 – 0,2	3	3/15=0,200
	0,2 – 0,4	4	4/15=0,267
	>0,4	5	5/15=0,333

Pm: permeabilidad de la roca. Pr: precipitación. Dd: densidad de drenaje. Pt: pendiente de terreno. NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada. wf: peso normalizado de cada categoría de capa temática.

### 3.4. Mapa de zonas potenciales de aguas subterráneas de la cuenca del río Portoviejo

En la **Figura 8** se muestra el mapa de zonas potenciales de agua subterránea del área de estudio, basado en las cinco capas temáticas, donde se observa que las áreas de muy alta y alta potencialidad se encuentran en zonas de alta y media permeabilidad, influenciadas por la precipitación y la baja

densidad de drenajes, siendo estas la cuenca alta y el cauce del río Portoviejo. Así mismo, las zonas de baja y muy baja potencialidad se corresponden con la litología considerada como impermeable y muy baja. El mapa presentado no muestra la cantidad de agua subterránea en la cuenca del río Portoviejo, sino la posible existencia de agua subterránea sin considerar la abundancia existente en el área de estudio, es decir, en las zonas donde el GWPI es muy alto mayor probabilidad que exista agua subterránea que en las zonas con GWPI muy bajo.



**Figura 8.** Mapa de zonas potenciales de agua subterráneas de la cuenca del río Portoviejo. (El autor, 2020)

### 3.5. Validación del mapa resultante

En la cuenca de río Portoviejo existen 209 puntos de agua (Burbano et al., 2015), de los cuales, 180 se encuentran en zonas de muy alto, alto y moderado potencial, mientras que los 29 puntos de agua restantes, se encuentran en zonas de baja y muy baja potencialidad de aguas subterráneas. Esta información indica una efectividad del 87 % para el mapa de zonas potenciales de aguas subterráneas de la cuenca del río Portoviejo del presente trabajo. La **Tabla 4** muestra el número y el porcentaje de la categorización de los puntos de agua a partir del mapa resultante.

Los resultados son comparables a los reportados en otros estudios. Ajay Kumar et al. (2020) en Maharashtra, India, obtuvieron una efectividad del 84 %; Mohammadi-Behzad et al. (2019) obtuvieron un 79 % de validez de los resultados para la cuenca Leylia-Keynow, Irán, mientras que en Ecuador, Macas-Espinosa & López-Escobar (2018), lograron una efectividad de 70 % en la demarcación hidrográfica Puyango Catamayo. De esta manera, puede decirse que el método aplicado mostró una alta efectividad para la estimación de las zonas potenciales de agua subterránea.

**Tabla 4.** Número y porcentaje de puntos de agua por GWPI. (El autor, 2020)

<b>Rango GWPI</b>	<b>Categoría</b>	<b>Puntos de agua</b>	<b>Porcentaje (%)</b>	<b>Porcentaje acumulado (%)</b>
>0,243	Muy alto	87	42	42
0,234-0,243	Alto	33	16	58
0,221-0,234	Moderado	60	29	87*
0,141-0,221	Bajo	22	10	97
0,078-0,141	Muy bajo	7	3	100
<b>Total</b>		<b>209</b>	<b>100</b>	

GWPI: índice de potencialidad de aguas subterráneas.

\* Porcentaje de efectividad.

Los resultados del presente estudio podrían considerarse como información relevante en la gestión del recurso hídrico de la cuenca del río Portoviejo, constituyendo una primera aproximación a investigaciones más profundas sobre la determinación de acuíferos dentro del área en cuestión, y como ejemplo para nuevos abordajes en diferentes cuencas del país. Todo esto considerando los resultados obtenidos en el índice de efectividad, donde se muestra una clara validez del método para la determinación de zonas con potencial de explotación de agua subterránea.

#### 4. CONCLUSIONES

En este estudio, se utilizó el AHP basado en SIG y teledetección para generar el mapa de zonas potenciales de aguas subterráneas de la cuenca del río Portoviejo. Los resultados indican que estas zonas están controladas principalmente por la permeabilidad de la roca, la precipitación y la densidad de drenajes. El mapa de zonas potenciales de agua subterránea muestra que en la cuenca alta y en el cauce del río Portoviejo (GWPI alto y muy alto) existen mayor posibilidad de existencia de agua subterránea que en la cuenca baja (GWPI bajo y muy bajo). El mapa resultante no proporciona información respecto a la abundancia de agua subterráneas, únicamente muestra la posible existencia de ella. La validación de los resultados demostró que el AHP tuvo una efectividad del 87 % en la predicción de las zonas potenciales de agua subterránea. Por lo tanto, sobre la base de los resultados de esta investigación y la efectividad del mapa de zonas potenciales de aguas subterráneas, puede concluirse que la metodología aplicada, junto con los parámetros utilizados, es un marco útil para la evaluación rápida del potencial de las aguas subterráneas, pudiéndose recomendar su aplicación en otras zonas, especialmente en áreas con escasez de datos.

#### 5. REFERENCIAS

- Agarwal, R., & Garg, P. (2016). Remote sensing and GIS based groundwater potential & recharge zones mapping using multi-criteria decision making technique. *Water resources management*, 30(1), 243-260. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1159-8>
- Ajay Kumar, V., Mondal, N. C. & Ahmed, S. (2020). Identification of groundwater potential zones using RS, GIS and AHP techniques: a case study in a part of Deccan volcanic province (DVP), Maharashtra, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48, 497–511. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01086-3>
- Anbarasu, S., Brindha, K., & Elango, L. (2019). 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>
- Arabameri, A., Rezaei, K., Cerda, A., Lombardo, L., & Rodrigo-Comino, J. (2019). GIS-based groundwater potential mapping in Shahroud plain, Iran. A comparison among statistical (bivariate and multivariate), data mining and MCDM approaches. *Science of the Total Environment*, 658, 160-177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.115>
- Ayazi, M. H., Pirasteh, S., Arvin, A., Pradhan, B., Nikouravan, B., & Mansor, S. (2010). Disasters and risk reduction in groundwater: Zagros Mountain Southwest Iran using geoinformatics techniques. *Disaster Adv*, 3(1), 51-57.
- Benjmel, K., Amraoui, F., Boutaleb, S., Ouchchen, M., Tahiri, A., & Touab, A. (2020). Mapping of Groundwater Potential Zones in Crystalline Terrain Using Remote Sensing, GIS Techniques, and Multicriteria Data Analysis (Case of the Ighrem Region, Western Anti-Atlas, Morocco). *Water*, 12(2), 471. <https://doi.org/10.3390/w12020471>
- Burbano, N., Becerra, S., & Pasquel, E. (2011). *Caracterización Hidrogeológica de las Cuencas Portoviejo - Chone*. Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología. Quito, Ecuador.
- Burbano, N., Becerra, S., & Pasquel, E. (2015). *Introducción a la Hidrogeología del Ecuador*. Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología. Quito, Ecuador.
- Camacho-López, C. O. & Astudillo-Fernández, V. M. (2020). Evaluación del aprovechamiento empírico del agua subterránea somera del cantón Morona-Ecuador. *Dominio de las Ciencias*, 6(2), 460-473.
- Çelik, R. (2019). Evaluation of Groundwater Potential by GIS-Based Multicriteria Decision Making as a Spatial Prediction Tool: Case Study in the Tigris River Batman-Hasankeyf Sub-Basin, Turkey. *Water*, 11(12), 1-16. <https://doi.org/10.3390/w11122630>
- Das, B., Pal, S. C., Malik, S., & Chakraborty, R. (2019). Modeling groundwater potential zones of Puruliya district, West Bengal, India using remote sensing and GIS techniques. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 3(3), 223-237. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1555740>
- Engelbertz, D. T., Zambrano, J. C., Cedeño, T. E., Alfaro, S. Z., Pico, J. F., Delgado, J. Q., Melendez, N. M., Castro, G. V., & Cárdenas, M. P. (2015). Dinámica de los eventos climáticos extremos en la cuenca del río Portoviejo, Manabí, Ecuador. *La Técnica: Revista de las Agrociencias*, 14, 80-91. [https://doi.org/10.33936/la\\_tecnica.v0i14.585](https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i14.585)
- Escobar, J., Betancur, T., García, E., Martínez, C., & Palacio, P. (2017). Análisis jerárquico ponderado aplicado a la identificación de recarga y flujos regionales en acuíferos. *Revista Politécnica*, 13(24), 37-48. <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1089>
- Hamdani, N., & Baali, A. (2020). Characterization of groundwater potential zones using analytic hierarchy process and integrated geomatic techniques in Central Middle Atlas (Morocco). *Applied Geomatics*, 12, 323–335. <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00300-z>
- López-Pérez, A., Martínez-Menes, M. R., & Fernández-Reynoso, D. S. (2015). Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 121-137.
- Macas-Espinosa, V. X., & López-Escobar, K. F. (2018). Potencial para la exploración de aguas subterráneas en la Demarcación Hidrográfica Puyango Catamayo, Ecuador, utilizando un proceso de análisis jerárquico basado en SIG y teledetección. *Revista de Teledetección*, 51, 135-145. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.7592>
- Mandviwala, M. D., Joshi, G. S., & Prakash, I. (14-15 de octubre de 2016). *Assessment of impact of the flood causative factors for flood vulnerability in lower Tapi river basin using GIS and remote sensing* [Discurso principal]. National Conference on Water Resources & Flood Management with special reference to Flood Modelling. Surat, India.
- Mohammadi-Behzad, H., Charchi, A., Kalantari, N., Nejad, A. M., & Vardanjani, H. K. (2019). Delineation of groundwater potential zones using remote sensing (RS), geographical information system (GIS) and analytic

- hierarchy process (AHP) techniques: a case study in the Leylia–Keynow watershed, southwest of Iran. *Carbonates and Evaporites*, 34(4), 1307-1319. <https://doi.org/10.1007/s13146-018-0420-7>
- Morillo Ortíz, M. R. (2019). *Sistema de manejo integrado de recursos hídricos naturales de la ciudad del conocimiento Yachay-Ecuador* [Tesis de Maestría, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Digital - Universidad Técnica del Norte.
- Naghibi, S. A., Pourghasemi, H. R., & Dixon, B. (2016). GIS-based groundwater potential mapping using boosted regression tree, classification and regression tree, and random forest machine learning models in Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 188(1), 1-27. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5049-6>
- Neira, D., Alarcón, F., Vicuña, S., Vega, R., García, M., Poma, J., & Pabón, C. (2009). *Estudio de vulnerabilidad actual a los riesgos climáticos en el sector de los recursos hídricos en las cuencas de los Ríos Paute, Jubones, Catamayo, Chone, Portoviejo y Babahoyo*. Ministerio del Ambiente. Quito, Ecuador.
- Oh, H.-J., Kim, Y.-S., Choi, J.-K., Park, E., & Lee, S. (2011). GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology*, 399(3-4), 158-172. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.027>
- Rahmati, O., Nazari Samani, A., Mahdavi, M., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H. (2015). Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(9), 7059-7071. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1668-4>
- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Melesse, A. M. (2016). Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: a case study at Mehran Region, Iran. *Catena*, 137, 360-372. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.010>
- Saaty, T. L. (Ed.) (1980). *The analytic hierarchy process, planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill International Book Company.
- SENAGUA. (2010). Acuerdo ministerial 66: Establece y delimita las nueve demarcaciones hidrográficas en tanto unidades administrativas desconcentradas en lo administrativo y financiero. Secretaría Nacional del Agua, Ecuador. 20 de enero de 2010.
- Sumpsi, J. M., Garrido, A., Blanco, M., Varela, C., & Iglesias, E. (1998). *Economía y política de gestión del agua en la agricultura*. Mundi-Prensa Madrid.
- Thielen, D., Cevallos, J., Erazo, T., Zurita, I., Figueroa, J., Velásquez, G., Matute, N., Quintero, J., & Puche, M. L. (2016). Dinámica espacio-temporal de las precipitaciones durante el evento de El Niño 97/98 en la cuenca de río Portoviejo, Manabí, costa ecuatoriana del Pacífico. *Revista de climatología*, 16, 35-50.
- Vargas-Rojas, R. (2009). *Guía para la descripción de suelos (No. FAO 631.44 G943 2009)*. FAO. Roma, Italia.
- Zambrano Mera, Y. E. (2020). *Determinación de medidas de gestión de sequías en climas tropicales. Aplicación a la Demarcación Hidrográfica de Manabí-Ecuador* [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Institucional UPV.
- Zevallos, O. (2015). *Proyecto gestión del riesgo ENSO en América latina. Investigación comparativa, información y capacitación desde una perspectiva social*. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

#### Contribución de autores

Autor	Contribución
Jorge Chonlong	Concepción y diseño, redacción del artículo, adquisición de datos, análisis e interpretación, metodología, revisión del artículo, validación, búsqueda bibliográfica, búsqueda de información, aplicación de software estadístico.
Henry Pacheco	metodología, revisión del artículo, validación.