
Caracterización hidrogeológica de la subcuenca Montalbán mediante el análisis multicriterio de imágenes satelitales y la interpretación de datos geoelectricos

J. Reyes Lucero

Resumen: Durante los últimos años, las actividades de agricultura y ganadería que se llevan a cabo en la región de Montalbán del estado Carabobo, se han visto afectadas por la disminución en el suministro del agua a causa de factores climáticos, ambientales y antrópicos. Para hacer un uso racional del agua, los habitantes de la región necesitan conocer las características y limitaciones de los recursos hídricos con los que cuentan. Por tal razón se realizó un estudio de caracterización de la subcuenca Montalbán, con la finalidad determinar las zonas con mayor potencial de acumulación de aguas subterráneas. Primeramente, se realizó un análisis morfométrico de la subcuenca, mediante el empleo de un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés). Luego, a partir de información geológica, imágenes satelitales y el empleo de un Sistema de Información Geográfica (SIG), se generaron capas temáticas de permeabilidad relativa, pendiente, precipitación, densidad de drenajes e Índice de Diferencia de Vegetación Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés). Se aplicó el método de Análisis

de Decisión Multi-Criterio (MCDA, por sus siglas en inglés), basado en el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) y se obtuvo un mapa de las zonas con mayor potencial acuifero. Finalmente, con base en la información geológica y de pozos disponibles, se interpretaron datos geoelectricos adquiridos con antelación. Se determinó que la subcuenca se encuentra en equilibrio sedimentario y es propensa a inundaciones ante fuertes precipitaciones. Las zonas con alto potencial acuifero se encuentran ubicadas hacia el noreste, mientras que las zonas con potencial bajo se encuentran ubicadas hacia el sureste y suroeste. La interpretación de los SEV muestra buena correlación con el mapa de potencial acuifero, con profundidades prospectivas que varían desde 43 m 130 m, especialmente al noreste y sureste de la zona de baja pendiente.

Palabras clave: hidrogeología, acuíferos, Cuenca del Río San Carlos, Montalbán, teledetección, geofísica somera.

Resumo: Nos últimos anos, as atividades agrícolas realizadas na região de Montalbán, no estado de Carabobo, foram afetadas pela diminuição no fornecimento de água devido a fatores climáticos, ambientais e antropogênicos. Para fazer um uso racional da água, os habitantes da região precisam conhecer as características e limitações dos recursos hídricos que possuem. Por esse motivo, foi realizado um estudo para caracterizar a sub-bacia de Montalbán, a fim de determinar as áreas com maior potencial de acúmulo de água subterrânea.

Recibido: 5 de mayo 2020 / Aceptado: 15 de mayo 2020

Publicado en línea: Julio, 2020

© 2020

J. Reyes Lucero



Laboratorio de Geofísica Aplicada, Departamento de Geofísica, Universidad Central de Venezuela, Venezuela.

E-mail de correspondencia: janckarlos@gmail.com

Primeiramente, foi realizada uma análise morfométrica da sub-bacia, utilizando um Modelo Digital de Elevação (DEM, por suas siglas em inglês). Em seguida, com base em informações geológicas, imagens de satélite e uso de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), foram geradas camadas temáticas: permeabilidade relativa, declive, precipitação, densidade de drenagem e o Índice de Diferença de Vegetação Normalizada (NDVI, por suas siglas em inglês). O método de Análise de Decisão Multicritério (MCDA, por suas siglas em inglês) foi aplicado, com base no Processo de Análise Hierárquica (AHP, por suas siglas em inglês), e um mapa das áreas com maior potencial aquífero foi obtido. Finalmente, com base nas informações geológicas e de poço disponíveis, os dados geoeletrônicos adquiridos anteriormente foram interpretados. A sub-bacia foi encontrada em equilíbrio sedimentar e propensa a inundações devido a fortes chuvas. As áreas com alto potencial aquífero estão no nordeste, enquanto as áreas com baixo potencial estão no sudeste e sudoeste. A interpretação do SEV mostra uma boa correlação com o mapa do potencial aquífero, com profundidades prospectivas variando de 43 a 130 m, principalmente a nordeste e sudeste da área de baixa inclinação.

Palavras chave: hidrogeologia, aquíferos, Bacia do Rio San Carlos, Montalbán, sensoriamento remoto, geofísica superficial.

Abstract: In recent years, agriculture and livestock activities carried out in the Montalbán region of Carabobo state, have been affected by the decrease in water supply due to climatic, environmental and anthropogenic factors. To make rational use of water, the inhabitants of the region need to know the characteristics and limitations of the water resources they have. That is why a characterization study of the Montalbán sub-basin was carried out, in order to determine the areas with the greatest potential for groundwater accumulation. Firstly, a morphometric analysis of the

sub-basin was performed, using a Digital Elevation Model (DEM). Then, based on geological information, satellite images, and the use of a Geographic Information System, thematic layers of: relative permeability, slope, precipitation, drainage density, and Normalized Vegetation Difference Index (NDVI) were generated. The Multi-Criterion Decision Analysis (MCDA) method was applied, based on the Hierarchical Analysis Process (AHP) and a map of the areas with the greatest aquifer potential was obtained. Finally, based on the available geological and well information, previously acquired geoelectric data were interpreted. It was determined that the sub-basin to be in sedimentary equilibrium and prone to flooding in the face of heavy rainfall. The areas with high aquifer potential are located to the northeast, while the areas with low potential are located to the southeast and southwest. The interpretation of the SEVs shows a good correlation with the aquifer potential map, with prospective depths ranging from 43m to 130m, especially to the northeast and southeast of the low slope area.

Keywords: hydrogeology, aquifers, San Carlos River Basin, Montalbán, remote sensing, shallow geophysics.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, las poblaciones de Montalbán y Aguirre, localizadas al noroeste del estado Carabobo, se han visto afectadas por la disminución en el suministro de agua. Estas regiones se encuentran enmarcadas dentro la Zona Protectora de la Cuenca Alta del Río Cojedes, de acuerdo con el Decreto N° 2647 publicado en Gaceta Oficial de Venezuela N° 31485, el 12 de mayo de 1978. Esta zona protectora abarca los municipios Bejuma, Juan José de Mora, Montalbán y Miranda, y se extiende hasta el municipio Falcón del estado Cojedes, con una superficie de 2,760 km². Un informe preliminar realizado por Osorio y Morales

(2015), mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG), determinó que las líneas limítrofes planteadas no consideraban la morfología de la cuenca y sugirieron una revisión y modificación del citado decreto.

La región de Montalbán y Aguirre se caracteriza porque en ella se han realizado importantes cultivos, tales como cítricos, caña de azúcar, hortalizas y tabaco, asimismo, se han llevado a cabo otras actividades relacionadas con el sector ganadero y avícola, muy necesarias para el desarrollo del país. Sin embargo, el desarrollo progresivo de estas actividades, así como el crecimiento rural y urbano, la prolongación de los periodos de sequía, cambios climáticos, deforestación, excesiva explotación de acuíferos, entre otros factores, han sido las principales causas de los problemas ambientales de las cuencas hidrográficas del estado Carabobo. Ello ha causado que la capacidad de los suelos para permitir la captación e infiltración del agua haya disminuido, tras la degradación de la cobertura vegetal. Adicionalmente, aumenta la escasez de agua, la desertificación, la pérdida de suelo y los riesgos por deslaves en épocas de lluvia (Salas, y Castillo, 2012). La crisis hídrica en la región se ha evidenciado de manera acelerada en los últimos treinta años con la disminución de los caudales de los ríos, que afecta principalmente a la población rural y a los pequeños agricultores, y provoca, por ende, un mayor nivel de inseguridad alimentaria (Olivares et al., 2017).

Venezuela ha sido y sigue siendo una región privilegiada por las riquezas hídricas con las que cuenta. Sin embargo, tal abundancia no se ve reflejada en la existencia de información organizada y de calidad, relacionada con el tema hidrológico (Martínez, 2011). El potencial de las aguas subterráneas en Venezuela es poco conocido hasta la fecha, pero se estima que los acuíferos representan una superficie total aproximada de 829,000 km², los cuales,

a través de estudios preliminares, se han estimado en 8×10⁹m³ por año (Ibidem). De acuerdo a Cañizales y colaboradores (2006), no existe en el país una eficiente gestión de los recursos subterráneos, ni una base de datos nacional confiable que proporcione el número real de pozos, tipo de uso, características del acuífero, volumen, calidad, zonas de descarga y recarga, profundidad ideal para su explotación, calidad con respecto al tiempo y la profundidad, así como otros factores que permitan un seguimiento verdadero de estos recursos.

Según Razandi y compañeros (2015), el término Potencialidad de Agua Subterránea se define como la posibilidad de existencia de aguas subterráneas en una zona de estudio. Generalmente, para determinar la potencialidad, se utilizan métodos tradicionales como son las perforaciones, las cuales son muy costosas, consumen tiempo y requieren de profesionales expertos (Jha et al., 2010). Por otra parte, la mayoría de los estudios de aguas subterráneas que se realizan en el país, se llevan a cabo mediante perforaciones exploratorias, casi sin contar con estudios geológicos o geofísicos que certifiquen la correcta ubicación y profundidad que deberían tener los pozos y garanticen así el mejor aprovechamiento de los sistemas acuíferos.

A partir de años recientes, gracias al fácil acceso de algunas imágenes satelitales y al empleo de SIG, autores como Razanti y colaboradores (2015), Jha y compañeros (2010), Rahmati e investigadores (2015), Macas-Espinosa y López-Escobar (2018), además de Madrucci y colaboradores (2008), han aplicado métodos eficientes y económicos para estimar la ubicación de zonas con mayores potenciales acuíferos. Según Jha (op. cit.) y Madrucci (op. cit.), el MCDA constituye una herramienta efectiva para la gestión de recursos de aguas subterráneas. Las zonas con mayor potencial de aguas subterráneas pueden ser estimadas mediante un AHP, el cual es muy apropiado para ser aplicado en países

METODOLOGÍA

La metodología empleada se basó en los siguientes pasos:

Descripción litológica

Los afloramientos presentes en el área de estudio se pueden agrupar en cuatro unidades geológicas principales, las cuales

han sido descritas por diferentes autores (Coplanarh, 1974; Bellizzia, y Rodríguez, 1968), y recartografiadas con mayor detalle a escalas 1:25.000 y 1:100.000 por Ynfante (2017). La figura 2 muestra la distribución de las principales formaciones que afloran en la región que comprende la subcuenca, mientras que en la tabla 1 se muestra la respectiva descripción.

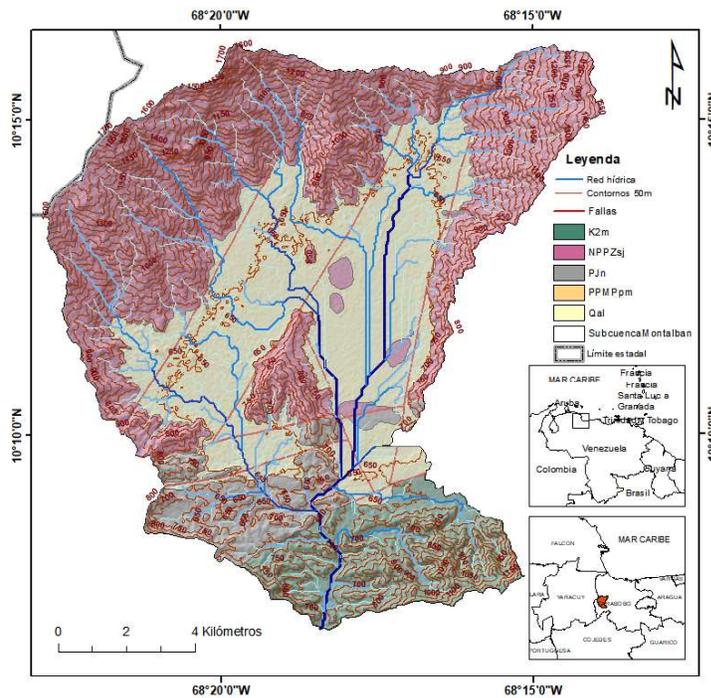


Figura 2. Mapa geológico.
Fuente: modificado de Ynfante (2017); Dataset (2011).

Tabla 1. Principales formaciones geológicas

Leyenda	Nombre	Litología
K2m	Esquisto Las Mercedes	Esquistos calcáreos
NPPZsj	Complejo San Julián	Esquistos y gneis
PJn	Complejo Nirgua	Mármol, esquisto y gneis cuarzo muscovítico
Qal	Depósitos Cuaternarios y Neógenos	Aluviones

Descripción morfométrica

Los parámetros morfométricos permiten conocer los rasgos principales y el estado de evolución de una cuenca hidrológica. Gaspari y colaboradores (2012) indican que las propiedades morfométricas permiten realizar la descripción física y espacial de una cuenca, facilitando la comparación con otras cuencas hidrográficas, y proporcionan información adicional sobre las características ambientales del territorio, mediante la descripción precisa de la geometría de las formas superficiales. Estos autores también describen los pasos que se deben seguir para la estimación de los parámetros morfométricos de una cuenca.

A continuación, se definen los parámetros morfométricos empleados en este estudio, los cuales fueron obtenidos a partir del DEM descrito en la sección 2, basado en el estudio realizado por Gaspari e investigadores (2012):

- *Perímetro (P)*: longitud en kilómetros de la línea que limita la cuenca hidrográfica, a lo largo de la divisoria de aguas topográficas.
- *Área (A)*: superficie en km² encerrada por la divisoria de aguas.
- *Longitud máxima (L_{max})*: distancia que hay entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca.
- *Longitud del cauce principal (L_{cp})*: longitud total en kilómetros del río principal, desde el punto más distante de la cuenca hasta la desembocadura.
- *Ancho de la cuenca (A_c)*: relación entre el área de la cuenca y su longitud transversal.
- *Altura máxima (H_{max})*: cota más alta en metros registrada dentro del perímetro de la cuenca.
- *Altura mínima (H_{min})*: cota más baja en metros registrada dentro del perímetro de la cuenca.
- *Desnivel altitudinal (DA)*: diferencia de altura entre la cota más alta y más baja

registrada dentro del perímetro de la cuenca.

- *Factor de forma (IF)*: es un factor adimensional que indica cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial en la cuenca hidrográfica. Se expresa como la relación entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud máxima (Jardí, 1985; Henaos, 1988). Manifiesta la tendencia de la cuenca hacia las crecidas. Una cuenca de forma redondeada posee un valor de *IF* cercano a 1, mientras que una cuenca con un *IF* bajo, se caracteriza por ser una cuenca alargada y es menos propensa a la precipitación intensa, estando sujeta a crecientes de menor magnitud, que un área de igual tamaño con un factor de forma mayor (Henaos, op. cit.).
- *Coefficiente de compacidad de Gravelius (K_c)*: es una cantidad adimensional que relaciona el perímetro de una cuenca con el perímetro de un círculo teórico, cuya área es equivalente al de la cuenca (Gaspari et al., 2012). Se expresa como una relación entre el perímetro (*P*) y el área (*A*) de la cuenca, por medio de la ecn (1).

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (1)$$

Donde *P* es el perímetro y *A* el área de la cuenca.

- *Coefficiente de circularidad (C_c)*: indica el grado de redondez o alargamiento de la cuenca. Es una cantidad adimensional, por lo cual varía entre 0 y 1. Los valores de *C_c* cercanos a 1 indican la presencia de cuencas con geometría ensanchada, mientras que valores cercanos a 0, indican cuencas con geometría alargada. Este coeficiente se puede estimar mediante la ecn (2).

$$C_c = 4\pi \frac{A}{P^2} \quad (2)$$

- *Pendiente media de la cuenca (Pm)*: se obtiene al dividir el desnivel altitudinal entre la longitud máxima de la cuenca. El proceso de degradación a que se ve sometida una cuenca hidrográfica, al igual que el caudal máximo, están muy influenciados por la configuración topográfica, debido a que el poder erosivo se manifiesta en mayor o menor grado de acuerdo con los distintos grados de pendiente (Henaos, [19]).
- *Longitud total del drenaje (Ln)*: longitud en kilómetros definida con la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca.
- *Densidad de drenaje (Dd)*: está definida para cada cuenca como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca con respecto al área de la misma. Mientras mayor sea la densidad del drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta.
- *Número de cauces de orden 1 (Nc)*: es el número total de cauces principales que se conforman en las cabeceras de la cuenca.
- *Coefficiente de torrencialidad (Ct)*: índice que mide el grado de torrencialidad de una cuenca, por medio de la relación entre el número de cauces de orden 1 (Nc) y el área total de la cuenca. Mientras mayor sea el valor de Ct, habrá mayor grado de torrencialidad.
- *Pendiente del cauce (Sc)*: relación entre el desnivel altitudinal (DA) y la longitud total del drenaje principal (Ln).
- *Tiempo de concentración (Tc)*: tiempo que tarda el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto más alejado, hasta la desembocadura de la cuenca. Se puede obtener por medio de la expresión empírica formulada por Kirpich [20], la cual corresponde a la ecuación (3).

$$T_c = \frac{(0.0078 \times L_n^{0.77})}{DA^{0.385}} \quad (3)$$

Donde L_n es la longitud total del drenaje y DA es la pendiente de la cuenca o desnivel altitudinal.

Otro parámetro considerado en la determinación de las características morfométricas de una cuenca lo constituye la curva hipsométrica. Ésta describe el estado de evolución de una cuenca hidrográfica mediante un gráfico de dos ejes, donde la ordenada representa las alturas relativas y la abscisa corresponde al área relativa de la cuenca. Esta curva tiene forma sigmoideal: es cóncava hacia arriba en la parte superior y convexa en la parte inferior. El grado de sinuosidad es muy variable, igual que la pendiente en el punto de inflexión. Cuando las curvas hipsométricas presentan variaciones, ya sea por apartarse de las teóricas o por presentar más de un punto de inflexión, pueden relacionarse con controles tectónicos o litológicos particulares (Racca, 2007).

Detección de potencial acuifero

Se aplicó el método de MCDA, combinado con el AHP, con la finalidad de determinar las zonas de mayores potenciales de acumulación de aguas subterráneas en la zona de estudio. Para ello, fue necesario ordenar jerárquicamente las capas temáticas, de mayor a menor influencia, de acuerdo con el criterio aplicado por Macas-Espinosa y López-Escobar (2018). En el presente estudio, las capas temáticas fueron jerarquizadas en el siguiente orden de prioridad: 1) permeabilidad relativa, 2) pendiente, 3) precipitación, 4) NDVI y 5) densidad de drenajes. Estas capas fueron obtenidas de diferentes fuentes y seguidamente se sometieron un pre-procesamiento, con la finalidad de adecuarlas para ser sometidas al método MCDA mediante el AHP. La metodología empleada

para la aplicación de estas técnicas se encuentra claramente detallada por Razanti y colaboradores (2015), Jha y compañeros (2010), Rahmati e investigadores (2015), Macas-Espinosa y López-Escobar (2018), además de Madrucci y colaboradores (2008).

Para la obtención del Mapa de Potencial Acuífero (MPA), es necesario obtener el Índice de Potencialidad de Aguas Subterráneas (GWPI, por sus siglas en inglés). La figura 3 muestra un diagrama de la metodología empleada en la obtención del Potencial Acuífero (PA).

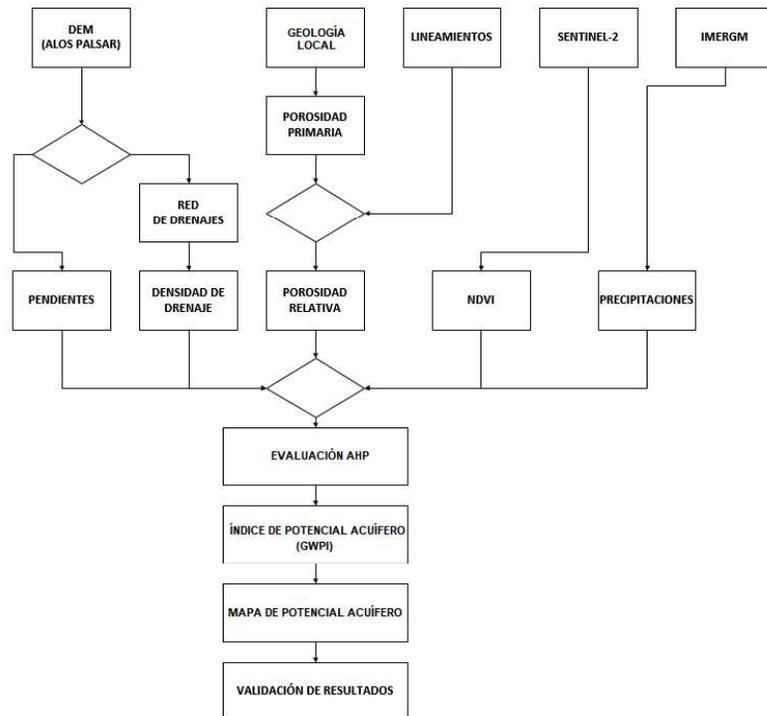


Figura 3. Secuencia de obtención y validación del Mapa de Potencial Acuífero (MPA).

A continuación, se describen cada una de las capas temáticas utilizadas para la obtención del PA:

Capa de permeabilidad relativa

La permeabilidad relativa fue obtenida a partir de información de porosidad primaria, geología y densidad de lineamientos disponible. Para la distribución de la permeabilidad relativa, se tomó en cuenta el mapa geológico presentado en la figura 2.

Debido a que en la zona afloran 4 formaciones geológicas, de las cuales sólo una es de tipo sedimentaria, mientras que las restantes son de origen principalmente metamórfico, aunado al hecho de que la densidad de lineamientos en la zona es muy baja, se consideró la parte sedimentaria como la de mayor permeabilidad presente en el área de estudio y a la cual se le asignó el mayor peso para la evaluación mediante el AHP. La figura 4 muestra la capa temática correspondiente a la permeabilidad relativa empleada para el estudio.

Capa de pendientes

La capa de pendientes se obtuvo a partir del DEM descrito en la sección 2, mediante el empleo del software ArcGIS 10.8 de ESRI. Los valores de pendientes obtenidos fueron clasificados a intervalos de 10 grados angulares. Se puede observar que éstos varían de 0 a 65° (figura 5), cuyas pendientes más bajas se concentran en la zona central de la cuenca.

La variación en la pendiente del terreno es considerada un factor de gran importancia para la predicción de zonas potenciales de agua subterránea (Razandi et al., 2015)). De acuerdo a Rahmati y colaboradores (2015), las zonas con menor pendiente son las más adecuadas para la recarga de aguas subterráneas.

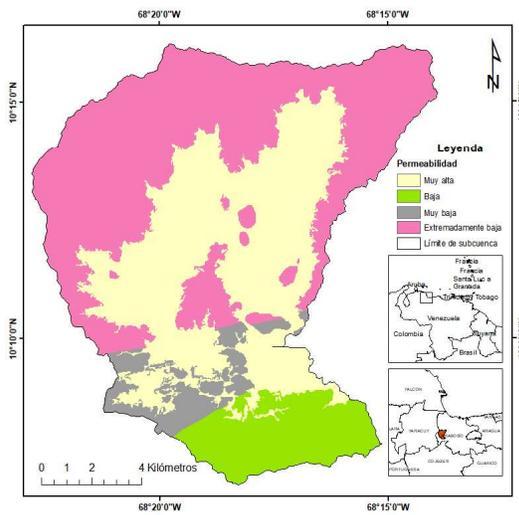


Figura 4. Capa de permeabilidad relativa.

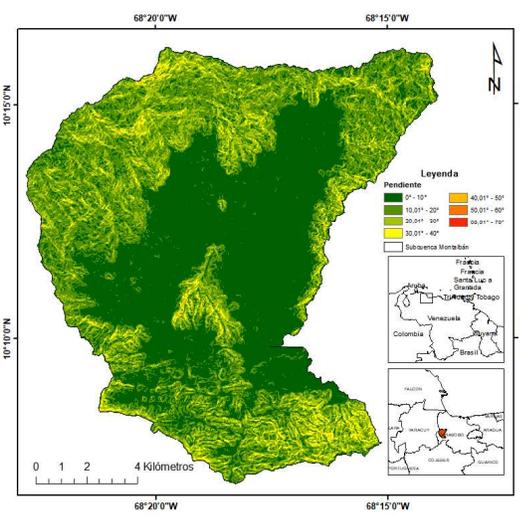


Figura 5. Mapa de pendientes.

Fuente: Dataset (2011)

Capa de precipitaciones

Esta capa fue generada a partir de una imagen satelital proporcionada por el sensor GPM (Global Precipitation Measurement), la cual es producto de la misión conjunta entre la agencia estadounidense NASA y la japonesa JAXA, para realizar observaciones frecuentes (cada 2 a 3 horas) de las precipitaciones que ocurren en la Tierra. El proyecto proporciona mapas globales de precipitación para ayudar a los investigadores a mejorar el pronóstico de eventos extremos, estudiar el clima global y aumentar las capacidades actuales para usar dichos

datos satelitales en beneficio de la sociedad. La imagen de precipitación obtenida para el presente estudio, fue descargada desde el servicio web GIOVANNI de la NASA². La misma corresponde a datos de precipitación acumulada para la zona de estudio en el período comprendido entre enero del 2019 y diciembre del 2020. La imagen de la capa de precipitaciones generadas se muestra en la figura 6.

2 Recuperado de <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

La precipitación constituye una de las variables principales como fuente de recarga, la cual determina la cantidad de agua que podría percolar en el sistema de agua subterránea.

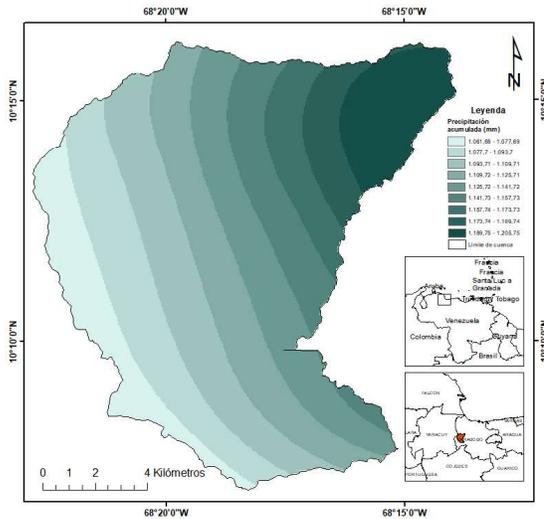


Figura 6. Mapa de precipitaciones.

Capa de NDVI

El NDVI es un parámetro adimensional, que toma valores desde -1 hasta +1 y representa la respuesta de la cobertura vegetal a la radiación solar. Se utiliza principalmente para identificar y clasificar los tipos y calidad de cultivos, suelos erosionados y cuerpos de agua. Para el presente estudio, se consideró muy importante el uso de NDVI, debido a que permite identificar las zonas donde la vegetación es más densa, la cual puede contribuir a la captación de los mayores volúmenes de agua provenientes de las precipitaciones.

La capa de NDVI fue generada a partir de una imagen Sentinel-2 del área de estudio, la cual se puede obtener de forma libre, desde el sitio web Copernicus Hub de la agencia European Space Agency (ESA)³. Esta imagen se compone de 12 bandas espectrales que incluyen el rango visible, aerosol, infrarrojo

cercano, e infrarrojo de onda corta, con resoluciones de 10, 20 y 60 m.

Para el cálculo del NDVI, sólo es necesario el empleo de la banda del Rojo visible (*R*) y el infrarrojo cercano (*NIR*), correspondientes a las bandas 4 y 8, respectivamente. Para obtener el NDVI se emplea la ecuación (4).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (4)$$

Donde: *R* es la reflectancia en el rango del rojo visible, mientras que *NIR* corresponde a la reflectancia en el espectro del infrarrojo cercano.

Con los valores obtenidos para el NDVI, se procedió a obtener la correspondiente capa temática, cuya representación se muestra en la figura 7.

Los valores más altos de NDVI, cercanos a +1, indican la presencia de vegetación muy espesa y vigorosa; valores cercanos a cero representan suelos desnudos o erosionados y valores negativos pueden asociarse a la presencia de cuerpos de agua, nubosidad o nieve.

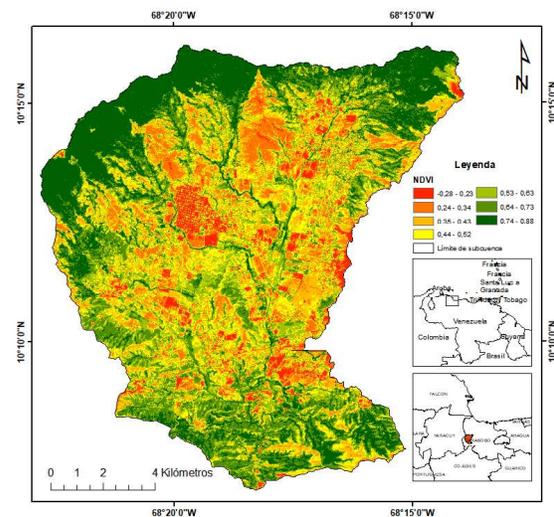


Figura 7. Mapa de NDVI.

Recuperado de <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

Capa de densidad de drenajes

Esta capa fue obtenida a partir del DEM descrito en la sección 2 y la red hídrica generada previamente. El procedimiento consistió en determinar la relación que hay entre la sumatoria de las longitudes, medidas en km, de todos los segmentos de drenaje que ocupan un área rectangular de 0.5km × 0.5km. Para ello, se utilizaron herramientas de análisis espacial incorporadas en el software ArcGIS 10.8. La figura 8 muestra el mapa de densidad de drenaje de la zona de estudio.

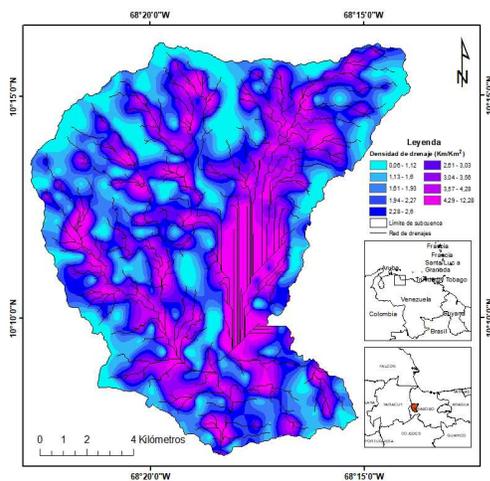


Figura 8. Mapa de densidad de drenajes.

Cuando los valores presentan una alta densidad de drenaje, hay menos condiciones para filtración de agua, por lo cual, los pesos más altos fueron asignados a la densidad de drenaje más baja. Las zonas con una baja densidad de drenaje dan lugar a una mayor infiltración y disminuyen la escorrentía superficial (Rahmati et al., 2015).

Obtención de la matriz de comparaciones y pesos

Esta etapa consistió en determinar la jerarquía y los pesos de cada una de las capas temáticas utilizadas, mediante la aplicación de la matriz de Saaty (1980) y el AHP. Esta matriz es ampliamente

usada en el método MCDA para la gestión de recursos naturales. Por otra parte, el empleo de AHP basado en SIG ha tenido un avance en la comunidad científica internacional como una potente herramienta para el análisis espacial de problemas complejos (Rahmati et al., 2015).

Para determinar la jerarquía de las capas temáticas se utilizó la escala de comparación establecida por Saaty (1980), en la cual, a cada capa se le asigna un valor comprendido entre 1 y 9, indicando el grado de importancia con respecto a las restantes. Con base en esta jerarquía, se presentan las ponderaciones numéricas que se recomiendan aplicar a cada capa temática, mediante la construcción de la matriz de comparaciones pareada, la cual es mostrada en la tabla 2. Posteriormente, a partir de ésta, se obtuvo la matriz de pesos normalizados, al dividir cada elemento por la correspondiente sumatoria de los pesos de cada capa, cuyos resultados se presentan en la tabla 3.

Tabla 2. Matriz de comparaciones pareadas

Capa temática	Pm	Pt	Pr	NDVI	Dd
Permeabilidad (Pm)	1	2	3	3	5
Pendiente (Pt)	1/2	1	2	3	4
Precipitación (Pr)	1/3	1/2	1	2	2
NDVI	1/3	1/3	1/2	1	2
Densidad (Dd)	1/5	1/4	1/2	1/2	1
Suma=	2,37	4,08	7,00	9,50	14,00

Tabla 3. Matriz de pesos normalizados

	Pm	Pt	Pr	NDVI	Dd	Peso (W)
	1/2,37=	2/4,08=	3/7=	3/9,5=	5/14=	
Pm	0,42	0,49	0,43	0,32	0,36	0,40
Pt	0,21	0,24	0,29	0,32	0,29	0,27
Pr	0,14	0,12	0,14	0,21	0,14	0,15
NDVI	0,14	0,08	0,07	0,11	0,14	0,11
Dd	0,08	0,06	0,07	0,05	0,07	0,07

Para comprobar la validez de los pesos normalizados, es necesario aplicar la relación de consistencia CR definida por la ecn (5):

$$CR = \frac{CI}{RCI} \quad (5)$$

Donde el índice de consistencia CI, viene expresado mediante la ecn (6):

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (6)$$

Donde $\lambda_{max} = 5,10$, es el eigenvalor principal de la matriz de pesos normalizados, por lo que $CI = 0,02$.

Mientras que RCI es un índice de consistencia aleatorio, el cual depende del orden de la matriz (ecn 7):

$$RCI = 1,98 (n - 2)/n \quad (7)$$

Para $n = 5$, se tiene que: $RCI = 1,19$.

El valor de CR debe ser menor que 0.10 para garantizar la consistencia de los pesos normalizado, de lo contrario, los pesos deberán ser reajustados nuevamente (Saaty, 1980). El valor obtenido de CR para el presente estudio fue de 0,02, por lo cual la consistencia es satisfactoria y los datos de entrada son consistentes.

Posteriormente, se generó la jerarquía de las clases que conforman cada capa temática y sus respectivos pesos normalizado (*wf*).

Procesamiento geoelectrico

Esta etapa consistió en el procesamiento de 22 SEV, adquiridos en la zona de baja pendiente dentro de la subcuenca Montalbán. Esta zona corresponde a un depósito de aluviones, en ella se encuentran los

principales asentamientos, poblados y zonas agrícolas de esta región.

Según Orellana (1972), un sondeo eléctrico se define como una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuada con el mismo tipo de dispositivo y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción.

Mediante la aplicación de un SEV es posible determinar la distribución vertical de las resistividades eléctricas bajo el punto sondeado. De esta manera, se pueden inferir la profundidad y espesor de diferentes capas litológicas, incluyendo aquellas que, dadas sus características texturales, son capaces de captar y almacenar aguas subterráneas. El método consiste en la aplicación de una corriente continua de valor conocido a través de un par de electrodos A y B insertados en el terreno, los cuales se encuentran dispuestos a cierta distancia fija de un punto central O, mientras que se toma lectura del voltaje inducido por medio de otro par de electrodos M y N, también de distancia fija con respecto O y alineados con los electrodos A y B (figura 9).

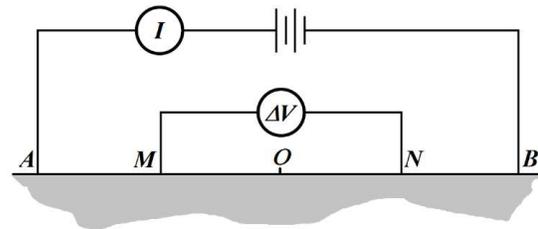


Figura 9. Dispositivo SEV.

La resistividad resultante de las mediciones puede ser calculada mediante la ecn (8).

$$\rho = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (8)$$

Donde ΔV_{MN} es la diferencia de voltaje medida entre el par de electrodos MN, I es la intensidad de corriente aplicada entre el par de electrodos AB, y K representa el factor

geométrico, el cual expresa la relación de distancia entre cada uno de los electrodos y viene dado por la ecn (9).

$$K = \frac{2\pi}{\left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}\right]}$$

Son diferentes los dispositivos utilizados para efectuar un SEV, de acuerdo con la distribución y separación de los electrodos. Cada dispositivo es determinado exclusivamente por el valor del factor K . En la práctica, los dispositivos más empleados son el Wenner y el Schlumberger. En el caso del dispositivo Wenner, el factor K viene dado por la ecn (10).

$$K = 2\pi a \quad (10)$$

Donde el parámetro a , resulta de disponer los pares de electrodos AM, MN y NB a una misma distancia igual a a , para cada lectura realizada.

En el caso del dispositivo Schlumberger, el factor K aplicado viene dado por la ecn (11).

$$K = \frac{\pi}{4} \left(\frac{4(\overline{AB}/2)^2 - \overline{MN}^2}{\overline{MN}} \right) \quad (11)$$

En el presente estudio fueron interpretados 4 SEV de tipo Schlumberger y 18 de tipo Wenner, cuya distribución se muestra en la figura 10.

Las curvas de resistividad aparente obtenidas a partir de las mediciones efectuadas en campo son mostradas en las figuras 11 y 12.

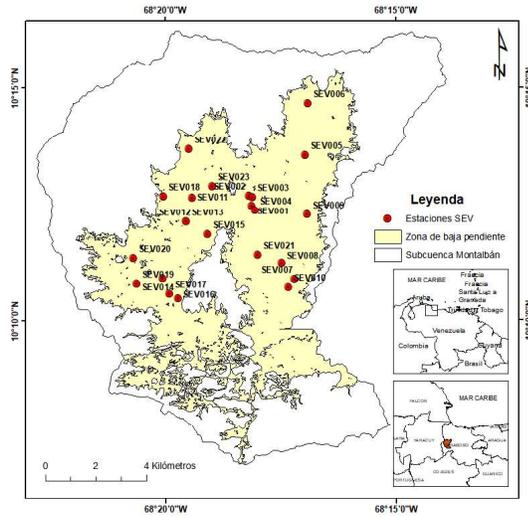


Figura 10. Distribución de los SEV.

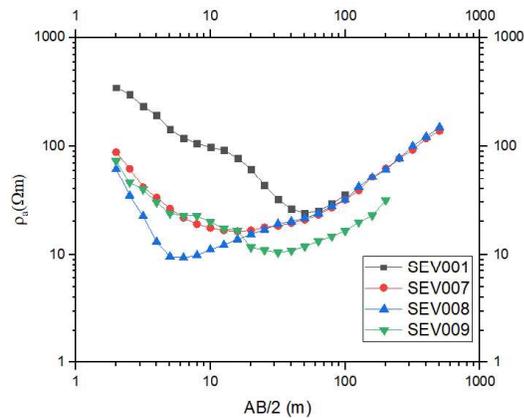


Figura 11. Curvas de resistividad aparente de los SEV tipo Schlumberger.

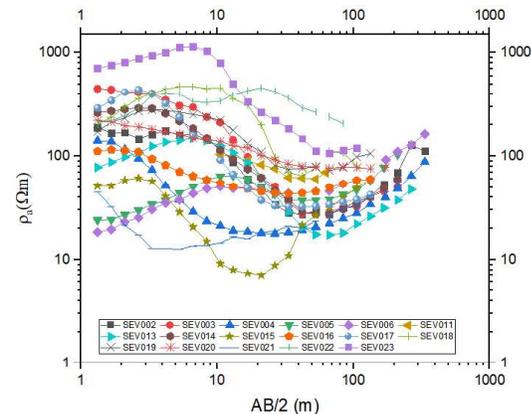


Figura 12. Resistividad aparente de los SEV tipo Wenner.

Estos sondeos, junto con otros datos geofísicos adquiridos en la zona de Montalbán en el período marzo-abril del 2019 (sísmica de refracción somera y gravimetría), son el producto del exitoso trabajo de un grupo de 17 estudiantes y 3 profesores de Ingeniería Geofísica de la Universidad Central de Venezuela (UCV), como parte de la actividad académica del curso Geofísica de Campo, la cual se lleva a cabo una vez al año en una localidad determinada, con la finalidad de que los estudiantes de Ingeniería Geofísica adquieran los conocimientos y destrezas necesarios en exploración y manejo de equipos geofísicos.

RESULTADOS

A continuación, se presenta la discusión de los resultados obtenidos para cada uno de los aspectos considerados en la sección de metodología.

Morfometría de la cuenca

A rasgos generales, la subcuenca Montalbán corresponde a un valle que cubre una superficie de 171 km², presenta una altura promedio de 818 m.s.n.m, con una cota máxima de 1,776 m y una cota mínima de 598 m. Las mayores alturas se encuentran distribuidas hacia la zona norte, noreste y noroeste, en las localidades conocidas como El Peñón, La Copa y El Marquero, permitiendo que las aguas de los ríos permanentes y temporales fluyan preferentemente en dirección nortesur, con una pendiente promedio de 5.28%.

A partir del DEM descrito en la sección 2 y con base en lo discutido en la sección 3.2, se determinaron los valores de parámetros morfométricos de la subcuenca Montalbán, mediante la aplicación de herramientas de análisis espacial incorporadas en el software ArcGIS 10.8. Para ello, se siguió el procedimiento descrito por Gaspari y colaboradores (2012). Los resultados de estos cálculos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. *Parámetros morfométricos de la subcuenca*

Parámetro	Símbolo	Valor
Perímetro (km)	<i>P</i>	70,33
Área (km ²)	<i>A</i>	171,80
Longitud máxima (Km)	<i>Lmax</i>	18,19
Longitud cauce principal (km)	<i>Lcp</i>	22,33
Ancho de la cuenca (km)	<i>Ac</i>	9,45
Altura máxima (m.s.n.m.)	<i>Hmax</i>	1776,00
Altura mínima (m.s.n.m.)	<i>Hmin</i>	598,00
Altura media (m.s.n.m.)	<i>Hm</i>	818,34
Desnivel altitudinal (m)	<i>DA</i>	1178,00
Factor forma de Horton	<i>IF</i>	0,52
Coefficiente de compacidad	<i>Kc</i>	1,51
Coefficiente de circularidad	<i>Cc</i>	0,44
Pendiente promedio (%)	<i>Pm</i>	5,28
Longitud total de drenajes (km)	<i>Ln</i>	359,83
Densidad de drenaje (km/km ²)	<i>Dd</i>	2,09
Número de cauces de orden 1	<i>Nc</i>	302,00
Coefficiente de torrencialidad	<i>Ct</i>	1,76
Pendiente del cauce (%)	<i>Sc</i>	0,05
Tiempo de concentración (h)	<i>Tc</i>	9.73

A partir de los valores obtenidos se puede inferir que la subcuenca Montalbán se caracteriza por poseer una geometría oblonga ($Kc= 1,51$), semi-redonda ($IF= 0,52$) y ligeramente ensanchada ($Cc=0,44$). Esto indica que la misma es susceptible a sufrir inundaciones ante la ocurrencia de posibles precipitaciones de moderada intensidad, ya que al poseer una superficie de relativa baja pendiente ($Pm= 5,28\%$ y $Sc=0,05\%$), es propensa a presentar limitaciones para descargar aguas superficiales y de escorrentías. Sin embargo, el valor de densidad de drenajes obtenido ($Dd=2,09$),

por ser un valor moderado, podría facilitar la escorrentía ante posibles eventos de precipitaciones intensas.

Por otra parte, se obtuvo la curva hipsométrica de la subcuenca, con la finalidad de estimar el grado de evolución de la misma. Para ello, se generó una tabla con los valores de alturas más frecuentes a intervalos de 10 m, así como el área ocupada respectivamente por estas alturas en dichos intervalos. Los datos y la gráfica de la curva hipsométrica son mostrados en la tabla 5 y la figura 13, respectivamente.

Tabla 5. Datos para la generar la curva hipsométrica

Frecuencia	Área (Km ²)	Área relativa	Altura promedio (m)	Altura relativa
10	0,00	1,00	599,00	0,34
329359	51,46	1,00	625,50	0,35
243294	38,01	0,70	675,50	0,38
83863	13,10	0,48	725,50	0,41
67179	10,50	0,40	775,50	0,44
51300	8,02	0,34	825,50	0,47
42423	6,63	0,30	875,50	0,50
35599	5,56	0,26	925,50	0,52
30506	4,77	0,22	975,50	0,55
26932	4,21	0,20	1025,50	0,58
23618	3,69	0,17	1075,50	0,61
22355	3,49	0,15	1125,50	0,64
20001	3,13	0,13	1175,50	0,67
18792	2,94	0,11	1225,50	0,69
17205	2,69	0,09	1275,50	0,72
16147	2,52	0,08	1325,50	0,75
16123	2,52	0,06	1375,50	0,78
13985	2,19	0,05	1425,50	0,81
13353	2,09	0,04	1475,50	0,84
11583	1,81	0,02	1525,50	0,87
7503	1,17	0,01	1575,50	0,89
4512	0,71	0,01	1625,50	0,92
2387	0,37	0,00	1675,50	0,95
1374	0,21	0,00	1725,50	0,98
129	0,02	0,00	1763,50	1,00

Se puede notar que aproximadamente 35% de la curva hipsométrica presenta una forma sigmodal, cóncava hacia arriba, mientras 65% restante tiene un comportamiento casi horizontal. Esto refleja que la subcuenca presenta un estado de evolución avanzado, en el cual la mayor parte de los aportes erosivos han sido alcanzados; se mantiene un equilibrio mediante el aporte de sedimentos principalmente fluviales, por lo cual la misma se puede catalogar como una cuenca sedimentaria madura con baja erosionabilidad.

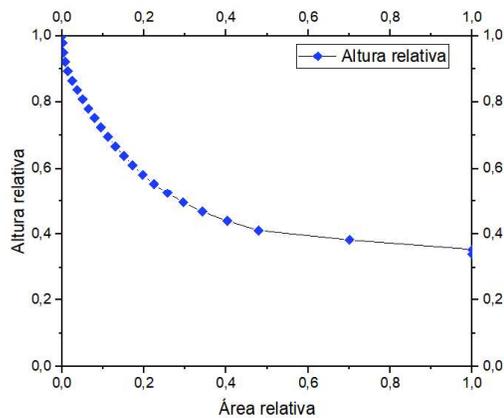


Figura 13. Curva hipsométrica de la subcuenca.

Obtención del mapa de potencial acuífero

Luego de determinar los pesos normalizados para cada capa temática W y sus correspondientes categorías wf , mediante la aplicación de AHP, se procedió a obtener el GWPI, siguiendo la metodología planteada por Macas y López (2018). Para ello se aplicó la ecn (12):

$$GWPI = P_{mW}P_{mwf} + P_{rW}P_{rwf} + P_{tW}P_{twf} + P_{NDVIW}P_{NDVIwf} + P_{DdW}P_{Ddwf} \quad (12)$$

Donde $GWPI$ es el Índice de Potencialidad de Aguas Subterráneas, m es el número de capas temáticas, n el número de clases contenido en cada capa temática, wf es el peso normalizado de cada categoría en cada capa temática y W es el peso normalizado de la capa temática. El GWPI fue calculado para una resolución de 12.5 m para todas las capas temáticas y se obtuvieron 6 clases mediante una clasificación por cuartiles. Esas clases fueron clasificadas de acuerdo con su potencialidad relativa, ordenando los valores en potenciales: Nulo, Extremadamente bajo, Muy bajo, Bajo, Moderado y Alto. Posteriormente, se generó el mapa respectivo de Potencial acuífero, el cual se ilustra en la figura 14.

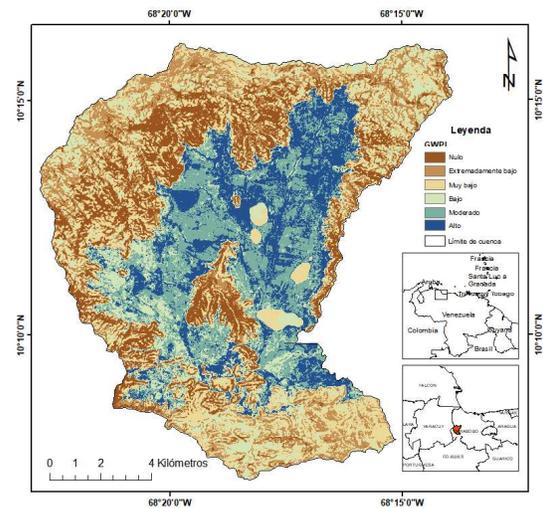


Figura 14. Mapa de Potencial Acuífero (MPA).

Al analizar la distribución espacial de las clases obtenidas, se puede observar que las zonas con Alta potencialidad se encuentran irregularmente distribuidas en la zona de baja pendiente de la cuenca, mayormente concentradas hacia el noreste, las cuales son representadas en color azul marino. Hacia el noroeste de la zona de baja pendiente, los potenciales predominantes son de categoría Moderado, representada en colores azul claro; mientras que el resto de las regiones presentan potenciales de Bajo a Nulo.

De acuerdo con lo anterior, se puede decir que los acuíferos más importantes se encuentran ubicados hacia la zona norte de la subcuenca Montalbán y los mismos se ubican en las capas de sedimentos del Cuaternario, en concordancia con la geología y morfología observada en la zona de estudio.

Interpretación de SEV

Se realizó el procesamiento de los 22 SEV mediante el software IPI2Win vs. 3.0.1e de la Moscow State University (MGU) y se obtuvieron los valores de espesores y resistividades para cada una de las capas interpretadas.

El proceso de interpretación geoelectrica, mediante el empleo del programa IPI2Win, consiste en un ajuste interactivo por inversión de un modelo matemático del subsuelo, el cual genera una curva de resistividad teórica en función de los valores de resistividad y espesores introducidos manualmente. Esta resistividad teórica es comparada con la curva de resistividades aparente, obtenida en las mediciones de campo; el programa determina el error de ajuste entre ambas curvas. El usuario puede proporcionar valores de resistividad y espesores de acuerdo con un criterio geológico que le permita obtener valores razonables de resistividad eléctrica y espesores de las capas.

Debido a que la separación existente entre cada punto de sondeo es, en

promedio, mayor a 1 km, no se consideró recomendable la realización de perfiles y mapas de resistividades para correlacionar la información, ya que esta propiedad física tiene la característica de presentar grandes variaciones laterales en poca distancia, debido a factores físicos y químicos como son la porosidad, permeabilidad y grado de salinidad de la humedad presente en las rocas.

Por tal razón, se realizó un análisis por sectores, mediante la utilización de polígonos de Thiessen, los cuales consideran el área de influencia horizontal para cada punto de muestreo o lugar donde fue realizado cada sondeo. Para ello, se utilizó la herramienta de generación de polígonos de Thiessen, incorporada en el software ArcGIS 10.8, generando el mapa que se muestra en la figura 15. Los polígonos fueron restringidos a la zona de baja pendiente, ya que ningún sondeo fue realizado en zonas con pendiente pronunciada.

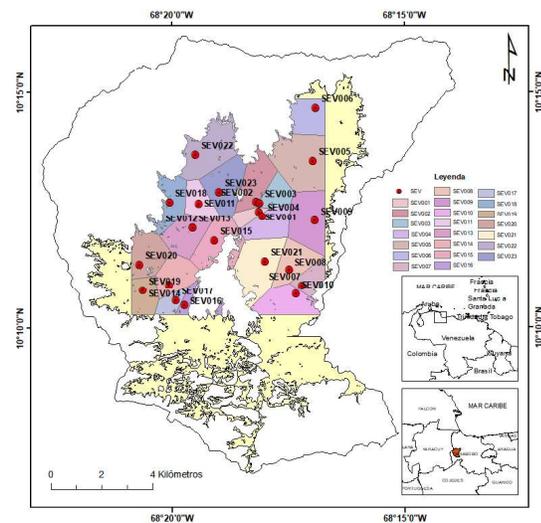


Figura 15. Polígonos de Thiessen para cada SEV.

Los resultados de resistividades y espesores aparentes, obtenidos para cada uno de los 22 SEV, se resumen en la tabla 6. Para ello, se tomó en cuenta la información geológica y de pozos disponibles, así como el tipo de curva de resistividad aparente obtenido.

Mediante la inspección de la tabla 6 y el mapa de polígonos de Thiessen, se puede observar que para la zona noreste, específicamente en el sector correspondiente a los sondeos SEV005 y SEV006, caracterizados por presentar una curva tipo KH, se obtuvieron resistividades muy bajas, para la primera, segunda y tercera capa, lo cual sugiere la presencia de capas muy conductivas; la segunda y tercera capa son las que presentan valores que favorecen la

acumulación de aguas subterráneas. Debido a la baja resistividad de la primera capa, se infiere que la misma está asociada a la presencia de una capa de limos arcillosos con un espesor promedio de 3 m, mientras que la segunda capa y tercera capa, al poseer una resistividad que varía entre 87,9Ωm y 246Ωm, se encuentra asociada a capas intercaladas de arenas, gravas y limos, con espesores que varían entre 76 y 130 m.

Tabla 6. Resistividades y espesores verdaderos

	Nivel ->	1	2	3	4	5	CURVA
SEV001	r_a (Ω.m)	475	104	7,85	96,7		HKH
	h (m)	1,28	10,5	14,9			
SEV002	r_a (Ω.m)	265	61	664	23,2	18773	HKH
	h (m)	0,946	0,929	1,79	97,5		
SEV003	r_a (Ω.m)	469	351	42,1	10,8	81,9	QQH
	h (m)	1,58	6	19,8	24,6		
SEV004	r_a (Ω.m)	116	324	19	50,7	3341	KHA
	h (m)	0,6	0,613	81,9	84,4		
SEV005	r_a (Ω.m)	23	246	28,1	22928		KH
	h (m)	4,16	4,26	126			
SEV006	r_a (Ω.m)	15,6	87,9	33,7	696		KH
	h (m)	1,72	6,19	70,2			
SEV007	r_a (Ω.m)	154	22,9	16,4	661		QK
	h (m)	1	1,75	47			
SEV008	r_a (Ω.m)	54,3	4,06	176	11	1362	HA
	h (m)	1,37	2,34	2,4	20,8		
SEV009	r_a (Ω.m)	107	18,5	4,72	15,1	1525	QHA
	h (m)	1	8,43	9,11	63,9		
SEV010	r_a (Ω.m)	107	12,7	26,4	15,2	200	HKH
	h (m)	1,57	2,97	3,86	47		
SEV012	r_a (Ω.m)	67,81	188	92,99	20,9	133,3	KQH
	h (m)	1	6,407	24,32	32,23		
SEV013	r_a (Ω.m)	57,5	214	13,7	386		KH
	h (m)	1,09	7,66	94,5			
SEV014	r_a (Ω.m)	223	805	82,2	8,76	115	KQH
	h (m)	1,29	1,05	17,2	24,8		
SEV015	r_a (Ω.m)	29,4	202	3,16	3167		KH
	h (m)	0,84	1,21	12,9			

Continuación tabla 6...

	Nivel ->	1	2	3	4	5	CURVA
SEV016	r_a (Ω .m)	97,5	202,1	52,83	26,18	72,71	KQH
	h (m)	0,798	0,87	13,84	16,63		
SEV017	r_a (Ω .m)	180	1502	57,7	24,6	51,5	KQH
	h (m)	0,665	0,839	9,33	34,5		
SEV018	r_a (Ω .m)	85,9	2438	15,3	252		KH
	h (m)	0,877	2,75	14,4			
SEV019	r_a (Ω .m)	101	396	66,6	2967		KH
	h (m)	0,65	5,34	116			
SEV020	r_a (Ω .m)	236	156	76,1			Q
	h (m)	1,37	8,82				
SEV021	r_a (Ω .m)	104	9,86	16,7	32,4	252	HAA
	h (m)	0,78	2,49	22,9	79,7		
SEV022	r_a (Ω .m)	125	1380	147	1519	155	KHK
	h (m)	0,926	1,07	3,36	5,97		
SEV023	r_a (Ω .m)	593	3794	175	102		KQH
	h (m)	1,62	1,87	19,4			

De igual modo, los sondeos SEV001, SEV002, SEV003 y SEV004 mostraron una buena correlación, pero en este caso, las profundidades con mayor potencial se ubican a mayor profundidad, superiores a los 90 m. Estos resultados son acordes con los valores de potencial acuífero obtenidos para esa zona. Adicionalmente, se tiene conocimiento de que en la zona existen pozos profundos que presentan buenos caudales, con capacidad para abastecer a las comunidades cercanas

En la zona suroeste, los sondeos SEV014, SEV019 y SEV020 presentaron una resistividad mayor para la primera capa, con un valor promedio de 187 Ω m, es decir, se indica la presencia de una capa superficial arenosa con un espesor promedio de 1.10 m. Sin embargo, para la segunda y tercera capas, las resistividades varían drásticamente entre los tres sondeos, con valores que van desde 76 Ω m hasta 805 Ω m. Considerando que los tres sondeos se encuentran relativamente cercanos, esto

sugiere la presencia de cauces de arena o limos, que pueden favorecer en mayor o menor grado la acumulación de aguas subterráneas, respectivamente. De acuerdo con los valores de resistividad obtenidos para la segunda, tercera y cuarta capas, se estima que las profundidades con mayor potencial acuífero se encuentran entre los 43 y 120 m. Al comparar este resultado con el obtenido en el MPA, también se observa correspondencia, ya que esta zona fue clasificada como una zona de PA moderado a alto.

De igual modo, la zona donde se encuentran ubicados los sondeos SEV007, SEV008, SEV010 y SEV021, presenta una resistividad alta para la capa superficial, la cual tiene un valor promedio de 104 Ω m, para los primeros 1.32 m, lo cual indica suelos arenosos en la capa superficial. Posteriormente, se observan resistividades muy bajas para la segunda, tercera y cuarta capas, a saber, se sugiere la presencia de arcillas y limos.

CONCLUSIONES

La subcuenca Montalbán presenta rasgos de una cuenca sedimentaria madura, cuya actividad erosiva ya ha cesado y se mantiene en equilibrio sedimentario. La misma presenta una geometría ensanchada oblonga, con muy baja pendiente en su parte central (< 6%), lo cual la hace propensa a inundaciones ante fuertes precipitaciones. Sin embargo, los valores de densidad de drenajes, relativamente moderados ($Dd=2,09$), indican la presencia de una buena escorrentía ante posibles eventos de precipitaciones intensas. Debido a que las zonas norte, noreste y noroeste de la cuenca presentan una elevada pendiente, se recomienda llevar a cabo un estudio de análisis de riesgo para determinar las zonas propensas a sufrir deslizamientos o deslaves ante la ocurrencia de fuertes precipitaciones. Esto significa un riesgo latente, dado que existen evidencias y estudios que han determinado la pérdida de cobertura vegetal en la zona de montaña, debido principalmente a los incendios que se han producido en estas localidades.

Por otra parte, mediante la aplicación del método MCDA, combinado con el AHP, se determinó que las zonas con mayor potencial de aguas subterráneas se encuentran ubicadas en la zona de baja pendiente, específicamente hacia el noroeste de la subcuenca; mientras que las zonas con un potencial moderado se encuentran ubicadas hacia las zonas sureste y suroeste.

A partir del análisis de los SEV, se pudo conocer que existe correspondencia con el mapa de potencial acuífero, evidenciado por los valores de resistividad obtenidos a diferentes profundidades. En general, se encontraron valores bajos de resistividad en la primera capa, asociados a la presencia de capas limo-arcillosas, lo cual indica poca permeabilidad relativa a nivel superficial.

Hacia la zona noreste se determinaron capas intercaladas de arenas, limos y gravas para la segunda y tercera capas, específica-

mente a profundidades comprendidas entre 76 y 130 m, lo cual facilitaría la acumulación de aguas subterráneas para dichas profundidades. Hacia las zonas sureste y suroeste, se encontraron valores muy variables de resistividad para la segunda y tercera capas, lo cual es indicativo de la presencia de canales de arena y arcillas arenosas, los cuales pueden contribuir en mayor o menor grado a la acumulación de aguas subterráneas. Para este caso, las profundidades prospectivas se ubicaron entre 43 y 120 m.

Para tener mayor detalle en la delimitación de los sistemas acuíferos presentes en la zona, se recomienda un estudio que contemple la realización de calicatas o tomografías de resistividades eléctricas, las cuales deberán tener una longitud de tendido, superior a los 600 m para poder garantizar una profundidad de prospección mayor a los 100 m.

Se recomienda hacer un uso consciente y racional de estos recursos para poder garantizar el suministro permanente de agua potable para agricultores, ganaderos y habitantes de esta región.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el acceso a los datos por parte del Departamento de Geofísica de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la UCV. Un reconocimiento especial a los estudiantes de Geofísica de Campo 2019, a los profesores Michael Schmitz, Mariano Arnaiz, Inírida Rodríguez y José Cavada, por contribuir con su aporte tanto en la adquisición de los datos como en el control de calidad de los mismos. A la Estación Experimental UCV-Montalbán de la Facultad de Agronomía UCV, al Instituto Venezolano Alemán de Ciencias Ecológicas Aplicadas (IVACEA) y la compañía Esri de Venezuela.

REFERENCIAS

- Bellizzia, A., & D. Rodríguez. (1968). Consideraciones sobre la estratigrafía de los estados Lara, Yaracuy, Cojedes y Carabobo. *Bol. Geol., Caracas*, 9(18), 515-563.
- Cañizales, A., S., Peñuela, D., Díaz-Martín, M. E., Febres, O., Caldera, L., Valderrama, & Mujica, E. (2006). Gestión integrada de los recursos hídricos en Venezuela. Informe del Proyecto de Gestión Integrada de Hídricos. Vitales. Caracas.
- Coplanarh (1974). Estudio geomorfológico de las regiones costa noroccidental, centro occidental y central (Sistema montañoso noroccidental). Inventario Nacional de Tierras. Comisión del plan nacional de aprovechamiento de los recursos hidráulicos. Publicación No. 44.
- Dataset: ©JAXA/METI ALOS PALSAR L1.0 (2011). Accessed through ASF DAAC. Recuperado de <https://search.asf.alaska.edu>. 10 de abril 2020.
- Decreto Nro. 2647. Gaceta Oficial de la República de Venezuela, 31485, mayo 12, 1978.
- Gaspari F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la Cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. AUGMDOMUS. Asociación de Universidades Grupo Montevideo ISSN:1852-2181, 4, 143-158.
- Henaos, J. E. (1988). Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomás, Centro de enseñanza desescolarizada.
- Jardí, M. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, 19, 41-68.
- 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.
- Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10(6), 362.
- Macas-Espinosa, V., & López-Escobar, K. (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*. Asociación Española de Teledetección. ISSN 113-0953. EISSN 1998-8740. (51), 135-145.
- Martínez, Z. (2011). Situación de los Recursos Hídricos en Venezuela. Asociación Venezolana para el Agua (AveAgua). Caracas.
- Madrucci, V., Taioli, F., & De Araújo, C. C. (2008). Groundwater favorability map using GIS multicriteria data analysis on crystalline terrain, São Paulo State, Brazil. *Journal of Hydrology*, 357(3-4), 153-173.
- Olivares, B., Hernández, R., Coelho, R., Molina J., & Pereira, Y. (2017). Análisis espacial del índice hídrico: avances en la adopción de decisiones sostenibles en territorios agrícolas de Carabobo, Venezuela. *Revista Geográfica*. ISSN: 1011-484X, (60), 227-299.
- Orellana, E. (1972) Prospección Geoelectrica en Corriente Continua. Madrid, España: Paraninfo.
- Osorio, A., & Morales, A. (2015). Informe preliminar sobre la delimitación de la Cuenca Alta del Río Cojedes Utilizando SIG y MED: Variaciones con los decretos 105 (1974) y 2.647 (1978). Instituto Venezolano Alemán de Ciencias Ecológicas Aplicadas (IVACEA). Aguirre, Edo. Carabobo.

- Racca, J. M. G. (2007). Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología*, 77(1-2), 31-38.
- 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.
- 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.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. New York: McGraw-Hill.
- Salas, V., & Castillo, R. (2012). *Venezuela: Gestión integrada de cuencas en el Estado Carabobo. Caso de estudio para la Toolbox de Global Water Partnership Sudamérica*.
- Teeuw, R. M. (1995). Groundwater exploration using remote sensing and a low-cost geographical information system. *Hydrogeology Journal*, 3(3).
- Ynfante, M. (2017). *Integración geológica de la región comprendida entre Palmasola, Morón y Valencia, estados Yaracuy y Carabobo (trabajo especial de grado)*. Caracas: Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería, UCV.