

CASO PRÁCTICO

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

Macas-Espinosa, V. X.*, López-Escobar, K. F.

Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil, Av. Raúl Gómez Lince s/n y Av. Juan Tanca Marengo, Guayaquil, Ecuador.

Resumen: El objetivo de este estudio es aplicar técnicas de sistemas de información geográfica y teledetección para cartografiar áreas potenciales para la exploración de aguas subterráneas en la Demarcación Hidrográfica Puyango Catamayo, a partir de insumos de datos gratuitos. Los datos primarios de la investigación son un modelo digital de elevaciones, imágenes de satélite, la distribución espacial de la lluvia y las características geológicas de la zona. La metodología que se aplica está basada en el Análisis de Decisión Multicriterio mediante un Proceso de Análisis Jerárquico, que toma como capas temáticas de análisis: la permeabilidad de la roca, la precipitación de la lluvia, la densidad de drenajes, la pendiente del terreno y el índice de vegetación de diferencia normalizado. A partir del análisis se obtiene el índice de potencial de aguas subterráneas, utilizado para la creación del mapa de potencial de aguas subterráneas. El mapa resultante es comparado con los datos existentes en el inventario de puntos de agua, generado por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Ecuador. En la validación de la efectividad del método mediante el análisis de los resultados se obtiene que un 30% de los puntos de agua se encuentra en zonas no favorables para la exploración de aguas subterráneas, mientras que el 70% se encuentra en zonas favorables.

Palabras clave: MCDA, AHP, GWPI, Puyango Catamayo, agua subterránea.

Potential areas for groundwater exploration in the Puyango Catamayo Hydrographic Demarcation, Ecuador, using a analytic hierarchy process based on GIS and remote sensing

Abstract: The objective of this study is to apply geographic information systems and remote sensing techniques to map potential areas for groundwater exploration in the Puyango Catamayo hydrographic demarcation, based on free input data. The research's primary data are a digital elevation model, satellite images, regional geology and rainfall. From the methodological point of view, Multi-Criteria Decision Analysis is applied, using an Analytic Hierarchy Process, which takes as thematic layers the rock permeability, the rainfall, the drainage density, the terrain slope, and the normalized difference vegetation index. Thus, the Groundwater Potential Index is obtained, which is used to map potential areas for groundwater exploration. The resulting map is compared with the existing data of the water point

To cite this article: Macas-Espinosa, V. X., López-Escobar, K. F. 2018. Potential areas for groundwater exploration in the Puyango Catamayo Hydrographic Demarcation, Ecuador, using a analytic hierarchy process based on GIS and remote sensing. *Revista de Teledetección*, 51, 135-145. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.7592>

* Corresponding author: vinicio.macase@ug.edu.ec

inventory, generated by the Ecuador's National Institute of Meteorology and Hydrology. Data validation by this method shows that 30% of the water points are located in areas not suitable for groundwater exploration, while 70% are in favorable areas.

Key words: MCDA, AHP, GWPI, Puyango Catamayo, groundwater.

1. Introducción

El déficit hídrico de la Demarcación Hidrográfica Puyango Catamayo (DHPC) es un fenómeno natural que afecta en cada etapa de verano a los campesinos y de manera especial a los usos consuntivos de agricultura y consumo humano. Incluso, debido a la escasez del líquido vital en los últimos años se ha activado el Comité de Operaciones de Emergencia (COE), de manera especial, en los cantones Zapotillo y Paltas (Valle de Casanga) de la Provincia de Loja. En Octubre del 2016, construyeron un pozo de agua, mediante convenio interinstitucional, en la parroquia Paletillas (Barrio Guayuro) del Cantón Zapotillo; con una profundidad de 120 metros y obtuvieron 3 litros/segundo las 24 horas del día (Crónica, 2016), ayudando al abastecimiento de la localidad. López (1999) presentó un mapa a escala 1:250.000 identificando áreas de interés a prospectar aguas subterráneas en esta demarcación hidrográfica, utilizó imágenes de satélite Landsat TM y reconocieron la permeabilidad secundaria como el factor importante en este sector. Así también Mendoza-Nolrbe y Rojas-Acuña (2013), realizaron estudios en la costa norte del Perú, en la región de Lambayaque y reconocieron lugares óptimos para explorar aguas subterráneas, utilizaron imágenes Landsat ETM+ y ASTER GDEM; los resultados fueron correlacionados con pozos de aguas subterráneas y manejando errores de hasta 29%. Con respecto a la problemática de la zona de estudio, el término "Potencialidad de Agua Subterránea" ha sido definido como la posibilidad de existencia de aguas subterráneas en la zona de estudio, así como indican Razandi *et al.* (2015). Jha *et al.* (2010) establecen que para la determinación del potencial se utilizan métodos tradicionales mediante perforaciones que son demasiado costosos, consumen tiempo y requieren profesionales expertos. Por otro lado hay investigadores que han establecido el uso del Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA, por sus siglas en inglés) como una herramienta efectiva para la gestión de recursos de agua subterránea (Jha *et al.*, 2010;

Madrucci *et al.*, 2008). De acuerdo a Razandi *et al.* (2015) las zonas potenciales para la explotación de aguas subterráneas pueden ser obtenidas utilizando el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP por sus siglas en inglés), el cual es de fácil realización y por lo tanto ampliamente aplicado, especialmente en países en desarrollo y de bajos ingresos económicos. Estos autores también indican que los mapas de zonas potenciales para la exploración de aguas subterráneas pueden ser utilizados como insumo para la planificación del manejo de las aguas subterráneas, esto como parte de la gestión integral de los recursos hídricos. Así también Teeuw (1995) evalúa la ventaja económica de usar imágenes de satélite y sistemas de información geográfica (SIG) para obtener áreas de prospección de aguas subterráneas, usando las propiedades de permeabilidad primaria de las rocas, quien verificó sus datos con sondeos geofísicos y perforaciones en Ghana.

Este trabajo tiene como objeto obtener un mapa de las zonas potenciales para la prospección de aguas subterráneas utilizando información geográfica accesible de forma gratuita como lo son las imágenes de satélite Landsat 8, un modelo digital de elevaciones e información geográfica disponible en el sistema nacional de información del Ecuador (SNI – www.sni.gob.ec).

1.1. Área de estudio

El área de estudio es la Demarcación Hidrográfica Puyango Catamayo (DHPC), que está ubicada al suroeste del Ecuador continental, abarcando las cuencas hidrográficas transfronterizas de los ríos Puyango y Catamayo. La delimitación hidrográfica es la establecida por la Secretaría del Agua (SENAGUA, 2010), institución rectora de los recursos hídricos en el Ecuador, quien ha dividido el territorio nacional en nueve demarcaciones hidrográficas. La Figura 1 representa el mapa de ubicación del área de estudio, que ha sido realizado sobre el datum WGS-84.

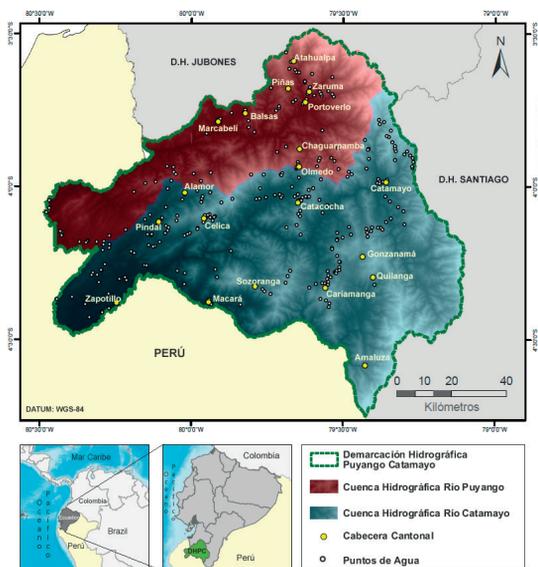


Figura 1. Área de Estudio - Demarcación Hidrográfica Puyango Catamayo (DHPC).

La DHPC tiene una superficie de 10869 km² (SENAGUA, 2010), existiendo cotas entre 109 y 3800 m.s.n.m., comprendiendo gran parte de la provincia de Loja, desde Catamayo hasta los cantones Zapotillo y Macará, en el límite con la República del Perú; y además abarca una parte de la provincia de El Oro, con los cantones Zaruma, Portovelo, Piñas, Atahualpa, y en pequeña proporción Balsa y Marcabell.

Las precipitaciones de lluvia en la demarcación hidrográfica presentan marcadas variaciones en el espacio y el tiempo. En las cuencas bajas los periodos lluviosos son cortos y escasos; alcanzado precipitaciones medias anuales entre 500 y 750 mm. Las precipitaciones medias anuales son de 1000 a 2500 mm para la cuenca media del río Puyango y de 1000 a 1500 mm para la cuenca media del río Catamayo (Rumazo, 2002). En las cuencas altas, las precipitaciones medias anuales son superiores a 2000 mm. En general la cuenca del río Catamayo recibe menos precipitación que la cuenca del río Puyango.

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) dispone del inventario de 5486 puntos de agua (Burbano *et al.*, 2015), de los cuales 288 se encuentran en la zona de estudio.

Las unidades litológicas que predominan en el área de estudio son volcánicas extrusivas, es decir, las formadas por erupciones sobre la corteza; y las intrusivas formadas por debajo de la superficie terrestre, entre estas están la Formación Geológica Piñón del Cretácico y cuerpos graníticos. Estas unidades carecen de permeabilidad primaria, es decir, no permiten el paso y almacenamiento de fluidos como el agua. Por otro lado, estas unidades litológicas pueden tener permeabilidad secundaria, es decir son afectadas por fisuras (diaclasas y/o fallas) que permiten la percolación de fluidos. En el sector también hay litología sedimentaria y metamórfica, ambas con la capacidad de permitir el paso de líquidos, con la ventaja de que la primera tiene la capacidad de almacenarla, si acaso se reconociera conglomerados o bancos de arena. En este sector es escaso encontrar este tipo de combinación por la predominancia de actividad volcánica que registra la geología. Pero la combinación de ambas permeabilidades permite reconocer regiones o áreas con capacidad de retener agua.

2. Datos y métodos

Para la obtención de las zonas potenciales a explotación de aguas subterráneas se utilizaron las siguientes capas temáticas, ordenadas jerárquicamente de mayor a menor influencia en los resultados: la permeabilidad de la roca, la precipitación de la lluvia, la densidad de drenaje, la pendiente del terreno y el índice *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Las variables fueron pre-procesadas de acuerdo a su naturaleza y sobre ellas se aplicó el método MCDA mediante AHP, cuya aplicación a este tipo de estudios es explicada de forma clara por Rahmati *et al.* (2015). El mapa resultante es realizado a partir de la obtención del Índice de Potencialidad de Aguas Subterráneas (GWPI, por sus siglas en inglés). La Figura 2 muestra un diagrama de la metodología utilizada.

2.1. Generación de la base de datos

Los insumos de datos primarios son la información geográfica de la geología, y la precipitación anual acumulada de la zona de estudio, obtenidas del SNI. Además se utilizó el modelo digital de elevaciones ASTER GDEM V2

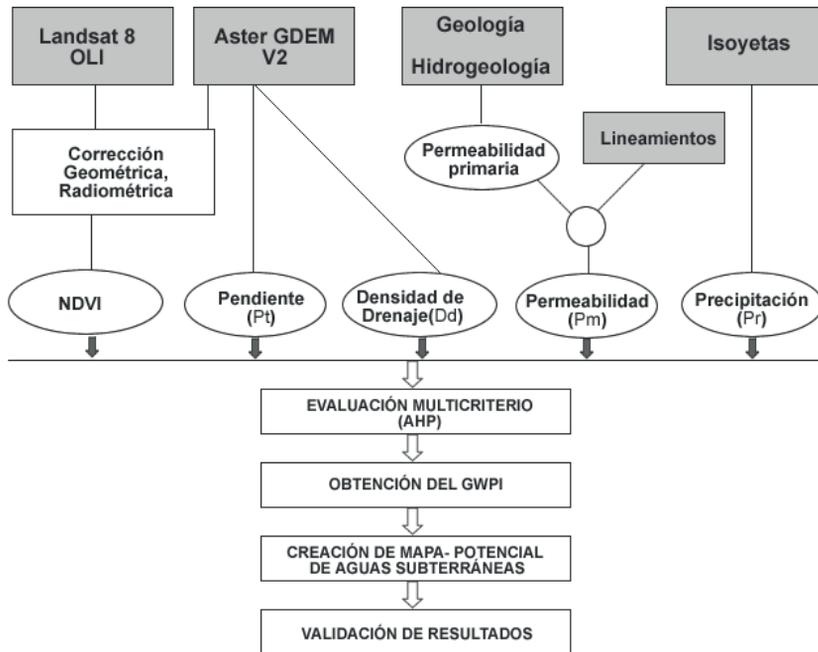


Figura 2. Metodología Aplicada.

de una resolución de 30 metros de pixel descargado del portal <https://earthdata.nasa.gov> de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), y dos escenas de imágenes de satélite Landsat 8 – Collection 1 Level 1 descargadas del portal del *U.S. Geological Survey* (<https://earthexplorer.usgs.gov>).

2.1.1. La Permeabilidad de la Roca (Pm)

Las permeabilidades primaria y secundaria se obtienen a partir de información geográfica de la geología de la zona de estudio, utilizando las capas de “geología”, “hidrogeología” y “fallas”, a partir de las cuales, tomando en cuenta la litología y la densidad de lineamientos se generó la capa de permeabilidad (Figura 3). La información utilizada ha sido generada por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGAP) del Ecuador en el año 2005. De acuerdo a Ayazi *et al.* (2010) la litología influye tanto en la porosidad como en la permeabilidad de las rocas acuíferas.

Para la generación de esta capa se tomó en cuenta la Tabla 1 que asocia la litología de la zona de estudio a su respectiva permeabilidad. Como se puede verificar en la Figura 3 las permeabilidades

impermeable, muy baja y baja predominan en la zona de estudio.

Las zonas con mayor densidad de lineamientos poseen un mayor grado de fracturamiento, y permiten una mayor infiltración del agua, por lo tanto a mayor densidad de lineamientos existe una mayor probabilidad de recarga (Tapia *et al.*, 2015). Esto se consideró para asignar mayor permeabilidad a la litología donde se verifica una mayor densidad de lineamientos.

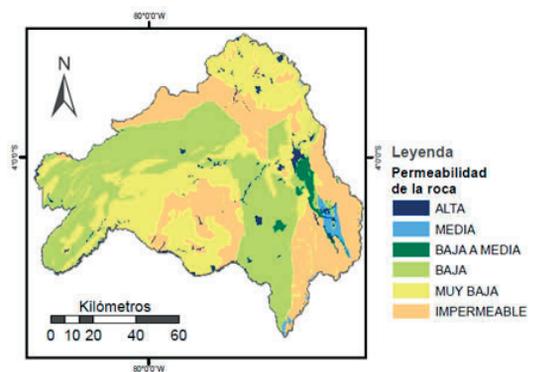


Figura 3. Mapa de permeabilidad primaria y secundaria de la roca.

Tabla 1. Resumen de la tabla de atributos Litología y Permeabilidad.

Permeabilidad primaria	Litología	Permeabilidad primaria	Litología
ALTA	Depósito aluvial	BAJA	Andesita basáltica
	Terraza aluvial		Conglomerado arcilla
MEDIA	Depósito glacial	MUY BAJA	Andesitas
	Conglomerado arenisca		Arcilla
BAJA A MEDIA	Toba	MUY BAJA	Caliza
	Aglomerado		Pizarra
	Flujos de lava andesítica		Rocas metamórficas
IMPERMEABLE	Granodiorita	MUY BAJA	Cuarcita
	Granito		Lutita
	Peridotita		Rocas volcánicas
	Filita		Intercalaciones de Lava
	Esquistos		Intercalaciones de sedimentos
	Anfibolita		capas de lava
	Riolita, tonalita		Capas metavolcánicas

2.1.2. Precipitación (Pr)

Los datos de precipitación de lluvia fueron generados por el MAGAP en el año 2002, a partir de procesos de interpolación de datos de las series meteorológicas del INAMHI, que corresponden a los promedios anuales de una serie de 25 años (Rumazo, 2002). La precipitación determina la cantidad de agua que podría percolar en el sistema de agua subterránea, siendo la principal fuente de recarga (Nampak *et al.*, 2014). Musa *et al.* (2009) en su estudio afirma que la precipitación es uno de los elementos más importantes y fue considerada como la mayor fuente de recarga.

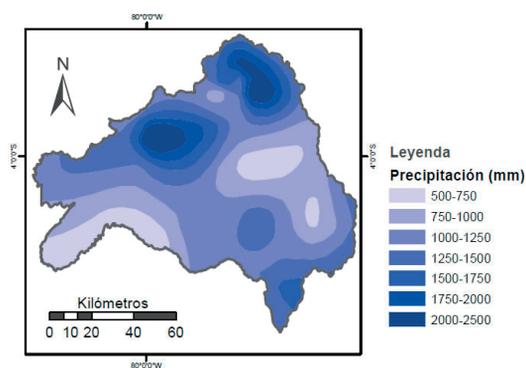


Figura 4. Mapa de precipitación media anual.

2.1.3. Densidad de drenajes (Dd)

La densidad de drenajes fue obtenida a partir del modelo digital de elevaciones ASTER GDEM V2, generando los drenajes de la zona de estudio para

luego calcular su densidad en km/km^2 . Los valores de alta densidad de drenaje indican una baja posibilidad de existencia de agua subterránea, por lo tanto, los pesos más altos son asignados a la densidad de drenaje más baja (Agarwal y Garg, 2016). Las zonas con una baja densidad de drenaje dan lugar a una mayor infiltración y disminuyen la escorrentía superficial (Rahmati *et al.*, 2015). La Figura 5 muestra la densidad de drenaje de la zona de estudio, la cual ha sido clasificada en tres categorías.

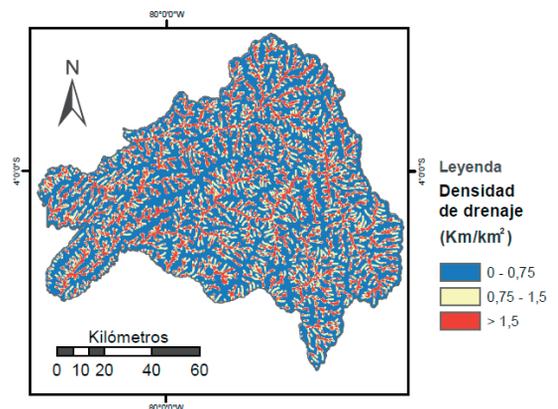


Figura 5. Mapa de densidad de drenajes.

2.1.4. Pendiente del terreno (Pt)

La pendiente del terreno fue obtenida a partir del modelo digital de elevaciones, utilizando el software Quantum GIS 2.8.2, existiendo pendientes desde 2.9 grados para las zonas llanas, hasta

pendientes de 41.8 grados como se muestra en la Figura 6, la cual ha sido clasificada en cinco rangos. De acuerdo a varios estudios el ángulo de la pendiente controla el proceso de recarga (Prasad *et al.*, 2008), por lo que esta variable es un factor para la predicción de zonas potenciales de agua subterránea (Razandi *et al.*, 2015). Así también se indica que las zonas con menos pendiente son las más adecuadas para la recarga de aguas subterráneas (Rahmati *et al.*, 2015; Sener *et al.*, 2005).

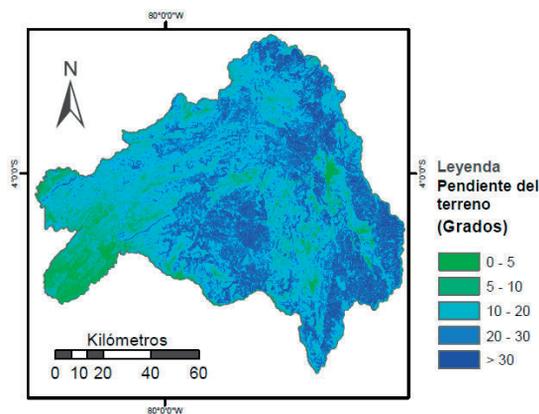


Figura 6. Pendiente del terreno en grados.

2.1.5. Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI).

El índice NDVI es muy utilizado en el análisis de la calidad de la vegetación (Pravalie *et al.*, 2014) y es calculado por la relación $NDVI = (NIR - red) / (NIR + red)$. Se utilizaron dos escenas de imágenes de satélite (Tabla 2), del sensor OLI de la plataforma Landsat 8, las cuales fueron descargadas del portal www.earthexplorer.usgs.gov. El cálculo del NDVI se realizó partir de las bandas número 4 y 5 que se corresponden al rojo e infrarrojo cercano respectivamente. Se realizó la corrección atmosférica de las imágenes por el método de la substracción del objeto oscuro DOS1 (Chavez, 1996), utilizando la herramienta SCP (*Semi-Automatic Classification Plugin*), disponible en Quantum GIS 2.8.2, la cual

ha sido utilizada por varios autores (Congedo y Munafò, 2014; Yasir Haya y Fujii, 2017).

El resultado del NDVI se clasificó en cinco rangos como se muestra en la Figura 7.

Los valores más altos de NDVI corresponden a las zonas con mayor vigor y densidad de vegetación, y se asocian con una acumulación de mayor humedad en el suelo (Catanha *et al.*, 2014).

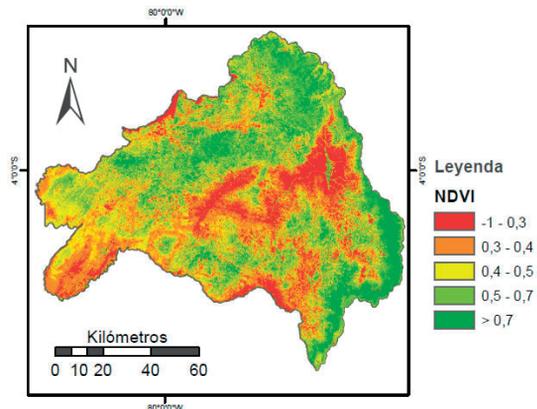


Figura 7. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

2.2. Asignación de pesos normalizados

En la aplicación del método de Análisis de Decisión Multicriterio, se utilizó el Proceso de Análisis Jerárquico, el cual como primer paso permite establecer el peso normalizado para cada capa temática. La matriz de Saaty (Saaty, 1980) es ampliamente usada en el método de MCDA en el campo de la gestión de los recursos naturales, y el AHP basado en SIG ha tenido un avance en la comunidad científica internacional como una herramienta potente para el análisis espacial de problemas complejos (Rahmati *et al.*, 2015). La jerarquía de cada capa temática se obtuvo mediante la escala de comparación (1-9) establecida por Saaty (Saaty, 1980), la cual ha tomado como base los resultados de encuestas a profesionales conocedores del tema de estudio, obteniendo como resultado la Tabla 3.

Tabla 2. Imágenes de satélite utilizadas.

Fecha	Path/Row	Plataforma Sensor	Bandas Utilizadas	Resolución espacial	Tipo de producto
20-NOV-16	10 / 63	Landsat 8	4 , 5	30 m	C1-Level1 (L1TP)
27-NOV-16	11 / 63	Landsat 8	4 , 5	30 m	C1-Level1 (L1TP)

Tabla 3. Matriz de comparaciones pareadas para el proceso AHP.

Capa temática	Pm	Pr	Dd	Pt	NDVI
Permeabilidad (Pm)	1	2	5	6	8
Precipitación(Pr)	1/2	1	3	3	5
Dens. Drenaje (Dd)	1/5	1/3	1	4	6
Pendiente(Pt)	1/6	1/3	¼	1	3
NDVI	1/8	1/5	1/6	1/3	1
Suma Columna	1,99	3,87	9,42	14,33	23,00

Una vez que se ha generado la matriz de comparaciones pareadas, se procede a calcular el peso normalizado (W) para cada capa temática como se muestra en la Tabla 4.

Para verificar la validez de los pesos normalizados obtenidos es necesario calcular la relación de consistencia (CR) de acuerdo a la ecuación 1.

$$CR=CI/RI \quad (1)$$

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 siguiente ecuación:

$$CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1) \quad (2)$$

En este caso $CI=0,09$ y $CR=0,09/1,12=0,08$. El valor de CR debe ser menor que 0,10 para que los pesos normalizados sean consistentes; de lo contrario, los pesos correspondientes deben ser verificados para evitar incoherencias (Saaty, 1980). En este trabajo se obtuvo un valor de $CR=0,08$, por tanto se identifica que la relación de consistencia es satisfactoria y que los pesos normalizados son consistentes.

2.3. Pesos normalizados para las categorías de las capas temáticas

Las categorías de cada capa temática fueron jerarquizadas y se calculó el peso normalizado (Machiwal *et al.*, 2011; Rahmati *et al.*, 2015; Razandi *et al.*, 2015). La Tabla 4 muestra un resumen de los pesos normalizados (Wf) para cada capa temática.

Tabla 5. Rankings Asignados y pesos normalizados por capa temática.

Capa temática	Categoría	Ranking	Peso Normalizado (Wf)
Permeabilidad (Pm)	Alta	6	6/21=0,286
	Media	5	5/21=0,238
	Baja a Media	4	4/21=0,190
	Baja	3	3/21=0,143
	Muy Baja	2	2/21=0,095
Precipitación (Pr) (mm)	Impermeable	1	1/21=0,048
	2000-2500	9	9/36=0,250
	1750-2000	7	0,194
	1500-1750	6	0,167
	1250-1500	5	0,139
Dens. Drenaje (Dd) (km/km ²)	1000-1250	4	0,111
	750-1000	3	0,083
	500-750	2	0,056
	0-0,75	3	3/6=0,5
	0,75-1,5	2	0,333
Pendiente(Pt) (grados)	>1,5	1	0,167
	0-5	5	0,333
	5-10	4	0,267
	10-20	3	0,200
	20-30	2	0,133
NDVI	>30	1	0,067
	-1-0,3	1	0,067
	0,3-0,4	2	0,133
	0,4-0,5	3	0,200
	0,5-0,7	4	0,267
>0,7	5	0,333	

Tabla 4. Determinación de los pesos normalizados para cada capa temática.

Capa temática	Pm	Pr	Dd	Pt	NDVI	Peso Normalizado (W)
Permeabilidad (Pm)	1/1,99=0,50	2/3,87=0,52	5/9,42=0,53	6/14,33=0,42	8/23=0,35	2,32/5=0,46
Precipitación (Pr)	0,25	0,26	0,32	0,21	0,22	0,25
Dens. Drenaje (Dd)	0,10	0,09	0,11	0,28	0,26	0,17
Pendiente(Pt)	0,08	0,09	0,03	0,07	0,13	0,08
NDVI	0,06	0,05	0,02	0,02	0,04	0,04

2.4. Índice de Potencialidad de Aguas Subterráneas (GWPI)

De acuerdo a Jha *et al.* (2010), el Índice de Potencialidad de Aguas Subterráneas es una cantidad adimensional que se utiliza para cuantificar la probabilidad de existencia de agua subterránea en la zona de estudio. A partir de los pesos normalizados W y W_p , mediante una combinación lineal ponderada se estimó el GWPI de acuerdo al siguiente principio (Malczewski, 1999):

$$GWPI = Pm_w Pm_{wf} + Pr_w Pr_{wf} + Dd_w Dd_{wf} + Pt_w Pt_{wf} + NDVI_w NDVI_{wf} \quad (3)$$

Donde W corresponde al peso normalizado obtenido para cada capa temática (Tabla 4), y w_f es el peso normalizado para cada categoría en cada capa temática (Tabla 5).

2.5. Generación del mapa de zonas potenciales a explotación de aguas subterráneas

Todas las capas temáticas fueron procesadas en el modelo de datos raster, a una resolución espacial de 30 m, las cuales fueron reclasificadas de acuerdo al ranking establecido en la Tabla 4, para finalmente calcular el GWPI mediante la combinación lineal ponderada en la calculadora raster. Los valores de GWPI fueron agrupados en 5 clases utilizando el método de clasificación por cuantiles (Rahmati *et al.*, 2015), en el cual cada clase contiene el mismo número de elementos, lo cual ha sido utilizado por varios investigadores debido a su eficiencia en la clasificación (Nampak *et al.*, 2014; Rahmati *et al.*, 2015). Las cinco clases establecidas son: muy bajo (0,049-0,109), bajo (0,109-0,128), moderado (0,128-0,143), alto (0,143-0,165), muy alto (>0,165).

2.6. Validación del mapa resultante

Para la validación del mapa resultante, se utilizó la ubicación geográfica del inventario de puntos de agua generado por el INAMHI, el cual ha sido obtenido mediante la recopilación y análisis de información relacionada a la hidrogeología subterránea, y procede de la información de los denominados “puntos de agua”, como son los pozos excavados, pozos perforados, pozos abandonados,

vertientes naturales y toda manifestación que permita acceder en forma directa al conocimiento de un acuífero determinado (Burbano *et al.*, 2015). En el área de estudio existen 288 puntos de agua, de los cuales 217 son vertientes naturales y 71 son pozos. Para contrastar el mapa resultante y la ubicación de todos los puntos de agua, se realizó un análisis de superposición espacial y se obtuvo el valor del GWPI para cada punto de agua, y así se cuantificó el número de puntos de agua y el porcentaje por cada clase del índice de potencial de agua subterránea.

3. Resultados

3.1. Mapa de zonas potenciales a exploración de aguas subterráneas

El mapa resultante se muestra en la figura 8, donde las zonas de muy buena y buena potencialidad se encuentran en zonas de alta, media y baja permeabilidad, influenciadas por la precipitación y la baja densidad de drenajes. Por otro lado, las zonas de baja y muy baja potencialidad se corresponden a la litología considerada como impermeable. En cuanto a la cuenca hidrográfica del río Catamayo, las zonas de mejor potencialidad se encuentran en su mayoría en la cuenca alta, que se corresponde a las poblaciones de Catamayo, Gonzanamá, Cariamanga y Amaluza (Figura 1). En la cuenca hidrográfica del río Puyango, las zonas más favorables se encuentran en la cuenca media que se corresponde a las poblaciones de Chaguarpamba, Olmedo y Alamor.

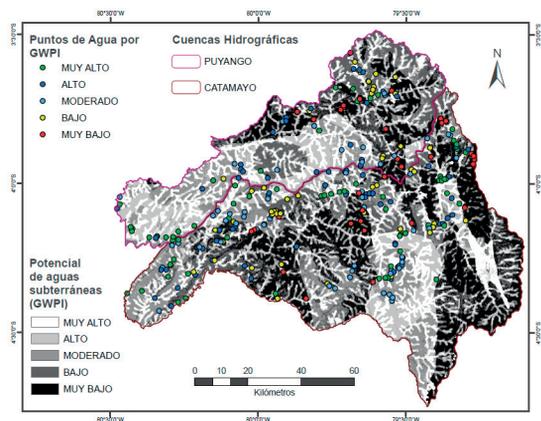


Figura 8. Mapa de potencial para la exploración de aguas subterráneas de la Demarcación Hidrográfica Puyango Catamayo.

Tabla 6. Número y porcentaje de puntos de agua por GWPI.

Rango GWPI	Clase	Nro. de Puntos de Agua	Porcentaje	Porcentaje acumulado
>0,165	Muy Alto	76	26%	26%
0,143-0,165	Alto	69	24%	50%
0,128-0,143	Moderado	58	20%	70%
0,109-0,128	Bajo	51	18%	88%
0,049-0,109	Muy Bajo	34	12%	100%
Total		288	100%	

En la validación del mapa resultante se obtuvo que de 288 puntos de agua existentes en la zona de estudio, 203 (70%) se encuentran en zonas de muy alto, alto y moderado potencial, y los 85 puntos de agua restantes se encuentran en las zonas de baja y muy baja potencialidad a exploración de aguas subterráneas. Esto indica una efectividad del mapa resultante del 70%. La Tabla 6 muestra el número y el porcentaje de la categorización de los puntos de agua a partir del mapa resultante, los cuales pueden ser contrastados en la figura 8.

4. Discusión y Conclusiones

El mapa de potencial para la exploración de aguas subterráneas para la Demarcación Hidrográfica Puyango Catamayo ha sido obtenido aplicando el método MCDA mediante AHP, a partir de datos de libre acceso. En contraste con el inventario de puntos de agua, se valida una alta efectividad del resultado, el cual ha sido influenciado en mayor proporción por la permeabilidad de la roca, la precipitación y la densidad de drenajes, y en menor proporción por la pendiente del terreno y el NDVI, confirmando la importancia de la permeabilidad de la roca y la precipitación en este tipo de estudios como lo hacen López (1999), en su estudio en la misma demarcación hidrográfica, Khodaei y Nassery (2013) en Irán, Madrucci *et al.* (2008) en Brasil, y Deepika *et al.* (2013) en la India. Estudios similares en la India e Irán (Jha *et al.*, 2010; Rahmati *et al.*, 2015; Razandi *et al.*, 2015), confirman la efectividad de la metodología aplicada, quienes de acuerdo a la disponibilidad de datos primarios, han calculado el GWPI mediante la combinación lineal ponderada. La utilización de AHP basado en SIG, debido a su efectividad, puede ser aplicada en estudios similares, tomando

en cuenta además que los datos utilizados son de libre acceso.

El presente estudio a nivel de demarcación hidrográfica, tomando en cuenta la potencialidad muy buena en las cuencas media del río Puyango, y alta del río Catamayo, es relevante, ya que implica una gestión integral de los recursos de agua subterránea. Así el mapa resultante se constituye en un insumo primario para las instituciones encargadas de la conservación, protección y manejo sustentable de los recursos hídricos, permitiendo agilizar actividades, para su uso y aprovechamiento, principalmente en las cuencas bajas, donde existen menores precipitaciones y se requiere del recurso hídrico, tanto para riego como consumo humano.

El proceso de validación de los resultados tomó en cuenta la ubicación geográfica de los puntos de agua, siendo comparados con el mapa resultante, lo cual podría ser mejorado, si a futuro se dispone de los datos del caudal de cada uno de los puntos de agua.

Agradecimientos

Por la disponibilidad de los datos primarios, se agradece a la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo del Ecuador (SENPLADES), al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), y a la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA).

Referencias

Agarwal, R., Garg, P. K. 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>

- Ayazi, M. H., Pirasteh, S., Pili, A. K. A., Biswajeet, P., Nikouravan, B., Mansor, S. 2010. Disasters and risk reduction in groundwater: Zagros mountain southwest Iran using geoinformatics techniques. *Disaster Advances*, 3(1), 51-57.
- Burbano O. N., Becerra P. S., Pasquel S. E. 2015. *Introducción a la hidrogeología del Ecuador*. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador.
- Catanha, M., Sacasas-León, C., Pérez-Lazo, J. 2014. Criterios para localizar zonas acuíferas en Caimbambo, Angola. *Ingeniería Hidráulica y ambiental*, XXXV(3), 20-32.
- Congedo, L., Munafò, M. 2014. Urban sprawl as a factor of vulnerability to climate change: Monitoring land cover change in Dar es Salaam. In S. Macchi & M. Tiepolo (Eds.), *Climate Change Vulnerability in Southern African Cities: Building Knowledge for Adaptation* (pp. 73-88). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00672-7_5
- Crónica. Pozo de agua subterránea para Paletillas. Último acceso: 23 de marzo, 2017, de <http://www.cronica.com.ec/informacion/ciudad/item/15652-pozo-de-agua-subterranea-para-paletillas>
- Chavez, P. S. 1996. Image-based atmospheric corrections - revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 61, 1025-1035.
- Deepika, B., Avinash, K., Jayappa, K. S. 2013. Integration of hydrological factors and demarcation of groundwater prospect zones: insights from remote sensing and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences*, 70(3), 1319-1338. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2218-1>
- Jha, M. K., Chowdary, V. M., Chowdhury, A. 2010. Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information system and multi-criteria decision analysis techniques. *Hydrogeology Journal*, 18(7), 1713-1728. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0631-z>
- Khodaei, K., Nassery, H. R. 2013. Groundwater exploration using remote sensing and geographic information systems in a semi-arid area (Southwest of Urmieh, Northwest of Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 6(4), 1229-1240. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0414-4>
- López, K. 1999. *Utilización de imágenes de satélite en la prospección de aguas subterráneas*. Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- Machiwal, D., Jha, M. K., Mal, B. C. 2011. Assessment of groundwater potential in a semi-arid region of India using remote sensing, GIS and MCDM techniques. *Water Resources Management*, 25(5), 1359-1386. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9749-y>
- Madrucci, V., Taioli, F., De Araújo, C. C. 2008. Groundwater favorability mapping using GIS multicriteria data analysis on crystalline terrain, São Paulo State, Brazil. *Journal of Hydrology*, 357(3-4), 153-173. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.026>
- Malczewski, J. 1999. *GIS and multicriteria decision analysis*. New York: Wiley.
- Mendoza-Nolorbe, J. N., Rojas-Acuña, J. 2013. Clasificación de imágenes ETM+ y ASTER GDEM por el método árbol de decisiones para la detección de agua subterránea en Perú. Caso Estudio: Lambayeque. En: *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Foz do Iguaçu, Brazil, 13-18 Abril. pp 5689-5696.
- Musa, K. A., Akhir, J. M., Abdullah, I. *Groundwater prediction potential zone in Langat basin using the integration of Remote Sensing and GIS*. Último acceso: 23 de marzo, 2017, de <https://www.geospatialworld.net/article/groundwater-prediction-potential-zone-in-langat-basin-using-the-integration-of-remote-sensing-and-gis/>
- Nampak, H., Pradhan, B., Manap, M. A. 2014. Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. *Journal of Hydrology*, 513, 283-300. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.053>
- Prasad, R. K., Mondal, N. C., Banerjee, P., Nandakumar, M. V., Singh, V. S. 2008. Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. *Environmental Geology*, 55(3), 467-475. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0992-3>
- Pravalié, R., Sîrodoev, I., Peptenatu, D. 2014. Detecting climate change effects on forest ecosystems in Southwestern Romania using Landsat TM NDVI data. *Journal of Geographical Sciences*, 24(5), 815-832. <https://doi.org/10.1007/s11442-014-1122-2>
- 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>
- Razandi, Y., Pourghasemi, H. R., Neisani, N. S., Rahmati, O. 2015. Application of analytical hierarchy process, frequency ratio, and certainty factor models for groundwater potential mapping using GIS. *Earth Science Informatics*, 8(4), 867-883. <https://doi.org/10.1007/s12145-015-0220-8>

- Rumazo, N. *Mapa de zonas de precipitación (isoyetas) del Ecuador Continental, escala 1:250000, Año 2002* [mapa]. Último acceso: 23 de marzo, 2017, de http://geoportal.agricultura.gob.ec/catalogo_datos/visualizador.html
- Saaty, TL. 1980. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. New York: McGraw-Hill.
- SENAGUA. 2010. *Acuerdo ministerial 2010-66*. Quito: Secretaría del Agua.
- Sener, E., Davraz, A., Ozcelik, M. 2005. An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: A case study in Burdur, *Turkey. Hydrogeology Journal*, 13(5), 826-834. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0378-5>
- Tapia, S., Oyarzún, R., Núñez, J., Oyarzún, J. 2015. *Identificación de zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas en el sector de la mina Brillador*. En: XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, Chile, 4-8 Agosto. pp 622-625.
- Teeuw, R. M. 1995. Groundwater exploration using remote sensing and a low-cost geographical information system. *Hydrogeology Journal*, 3(3), 21-30. <https://doi.org/10.1007/s100400050057>
- Yasir Haya, L. O. M., Fujii, M. 2017. Mapping the change of coral reefs using remote sensing and in situ measurements: a case study in Pangkajene and Kepulauan Regency, Spermonde Archipelago, Indonesia. *Journal of Oceanography*, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s10872-017-0422-4>