

Identificación de las principales áreas de recarga de acuíferos en la zona media del departamento del Cesar

Identification of the main aquifer recharge areas in the middle zone of the department of Cesar

Ingrid Lorena Pinzón Pulido* y Ángela Patricia Alfonso Palacios**

Cómo citar:

Pinzón Pulido, I. L., & Alfonso Palacios, A. P. (2020). Identificación de las principales áreas de recarga de acuíferos en la zona media del departamento de Cesar. *Ingeciencia*, 5, 109-124.

* Ingeniera ambiental, Universidad Central. Correo: ipinzonp@ucentral.edu.co
** Ingeniera ambiental, Universidad Central. Correo: aalfonsop@ucentral.edu.co

Resumen

En Colombia, uno de los departamentos afectados con fuerza en las últimas décadas por la escasez de agua es el Cesar, caracterizado por sus suelos áridos y la extracción minera de carbón, que contribuye a la erosión del suelo y a la contaminación de fuentes hídricas. El objetivo de este trabajo es identificar las principales áreas de recarga de acuíferos en la zona media del departamento del Cesar con el fin de favorecer el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo. Se sintetizó información hidrológica y geográfica de la zona para construir mapas de precipitación, geología, textura de suelos, permeabilidad, usos del suelo, densidad de drenajes y densidad de fallas, que posteriormente fueron analizados y procesados con la herramienta *álgebra de mapas* de ArcGIS. El resultado indica que las principales zonas de recarga están ubicadas en el norte del área de estudio, específicamente en los municipios de Becerril, El Paso y Agustín Codazzi. Esta información permite orientar, planificar y gestionar la provisión del recurso hídrico subterráneo en las áreas identificadas.

Palabras clave: escasez, geología, hidrología, recurso hídrico subterráneo, suelos áridos.

Abstract

In Colombia, one of the departments strongly affected during the last decades by the water shortage is Cesar, whose main characteristics are its arid soils and coal mining that contributes to soil erosion and contamination of water sources. The objective of this work is to identify the main aquifer recharge areas in the middle zone of the department of Cesar in order to favor the use of groundwater resources. Hydrological and geographic information of the area was gathered for the construction of maps of precipitation, geology, soil texture, permeability, land use, drainage density and fault density, which were later analyzed and processed with the ArcGIS map algebra tool, resulting in the main recharge areas of the middle zone of the department of Cesar, where it was identified that most of these are located to the north of the study area, specifically in the municipalities of Becerril, El Paso and Agustín Codazzi; This will make it possible to guide, plan and manage the provision of the groundwater resources of the previously identified areas.

Keywords: arid soils, geology, hydrology, scarcity, water resource.

1. Introducción

El mundo, hoy en día, se ha visto afectado por la escasez de agua debido a que las principales fuentes hídricas del planeta han sido contaminadas o sobreexplotadas para cubrir la demanda del recurso en zonas superpobladas. A su vez, las Naciones Unidas, en el segundo informe sobre el desarrollo del recurso hídrico en el mundo que entregó en el 2006, afirma que “el agua es una responsabilidad compartida y que la insuficiencia de agua se debe a un abastecimiento ineficaz y no a la ausencia del recurso en sí” (Programa Mundial de la Unesco de Evaluación de Recursos Hídricos, 2006), a lo cual también contribuye la falta de inversión del Estado, tanto en capital humano competente como en infraestructura física adecuada (Anaya, 2018). Asimismo, se debe agregar la descoordinación y dispersión de la política del agua, la percepción errónea sobre la abundancia y riqueza hídrica del país y el disimulo o desinterés con que se ignoran las múltiples presiones que se ciernen sobre el agua (Zamudio, 2012)

En Colombia, según el reporte de avance del Estudio Nacional del Agua, en el año 2018 se identificaron los municipios con susceptibilidad al desabastecimiento, en el cual se afirma que el departamento del Cesar tiene una afectación del 88% en el total de sus municipios, de manera que se ubica en el tercer lugar en cuanto a susceptibilidad de desabastecimiento de agua en el país. Debido a esto es importante realizar estudios para determinar la disponibilidad de agua en el departamento y de esta forma plantear estrategias para contrarrestar la escasez, pues actualmente no se cuenta con información clara respecto a la recarga de acuíferos. Una alternativa viable puede ser aprovechar las aguas subterráneas, respecto a las cuales se tiene conocimiento de 1118 puntos de extracción (pozos, aljibes, manantiales, aljibes-pozos) distribuidos en todo el departamento (Corporación Autónoma Regional del Cesar [Corporcesar], 2006).

Colombia tiene pocos estudios sobre los procesos de recarga. Uno de estos propone una metodología que fue aplicada en el Valle de Aburrá para delimitar zonas de recarga y sistemas regionales de flujo a un acuífero (Escobar *et al.*, 2017). En este trabajo se emplearon técnicas de decisión multicriterio para identificar y determinar la importancia relativa de los distintos factores que pueden incidir en la recarga, análisis que fue apoyado en juicios de expertos y soportado en evaluaciones cuantitativas (Escobar *et al.*, 2017).

Concretamente, esta investigación identifica las principales áreas de recarga de acuíferos en la zona media del departamento del Cesar aplicando procedimientos que fueron usados en otras regiones del país. Así, se analizan variables hidrológicas y geológicas, como el balance hídrico de la zona, la porosidad y la permeabilidad de los suelos, y el uso y la textura de suelos, con el fin de categorizar las zonas que beneficiarán a la comunidad. Este análisis provee información esencial para apoyar a los gobernantes en la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico y, de esta forma, mejorar la calidad de vida de los pobladores de esta región del país.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El departamento del Cesar se encuentra localizado en la zona noreste del país. Limita al norte con los departamentos de La Guajira y del Magdalena; al sur con los departamentos de Bolívar y Norte de Santander, y al oriente con Norte de Santander y Venezuela. Cesar es el departamento del Caribe que tiene la más alta temperatura promedio anual ($29,10^{\circ}\text{C}$), igualmente, su precipitación promedio anual es ligeramente inferior a la media de la región.

La investigación se realizó en los municipios de Agustín Codazzi, Astrea, Becerril, Bosconia, Chimichagua, Chiriguana, Curumaní, El Paso y La Jagua de Ibirico (figura 1), los cuales pertenecen a la zona media del departamento de Cesar, tienen un área total de $9074,72\text{ km}^2$ y su altitud oscila entre 49 y 3000 m.s.n.m. La zona de estudio se considera megadiversa debido a su variada conformación fisiográfica: en sus distintos pisos altitudinales se encuentran varias unidades climáticas, entre las cuales predomina cálido semiárido, cálido húmedo y, cerca de la frontera con Venezuela, templado húmedo y frío húmedo (Corpocesar, 2019).

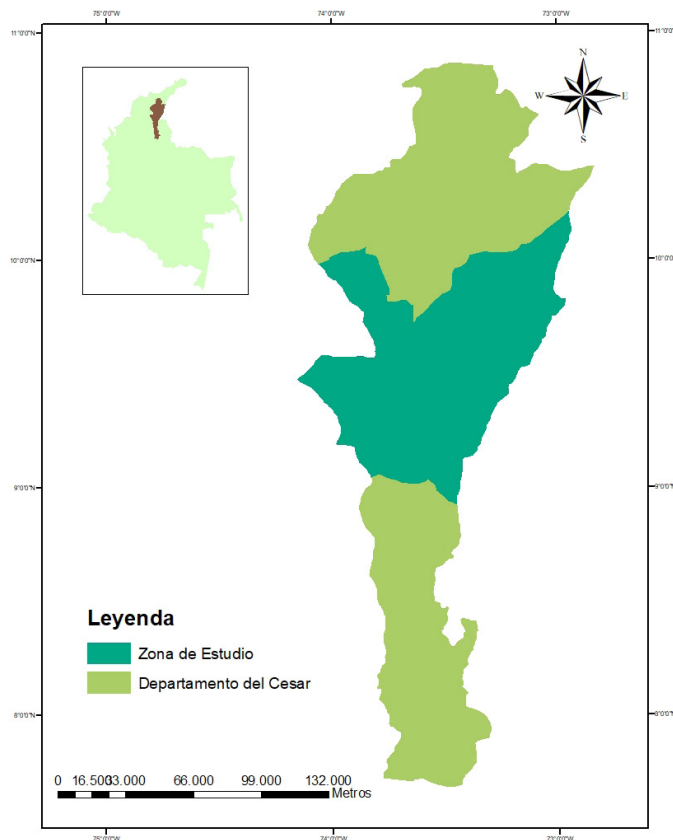


Figura 1. Mapa del área de estudio.

Fuente: elaboración propia.

2.2 Recolección de datos

2.2.1 Información geológica

La cartografía geológica se buscó en el Geoportal del Servicio Geológico Colombiano, a escala 1:100 000, con el fin de construir una tabla que permitiera identificar cada formación geológica y el tipo de suelo (arena, grava, arcilla, etc.) del que está compuesta. Teniendo en cuenta lo anterior, se hizo una revisión bibliográfica para conocer el coeficiente K de permeabilidad de cada uno de los componentes litológicos presentes. El mapa de permeabilidad se elaboró a partir de la información del libro *El terreno*, en el cual González (2001) plantea un rango de coeficiente K que empieza en un orden de 102 cm/s hasta 10-11 cm/s, dependiendo del tipo de suelo, y los clasifica desde suelos muy permeables hasta suelos impermeables.

Asimismo, el mapa de textura de suelos se basó en la relación que existe entre la permeabilidad y la textura de suelos (Loyola *et al.*, 2015), de acuerdo con la cual un suelo de baja permeabilidad tiene características de franco arcilloso y un suelo muy permeable de arena gruesa o grava. Finalmente, el mapa de usos de suelos se realizó con los datos abiertos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) del departamento del Cesar a escala 1:100 000, al cual se le realizó el corte de la zona de estudio; esto mismo se hizo para la curvas de nivel y las fallas geográficas.

2.2.2 Información hidrometeorológica

La información hidrometeorológica se sistematizó en una base de datos a partir de información cuantificada de un período de veinte años de las 33 estaciones de monitoreo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) que se encuentran activas en la zona. Se consideraron las variables de precipitación, caudales, temperatura (para esas variables se tuvo en cuenta los valores máximos, mínimos y medios), brillo solar, evaporación y humedad.

Posteriormente, se depuró la información complementando los datos faltantes para series temporales con el método de razón normal. Después se calculó el promedio anual de cada variable hidrometeorológica para cada uno de los veinte años que se consideraron en el estudio, con el fin de buscar el período multianual de cada estación y ponderar cada variable para obtener los valores de las ecuaciones de evapotranspiración potencial y real, las ecuaciones de Hargreaves, modificada para Colombia, y Budyko y Zubenok (1974), respectivamente (ecuaciones 1 y 2):

$$ETP = 0,00216E_0(T_{med} + 17,78)(T_{max} - T_{min})^{0,47} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$ETR = \sqrt[2]{\left(ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) \left(1 - \cosh\left(\frac{P}{ETP}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right)\right)\right)} \quad \text{Ecuación 2}$$

La escorrentía se determinó con las series de caudales medios transformados a escorrentías usando la relación caudal-área (Ideam, 2018). Por ende, se utiliza el mismo valor del caudal medio multianual en el período estudiado para implementar esta variable en el balance hídrico.

Luego de realizar estas operaciones, se resolvió la ecuación de balance hídrico (ecuación 3) (Ocampo, 2012), cuyo resultado se utilizó para calcular la oferta hídrica superficial, que equivale al volumen de agua continental de los sistemas de drenaje superficial en un período determinado.

$$\frac{dS(t)}{dt} = P(t) - E(t) - R(t) \quad \text{Ecuación 3}$$

2.2.4 Generación de mapas

Los mapas se elaboraron con la cartografía de la zona de estudio disponible en el IGAC y en Ingeominas a escala 1:100 000 (los más precisos que se encontraron para la zona). Mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), se generaron *shapes* de cada variable utilizada para evaluar las zonas potenciales para la recarga de acuíferos. Asimismo, se ejecutaron densidades de fracturamiento, precipitación, geológico, permeabilidad, densidad de drenajes, uso de suelos y litología.

El mapa de densidades, tanto el de fracturamiento como el de drenajes, se realizó utilizando la herramienta de densidad de línea en ArcGis. Al respecto, se debe destacar que para la densidad de fracturamiento se tuvo en cuenta los parámetros establecidos por el Servicio Geológico Colombiano en el año 2016, según los cuales para generar mapas a escala 1:100 000 se utiliza un tamaño de píxel de 250 metros y un radio de 1 250 metros. El mapa de precipitación se obtuvo luego de calcular la precipitación media anual por estación durante un período de veinte años (2000-2020). El mapa de uso de suelos fue elaborado por el IGAC y recategorizado en el proceso.

Específicamente, para identificar y delimitar las zonas de recarga y flujos regionales del sistema hidrogeológico se aplicó el análisis jerárquico ponderado (AHP) (Escobar *et al.*, 2017) al conjunto de variables que se consideraron fundamentales en distintos órdenes de importancia y que condicionan el ingreso y movimiento del agua al subsuelo.

La demarcación de las áreas de mayor potencial de agua subterránea de la zona media del departamento del Cesar se basó en los elementos o actividades que se consideran con mayor potencial para la recarga desde fuentes superficiales y flujos regionales. Por lo tanto, se integraron los mapas temáticos (densidad de fracturamiento, densidad de drenaje, uso del suelo/cobertura del suelo, precipitación y permeabilidad), utilizando la herramienta de ArcMap para superponer las diferentes capas, después de considerar la evaluación de peso (Souissi *et al.*, 2018).

3. Resultados y discusión

3.1 Hidrometeorología

Se analizó la información hidrometeorológica de la zona de estudio proveniente de 33 estaciones de monitoreo del Ideam que se encuentran activas en el área. Esto dio como resultado valores multianuales de precipitación de 89,29 mm, temperatura media de 29,29 °C, máxima de 38,29 °C y mínima de 22,23 °C. A su vez, se obtuvo un valor de radiación extraterrestre expresada en evaporación equivalente de 142,37 mm.

Con el fin de realizar el balance hídrico del área de estudio, se aplicaron las ecuaciones 2 y 3, cuyos resultados se reemplazaron para resolver la ecuación de balance hídrico (ecuación 4). Estos cálculos arrojaron una evapotranspiración (ETP) de 53,37 mm y una evapotranspiración real (ETR) de 44,70 mm. Respecto a la escorrentía superficial, su valor corresponde a 22,20 mm/año. Con base en esta información se determinó que la concentración de la zona de estudio es de 22,38 con signo positivo, lo cual significa que hay reposición de humedad en el suelo (Alarcón & Díaz, 2018).

En cuanto a las precipitaciones del área de estudio, se observó que son directamente proporcionales a la fisiografía de la zona. Las precipitaciones máximas se presentan donde se encuentran cuerpos de agua (ciénagas) y cerca de la zona montañosa, la cual aumenta con la altitud; la lluvia tiende a ser más importante en las proximidades de las costas. Los sistemas nubosos se consumen a medida que avanzan hacia el interior de los continentes (por abandono progresivo de su humedad bajo forma de lluvia) y las precipitaciones decrecen (Vich, 1996). En la figura 2 se muestran las concentraciones de lluvias para un período de veinte años.

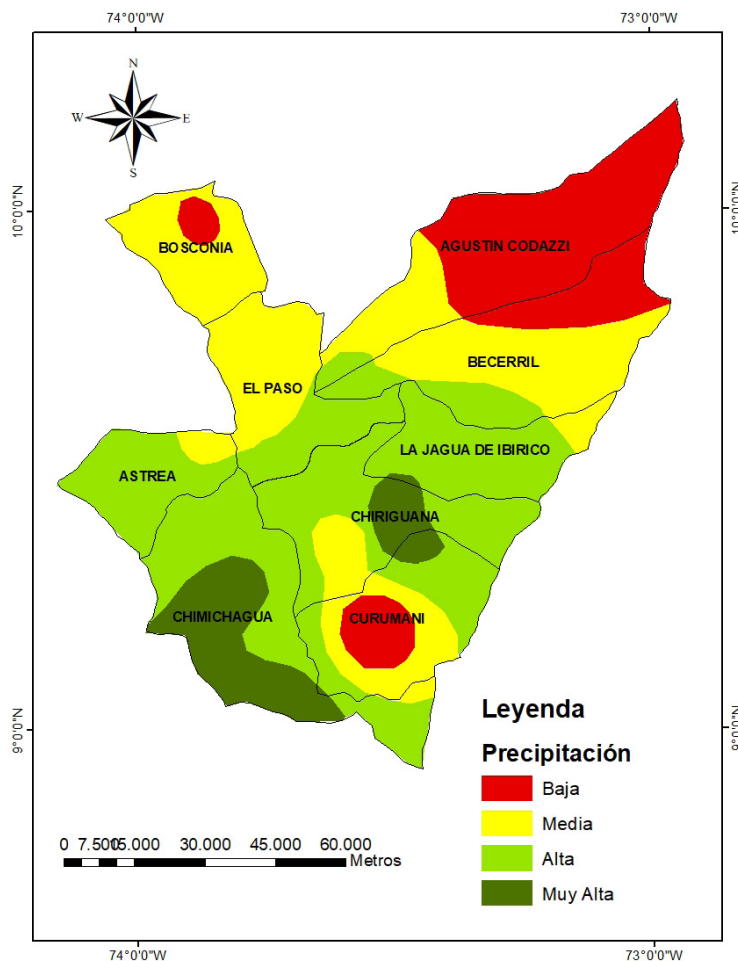


Figura 2. Mapa de precipitaciones.

Fuente: elaboración propia.

3.2 Textura de suelo y permeabilidad

Al realizar la clasificación de permeabilidad se tuvo en cuenta el rango de valores propuestos por González (2001), a partir de los cuales se obtuvieron cinco clases diferentes de permeabilidad. Asimismo, estas fueron utilizadas para clasificar la textura del suelo de acuerdo con la comparación que hacen Loyola *et al.* (2015) (figura 3).

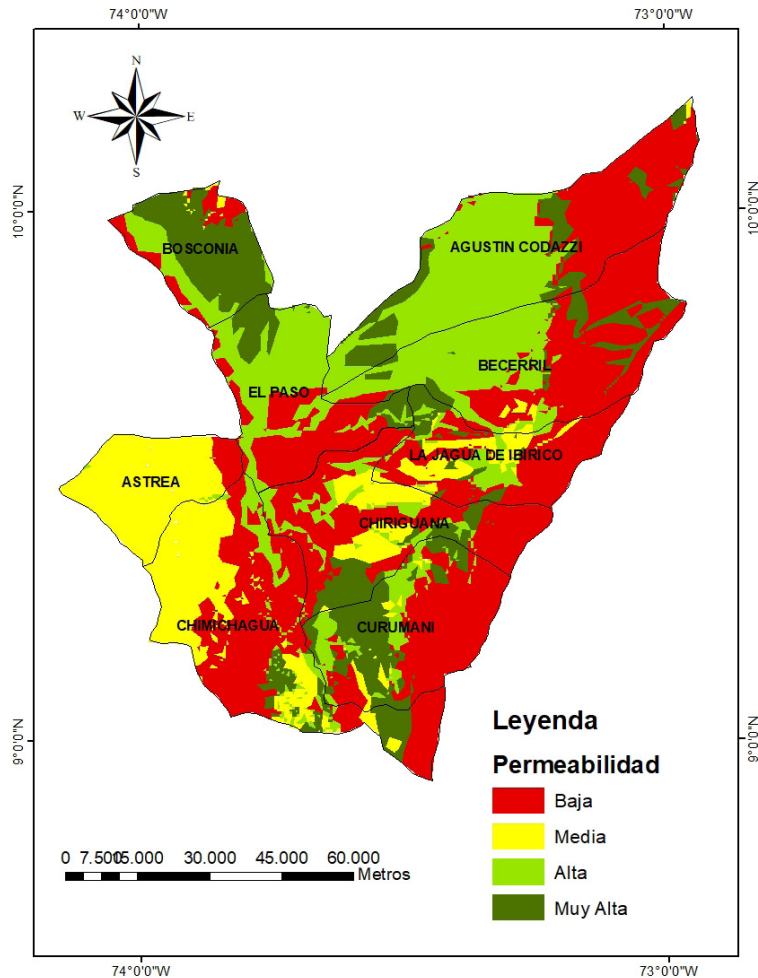


Figura 3. Mapa de permeabilidad de suelos.

Fuente: elaboración propia.

La textura del suelo (figura 4) desempeña un papel importante en la recarga de acuíferos, ya que la velocidad de infiltración, la percolación y la permeabilidad del suelo dependen del tamaño y el número de poros. La zona media del departamento del Cesar tiene una extensión significativa de suelo franco arcilloso y arcilloso, que se caracterizan por ser suelos finos, es decir, que presentan una velocidad de infiltración muy baja (0,05-0,8 cm/hora), de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

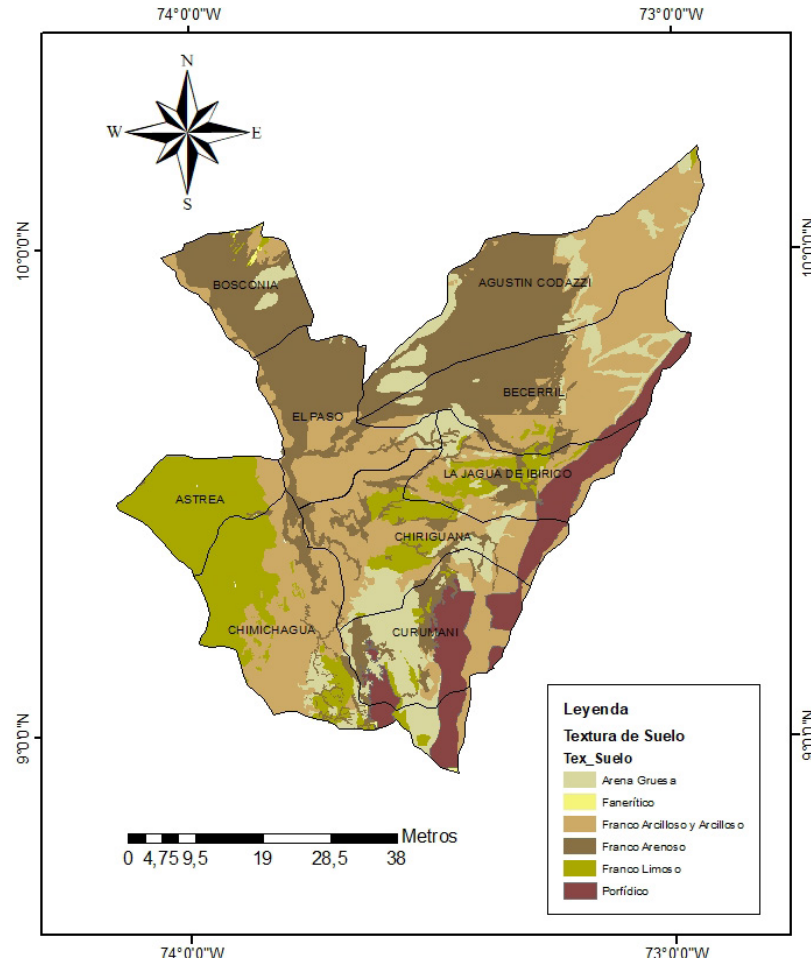


Figura 4. Mapa de textura de suelos.
Fuente: elaboración propia.

3.3 Uso de suelo

Las áreas geográficas bajo cuerpos de agua, agricultura y bosque o vegetación tienen un mayor potencial de recarga de agua subterránea que los asentamientos o áreas impermeables y el área debajo de terrenos baldíos (Kaur *et al.*, 2020). Por lo tanto, se asignó un peso alto al área debajo de los cuerpos de agua y el peso mínimo al área debajo de las superficies impermeables (figura 5).

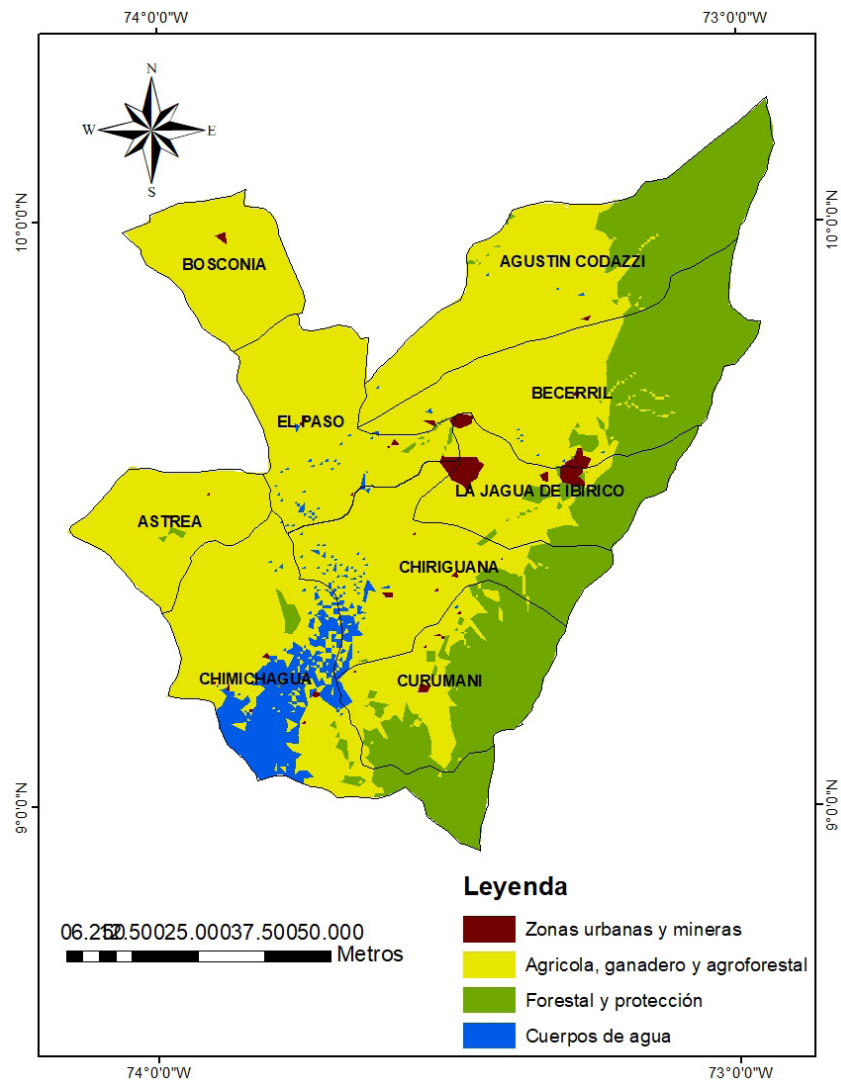


Figura 5. Mapa de usos de suelos.

Fuente: elaboración propia.

2.3.4 Densidad de drenaje

Según Prasad *et al.* (2007), a mayor densidad de drenaje se produce una escorrentía más fuerte, y a menor, aumenta la capacidad de infiltración del suelo (figura 6). Por lo tanto, cuanto menor sea la densidad de drenaje, mayor es la probabilidad de recarga potencial de la zona (figura 6).

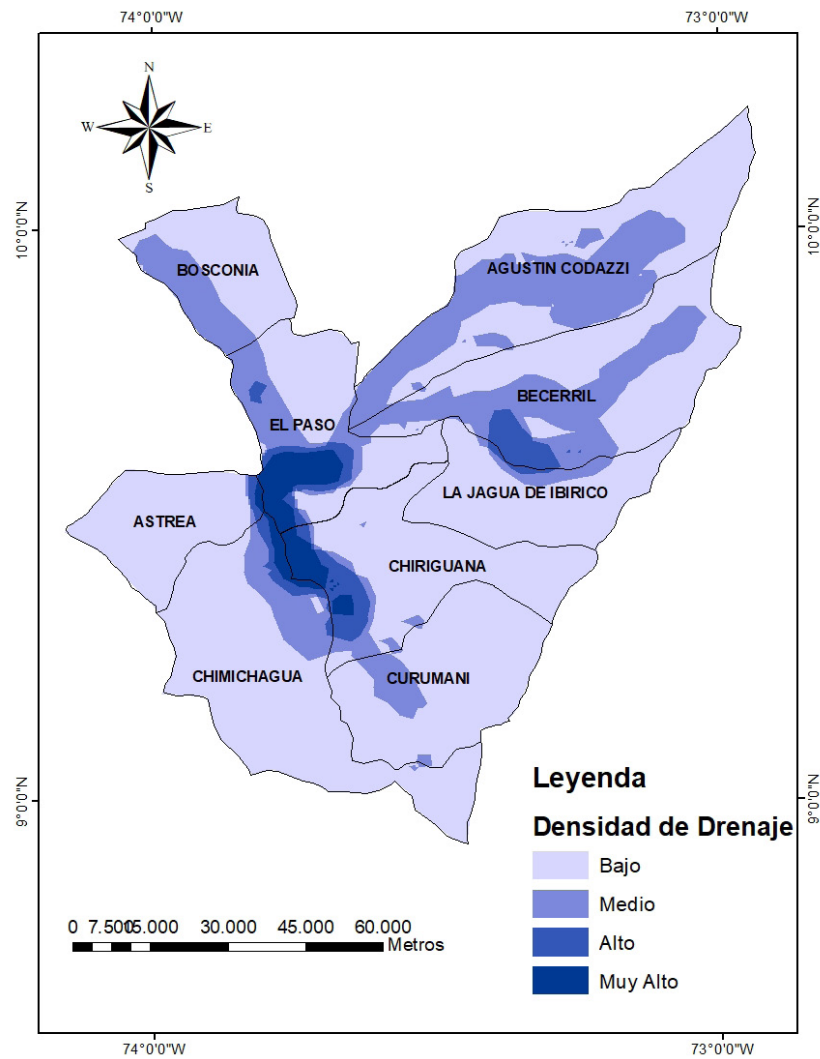


Figura 6. Mapa de densidad de drenaje.

Fuente: elaboración propia.

3.5 Fallas geológicas

En la zona media del departamento del Cesar se encuentran ubicadas diversas fallas, principalmente hacia la región sureste (figura 7). Entre ellas se distinguen ocho diferentes tipos: fallas, fallas cubiertas, fallas de rumbo dextral, fallas de rumbo sinistral, fallas inversas o de cabalgamiento y lineamiento.

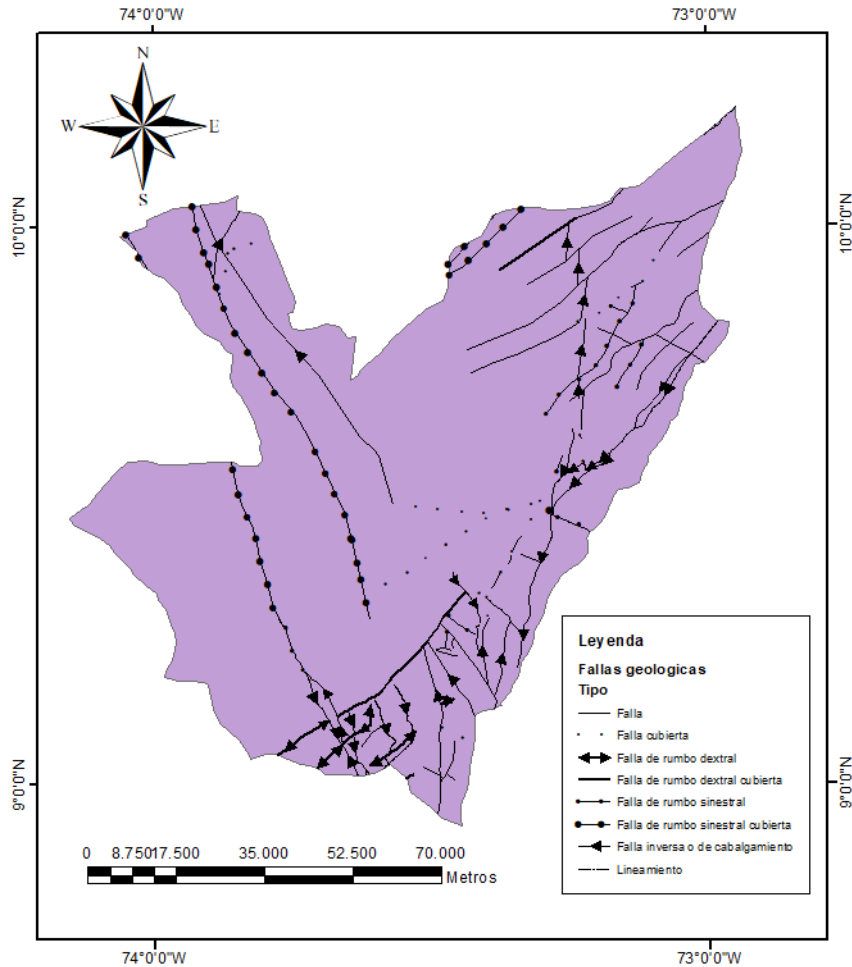


Figura 7. Mapa de fallas geológicas.

Fuente: elaboración propia.

3.6 Densidad de fallas

Un lineamiento puede definirse como una característica lineal de la superficie, que está relacionada con fallas o fracturas. De esta forma, zonas con mayor densidad de lineamientos poseen un mayor grado de fracturamiento, y permiten una mayor infiltración del agua. A su vez, es importante precisar el tipo de fracturamiento que se encuentra en la zona y de esa manera saber si es más propenso a facilitar la recarga. Por lo tanto, con la información recolectada se puede afirmar que a mayor densidad de lineamientos existe mayor probabilidad de recarga potencial de aguas (figura 8).

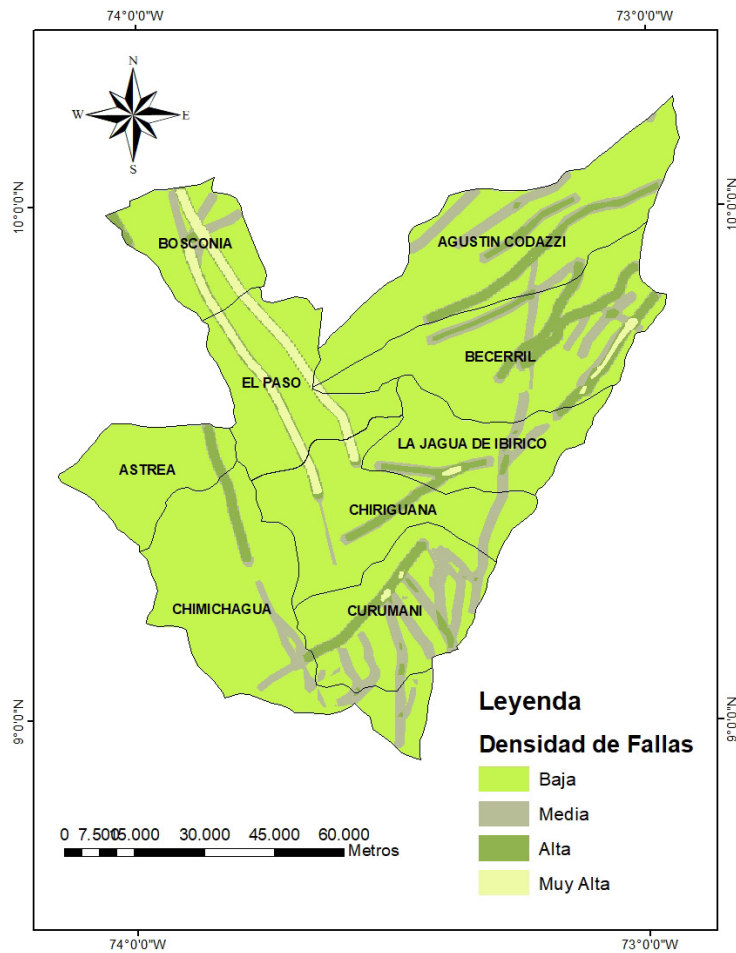


Figura 8. Mapa de densidad de fallas.

Fuente: elaboración propia.

3.7 Áreas potenciales de recarga

El área con mayor potencial de recarga de agua subterránea se asignó teniendo en cuenta el conjunto de variables que se consideraron fundamentales en distintos órdenes de importancia. Con este criterio, se establecieron cuatro clases e indicadores: muy alta, alta, media y baja, para cada uno de los factores en la evaluación de flujos regionales y superficiales. Dependiendo de la variable y su indicador y/o clase, se le asignó un porcentaje de influencia en la recarga de acuíferos: 20% para la densidad de drenaje, 30% para precipitación, 30% para permeabilidad del suelo, 10% para densidad de fallas y 10% para tipo de suelo.

Una vez se superpusieron las capas (Densidad de drenaje, Precipitación, Permeabilidad del suelo, Densidad de fallas y Tipo de suelo), se generó el mapa de zonas óptimas de recarga de acuíferos, clasificadas en tres clases: alta, media y baja. El *software* genera estas tres categorías porque identifica un umbral en los criterios iniciales, de manera que interpreta que no hay juicios para categorizar zonas de muy alta probabilidad de que se genere el proceso de recarga (figura 9).

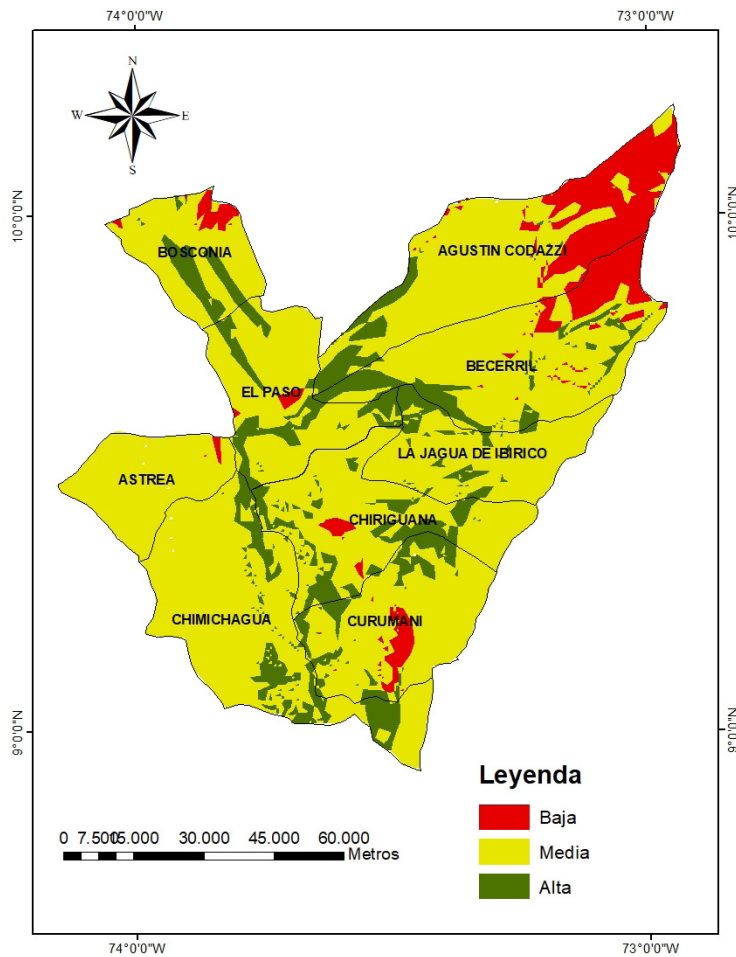


Figura 9. Mapa de zonas óptimas de recarga de acuíferos.

Fuente: elaboración propia.

Como resultado de este proceso se identificaron las principales zonas de recarga de acuíferos, la cual se presenta de forma distribuida por toda el área de estudio. En la parte norte (Bosconia, Becerril, El Paso y Agustín Codazzi) se encontró una alta probabilidad de recarga de agua subterránea, pues este sector tiene una alta presencia de precipitaciones, una permeabilidad alta y muy alta, además de que cuenta con propiedades de alta densidad de drenaje y fracturamiento. En la zona sur (Astrea, Chimichagua y Curumani), a pesar de que presenta una permeabilidad baja y un suelo franco arcilloso, tiene áreas que sí cumplen con las características para una recarga media, ya que la densidad de drenaje es baja y el fracturamiento es medio.

En el este de la zona de estudio (La Jagua de Ibirico y Chiriguana) se refleja la presencia de cobertura vegetal y estructuras montañosas, con fallas de densidad media, pero con poca densidad de drenaje y con una textura de suelo porfídico y franco arcilloso. Estas características hacen que la permeabilidad del suelo sea insuficiente y, por lo tanto, que tenga una infiltración media, de modo que en esta zona la recarga de acuíferos es baja.

4. Conclusiones

La diversidad de suelos de esta región del país hace que la recarga de acuíferos sea sectorizada, debido a la importancia que tiene la infiltración, la porosidad y la permeabilidad que los caracterizan. Recordemos que existen diferentes texturas de suelo en la zona de estudio (arcilloso, limoso, arenoso), sin contar con la presencia de suelos piroclásticos que dificultan el proceso de recarga.

Otro de los factores que desfavorecen la recarga natural de acuíferos en la zona media del departamento del Cesar es la alteración de los usos del suelo. Esto se debe a que la ganadería y la agricultura extensiva explotan el suelo destinado a la conservación de la capa vegetal, sin contar la deforestación que producen actividades extractivas como la minería. Con el paso del tiempo, este tipo de acciones deteriora el suelo y, a su vez, las propiedades naturales que este posee para la recarga de acuíferos. Este factor, junto con los demás expuestos en este artículo, hacen que la mayor parte de la zona de estudio presente una precarga media (figura 9).

Finalmente, el análisis de los factores estudiados permitió identificar las principales zonas de recarga y ubicar las de mayor tamaño y, en consecuencia, las de mayor relevancia en los municipios de Becerril, El Paso y Agustín Codazzi. De esta manera, el mapa que se obtuvo permitirá la toma adecuada de decisiones a corto, mediano y largo plazo con respecto al recurso hídrico. La información sobre la disponibilidad de agua de la región constituye un insumo valioso para orientar, planificar y gestionar la forma como se va a disponer del recurso, así como para realizar estudios más específicos en la zona.

Agradecimientos

Nuestra gratitud a los profesores Douglas Quintero y Jorge Muñoz, de la Universidad Central, por su colaboración y dirección. Agradecemos especialmente a todas las personas que colaboraron para la culminación exitosa de este proyecto.

Referencias

- Alarcón Africano, L., & Díaz Suescún, L. (2018). *Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada Niscota para un acueducto interveredal en Nunchía, Casanare* [Trabajo de especialización, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://bit.ly/3nEntIj>
- Anaya, J. E. (2018). El derecho humano al agua potable en Colombia: Decisiones del Estado y de los particulares. *Universitas*, 136, 1-10 <https://doi.org/10.11144/Javeriana.vj136.dhap>
- Budyko, M. I., & Zubenok, L. I. (1974). Methods of determining evaporation from the land surface. En Organización Meteorológica Mundial (Ed.), *Workshop of the water balance of Europe* (pp. 95-128). Unesco.
- Corporación Autónoma Regional del Cesar [Corpocesar]. (2006). *Aprovechamiento y protección del agua subterránea en las ecorregiones de los valles de los ríos Cesar y*

- Magdalena, Departamento del Cesar. Corpocesar; Ideam. <https://www.corpocesar.gov.co/files/Informe%20zona%20centro.pdf>
- Corporación Autónoma Regional del Cesar [Corpocesar]. (2019). *Plan de Gestión Ambiental Regional PGAR / PLANEAR 2019-2040*. Corpocesar. <https://www.corpocesar.gov.co/files/PGAR-2019-2040.pdf>
- 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. <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1089/1519>
- González, M. (2001). *El Terreno*. Ediciones UPC.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2018). *Reporte de avance del Estudio Nacional del agua 2018*. Minambiente; Ideam. http://www.andi.com.co/Uploads/Cartilla_ENA_%202018.pdf
- Kaur, L., Rishi, M. S., Singh, G., & Nath Thakur, S. (2020). Groundwater potential assessment of an alluvial aquifer in Yamuna sub-basin (Panipat region) using remote sensing and GIS techniques in conjunction with analytical hierarchy process (AHP) and catastrophe theory (CT). *Ecological Indicators*, 110, Article 105850. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105850>
- Loyola Gómez, C., Rivas Maldonado, J., & Gacitúa Rojas, M. J. (2015). Permeabilidad del suelo de la cuenca del río Chillán, entre Estero Peladillas y río Ñuble, Chile. *Cuadernos de Geografía*, 24(1), 73-86. <http://doi.org/10.15446/rcdg.v24n1.41679>
- Ocampo, O. (2012). *Análisis de vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UN. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9268>
- Prasad, R. K., Mondal, N. C., Banerjee, P., Nandakumar, M.V., & Singh, V.S. (2007). Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. *Environmental Geology*, 55, 467-475. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0992-3>
- Programa Mundial de la Unesco de Evaluación de los Recursos Hídricos. (2006). *El agua: Una responsabilidad compartida: 2° informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo*. Unesco. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000144409_spa
- Souissi, D., Haythem Msaddek, M., Zouhri, L., Chenini, I., El May, M., & Dlla, M. (2018). Mapping groundwater recharge potential zones in arid region using GIS and Landsat approaches, southeast Tunisia. *Hydrological Sciences Journal*, 63(2), 251-268. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1414383>
- Vich, A. I. J. (1996). *Aguas continentales: Formas y procesos*. Centro de Economía, Legislación y Administración del Agua y el Ambiente. <https://bit.ly/3yjAwnr>
- Zamudio Rodríguez, C. (2012). Gobernabilidad sobre el recurso hídrico en Colombia: Entre avances y retos. *Gestión y Ambiente*, 15(3), 99-112. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/36284/42930>