

Aplicación de GIS y AHP en la delimitación de zonas de recarga de acuíferos en áreas semiáridas en el departamento del Cesar

Application of GIS and AHP in the delimitation of aquifer recharge zones in semi-arid areas in the department of Cesar

Andrés Felipe Arias Pérez *

Cómo citar:

Arias Pérez, A. F. (2020). Aplicación de GIS y AHP en la delimitación de zonas de recarga de acuíferos en áreas semiáridas en el departamento del Cesar. *Ingeciencia*, 5, 24-42.

* Ingeniero ambiental, Universidad Central. Correo: aarias4@ucentral.edu.co

Resumen

El abastecimiento de agua en el centro del departamento del Cesar es cada vez más crítico porque el 60,69% proviene de aguas subterráneas. No obstante, la información hidrogeológica de la región está desactualizada (se remonta a 1995 y 2006), por lo cual es pertinente hacer nuevos estudios con sensores remotos para identificar zonas de recarga directa. Con este objetivo, se combinaron distintas capas temáticas: geología, isoyetas NDMI, MNDWI, DEM y NDVI, junto con técnicas de análisis de procesos jerárquicos (AHP), para evaluar el potencial de recarga directa de los acuíferos en la zona. De acuerdo con el mapa resultante, el 49,1% del área corresponde a zonas de nulo, muy bajo y bajo potencial de recarga directa. Asimismo, existe una zona catalogada como aceptable, que representa el 44,85% total del área y que en temporada de excesos configura escenarios de recarga directa. Finalmente, solo el 3,55% del área es una zona de alto potencial de recarga directa.

Palabras clave: AHP, hidrología, humedad del suelo, Landsat, sensores remotos.

Abstract

The water supply in the center of the department of Cesar is more critical year by year because 60.69% comes from groundwater. However, the hydrogeological information of the region is outdated, dating back to 1995 and 2006, which is why it is relevant to make new studies with remote sensors to identify direct recharge zones in the center of the department. With this objective, different thematic layers were combined: geology, NDMI isoyetas, MNDWI, DEM and NDVI, together with techniques of hierarchical process analysis (AHP), to evaluate the direct recharge potential of aquifers in the area. According to the resulting map, 49.1% of the area corresponds to zones of null, very low and low direct recharge potential. It is also identified that there is an area classified as acceptable, which represents 44.85% of the total area and, which in excess season sets up direct recharge scenarios. Finally, only 3.55% is an area of high direct recharge potential.

Keywords: AHP, hydrogeology, Landsat, remote sensing, soil moisture.

1. Introducción

El territorio de análisis comprende los municipios de Bosconia, El Paso, Astrea, Chiriguana, Chimichagua, Curumaní y La Jagua de Ibirico. Según el censo hecho por el Departamento Nacional de Estadística (DANE) en el 2018, la población de estos municipios es de 176 444 habitantes, de los cuales el 60,69% depende de la captación de agua subterránea. El total de reservas calculadas es de 218 346 000 m³ y su explotación está por el orden de 39 331 050 m³ anuales utilizados para uso público, doméstico y uso industrial ganadero (Corpocesar & Ingeominas, 1995).

El estudio de aguas subterráneas por medio de imágenes satelitales se ha constituido en una herramienta práctica y rápida de análisis de los territorios. Sus inicios datan de hace más de treinta años y, desde entonces, ha sido tomado como referencia en distintos campos. La mayor referencia se encuentra en Asia, seguido de África.

Estudiando la potencialidad de recarga en el noroeste de Bangladesh, Adham *et al.* (2010) realizaron una investigación usando sistemas de información geográfica (SIG) y técnicas de teledetección tomando imágenes Landsat 7 y SPOT. Con base en sus análisis concluyeron que solo el 15% de la zona de estudio tiene potencial de recarga moderada, y únicamente el 8,6% del agua precipitada total se infiltra y recarga acuíferos locales.

Por su parte, Elbeih (2015) elaboró un mapeo hidrológico del recurso de agua subterránea en el desierto occidental Oasis y en la Península del Sinaí, Egipto. En esta investigación, las imágenes satelitales de ASTER y ALOS fueron cruzadas con mapas topográficos y mapas base, para crear mapas temáticos por medio de SIG, con los cuales se obtuvo un mapa hidrogeológico de la zona.

En la cuenca de Kharga, Egipto, Parks *et al.* (2017) realizaron un análisis con múltiples imágenes satelitales (MODIS, OLI, RADARSAT, SRTM) y datos auxiliares para identificar sitios potencialmente accesibles de aguas subterráneas. Con la litología y la densidad de drenajes, los autores obtuvieron cuatro mapas: densidad de fractura, inercia térmica, conductividad hidráulica de formaciones y espesor de los acuíferos. El análisis de los mapas evidenció que la zona estudiada es adecuada para la extracción de aguas subterráneas, pero su capacidad se reducirá significativamente en los próximos cincuenta años.

Posteriormente, Fallatah *et al.* evaluaron la recarga de los acuíferos utilizando un sistema integrado geofísico, geoquímico y de teledetección. Con este propósito utilizaron un modelo continuo de lluvias Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) y un modelo de escorrentías Soil and Water Assessment Tool (SWAT). El resultado arrojó que los acuíferos más profundos están más agotados que los más superficiales, además de que la tasa anual de recarga es aproximadamente 5,21 km³ según el modelo GRACE.

En el mismo año, Senthilkumar *et al.* (2019) identificaron zonas de recarga de aguas subterráneas utilizando técnicas de teledetección y SIG en el sistema acuífero Amaravathi, India. Consideraron ocho distintas capas temáticas: geología, geomorfología, pendiente, tipo de suelo, uso de suelo, nivel del agua, la profundidad de meteorización y drenaje, que integraron junto a imágenes satelitales ASTER. Sus resultados mostraron que alrededor del 45% de la zona de estudio son catalogadas como altas y muy altas estructuras de recarga, y el 40% de la zona se cataloga como moderada.

En el estudio realizado por Bhagyaraj *et al* (2019) se recolectaron imágenes satelitales de SRTM y Landsat, con capas temáticas como: geología, pendiente, geomorfología, uso del suelo, densidad de drenaje y densidad lineal. Se aplicó el método de distancia ponderada para integrar todas las capas y, finalmente, se clasificó como muy bueno (6,5%), bueno (22,1%), moderado (51,2%), bajo (18,4%) y muy bajo (1,8%) según el potencial de recarga.

Los procesos analíticos de jerarquía (AHP, *analytic hierarchy process*) son utilizados especialmente en la toma de decisiones para evitar la intuición (Borja *et al.*, 2019). El AHP es un método lógico y estructurado de trabajo que optimiza la toma de decisiones complejas cuando existen múltiples criterios o atributos, mediante la descomposición del problema en una estructura jerárquica, de tal manera que se puede identificar la influencia de los atributos individuales que son objeto de decisión (Hurtado & Bruno, 2005). En el estudio realizado por Arulbalaji *et al.* (2019) se presentó una combinación del SIG y AHP para delimitar las zonas potenciales de agua utilizando imágenes SRTM (30 m), y se aplicó el proceso AHP para identificar la superposición ideal de los campos: geología, pendiente, geomorfología, uso del suelo y densidad de drenaje. El trabajo evidenció que el método es útil para reducir las decisiones complejas a una serie de comparaciones necesarias para el desarrollo de la investigación.

En América Latina se encuentran pocos estudios al respecto. Villanueva *et al.* (2019) exploraron la disponibilidad del agua subterránea de Campo Mina, Nuevo León (México), utilizando imágenes SPOT y SIG. Por medio de un DEM y capas temáticas: topografía, geología, hidromorfología, geología estructural, disección del relieve, pendiente e hidrogeología del lugar, los investigadores crearon un modelo tridimensional de potencial de agua subterránea, compuesto por cinco unidades geomorfológicas que actúan como acuíferos no confinados y una zona de recarga artificial aún no explotada, que se clasifica con un mediano potencial.

En Colombia se registran pocos estudios hidrogeológicos utilizando sensores remotos. Para encontrar información hidrogeológica de la región de estudio, es necesario consultar la *Evaluación de aguas subterráneas en el departamento de Cesar* (Corpocesar & Ideam, 2006). Dada la poca información disponible, en este artículo se presenta un estudio para identificar zonas de recarga de acuíferos por medio de sensores remotos, que determinan variaciones de humedad en el suelo y así poder compararlas con la información geológica, hidrológica e hidrogeológica de la región. Con este objetivo, en este estudio las capas temáticas tienen un orden de importancia que fue analizado con la metodología AHP y posteriormente comparado mediante SIG. De esta manera se logró abordar el componente hidrogeológico de la región para determinar las zonas potenciales de recarga directa, en un posible marco de actuación.

2. Materiales y métodos

2.1 Delimitación de la zona de estudio

El área de estudio comprende los municipios de Bosconia, El Paso, Astrea, Chiriguaná, Chimichagua, Curumaní y La Jagua de Ibirico, que se encuentran ubicados en la zona centro del departamento del Cesar, de los cuales el 60,69% de sus habitantes depende de la captación de agua subterránea (figura 1). Los ecosistemas presentes en el área de estudio son: valle del río Cesar, serranía del Perijá y parte del complejo cenagoso de Zapatosa (Corpocesar & Ideam, 2011).



Figura 1. Mapa de la zona de estudio.
Fuente: elaboración propia.

2.2 Metodología

La investigación tuvo dos fases para cumplir con los objetivos planteados (figura 2). En la *fase 1* se estudió el papel que tiene la humedad en la recarga directa de acuíferos y se relacionó con el marco geológico, hidrogeológico e hidrológico de la región de estudio. En la *fase 2* se reunieron las capas de información para realizar el proceso AHP elaborado por un experto. Finalmente, se hizo la normalización de las capas de información clasificándolas en seis clases según su incidencia en la recarga directa de acuíferos.

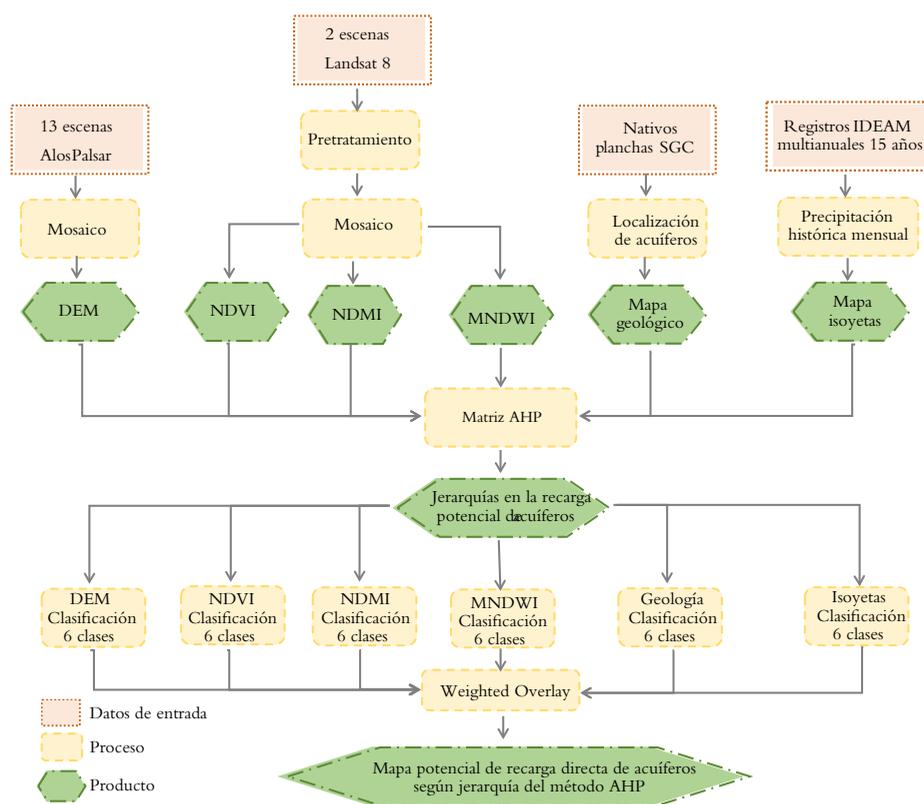


Figura 2. Descripción de las fases de la investigación. Fuente: elaboración propia.

2.2.1 Fase 1

2.2.1.1 Relación humedad y teledetección

La teledetección ha sido utilizada en la investigación de aguas subterráneas desde hace treinta años, tiempo en el cual ha demostrado que es posible estimar la humedad superficial en el suelo. La técnica más usada es la teledetección por microondas, que se emplea con el fin de cartografiar el dominio de la humedad superficial en el espacio, que no es posible por otros medios (Jackson, 2002).

Con este método también se puede estudiar la humedad del subsuelo. Ahuja *et al.* (1993) describen una medida de referencia según la cual la humedad contenida en los primeros cinco centímetros de suelo puede ser escalada o nos brinda tanta información como un perfil de 0-30 centímetros. Luego de examinar la correlación entre la superficie y la humedad, los investigadores encontraron que la correlación disminuye a medida que se hace más profundo el perfil, sin embargo, aclaran que esto no significa que la humedad desaparezca.

Ahora bien, los mejores resultados tienen relación directa con la vegetación. Jackson (2002) ha demostrado que en suelos desnudos la humedad a veces es inexistente o no tiende a ser homogénea con la profundidad, en comparación con terrenos con índices de vegetación significativos.

2.2.1.2 Hidrogeología y geología general

La importancia de la clasificación hidrogeológica de las formaciones identificadas (tabla 1) radica en si presenta características como porosidad, conductividad hidráulica, extensión, espesor y composición granulométrica. La información de estas características se relaciona con circunstancias externas como: la explotación, la recarga y su relación con otros cuerpos de agua subterráneos o superficiales para obtener distintos potenciales, que se clasifican en grande, intermedia, pequeña, muy pequeña o sin importancia.

Tabla 1. Litoestratigrafía de las formaciones acuíferas de importancia

Unidad geológica	Nombre	Edad	Descripción
QCAL	Depósitos de abanicos aluviales y terrazas	Pleistoceno	Gravas subangulares a angulares en matriz lodosa y arenas
QT	Terrazas	Pleistoceno	Bloques, cantos, gravas y arenas en matriz arcillo-limosa
QLLA	Depósitos de llanura aluvial	Pleistoceno	Arenas de grano fino, limos, arcillas
N2C	Formación Cuesta	Plioceno	Conglomerados y areniscas ferruginosas
N2Q1Z SA	Formación zambrano-sedimentitas de Arjona	Pleistoceno	Conjunto arcilloso de carácter caolinitico y textura vértica y capas aisladas de areniscas calcáreas fosilíferas
E1B	Formación Barco	Paleoceno	Areniscas amarillentas de grano fino.
E1C	Formación Los Cuervos	Paleoceno	Alternancia de arcillolitas y areniscas de grano fino con mantos de carbón
K2L	Formación Luna	Cretácico superior	Lutitas negras carbonosas, limolitas y arcillolitas carbonosas y calizas negras bituminosas
K1R	Formación Río Negro	Cretácico	Cuarzoarenitas de grano grueso, areniscas conglomeráticas y conglomerados, poco cementadas
K1C	Grupo Cogollo	Cretácico	Calizas intercalaciones de lutitas carbonosas

Fuente: elaboración propia.

En la zona de estudio se distinguen dos grupos de acuíferos de acuerdo con su porosidad: 1) grupos de sedimentos de roca porosa de importancia relativa grande a muy pequeña: presentan porosidad primaria y buen potencial como acuíferos. 2) Grupos de roca fracturada y porosa de importancia relativa grande a pequeña: presentan porosidad secundaria producto de la fractura de rocas. La ubicación de estas formaciones se puede observar en la figura 3 y se clasifican en la tabla 2.

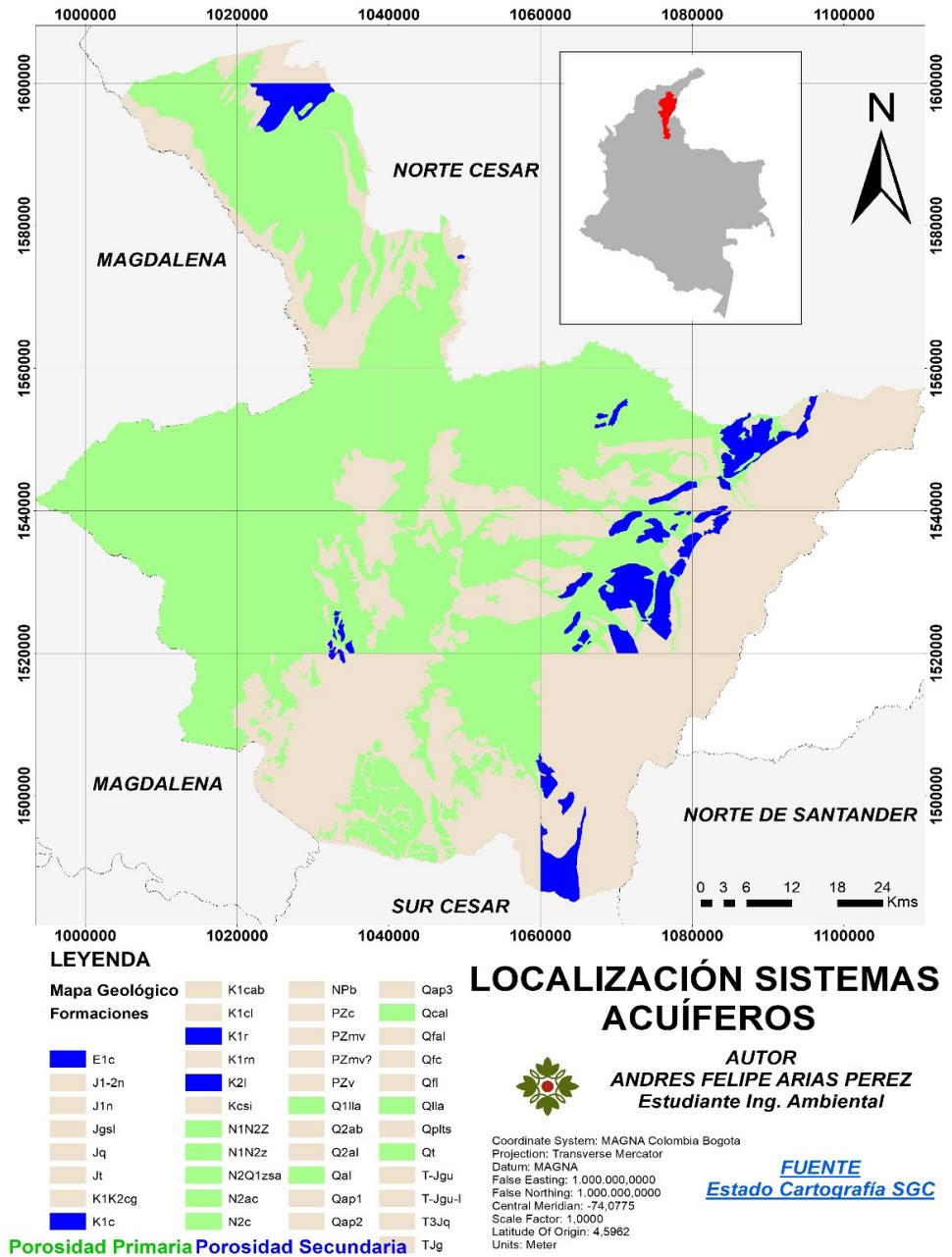


Figura 3. Ubicación de los sistemas acuíferos según su porosidad.
 Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Tipo de porosidad de las formaciones de importancia acuífera

Formaciones según el tipo de porosidad	
Primaria	Secundaria
Llanura aluvial (QLLA)	Formación Luna (K2L)
Abanicos aluviales (QCAL)	Formación Cogollo (K1C)
Terraza (QT)	Formación Río Negro (K1R)
Formación Arjona (N2Q1Z)	Formación Los Cuervos (E1C)
Formación Cuesta (N1C)	
Formación Barco (E1B)	

Fuente: adaptado de Corpocesar & Ideam 2006.

2.2.1.3 Balance hídrico

El balance hídrico es la relación existente entre las pérdidas y los ingresos de agua en el suelo. Las pérdidas en el balance se asocian con la disminución de humedad del suelo directa junto con la transpiración de la vegetación. Siendo la humedad un factor determinante en la recarga directa de los acuíferos, es necesario conocer los valores de evapotranspiración real (ETR) por medio del balance hídrico. Al respecto, autores como Bouwer (1989) concuerdan en que la información de la ET en regiones áridas y semiáridas es un componente significativo para el equilibrio hídrico de la región.

Mediante el balance hídrico se estableció que las zonas de recarga potencial se relacionan con las zonas de excedente con más almacenamiento, que se presenta en los meses de abril a mayo y agosto a noviembre; los meses en los cuales la recarga disminuye en las zonas de uso de reserva y déficit son diciembre a abril y junio a julio (figuras 4 y 5).

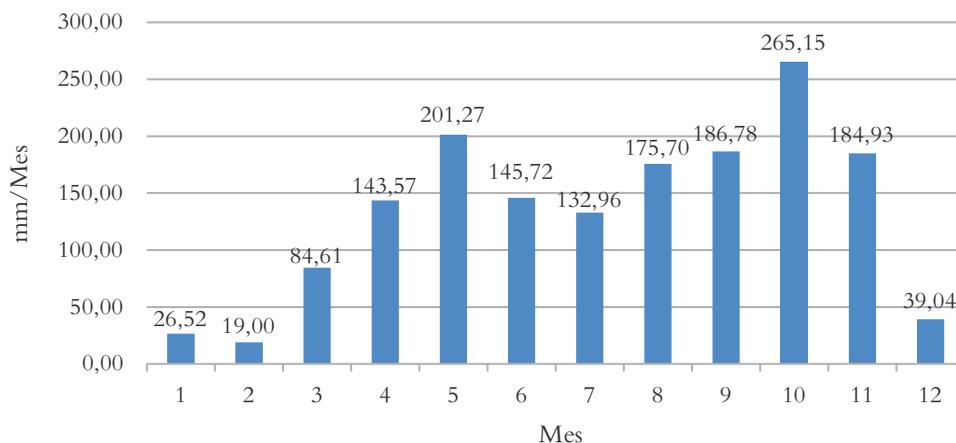


Figura 4. Precipitación mensual multianual en la zona de estudio.

Fuente: elaboración propia a partir de registros multianuales de precipitación del Ideam.

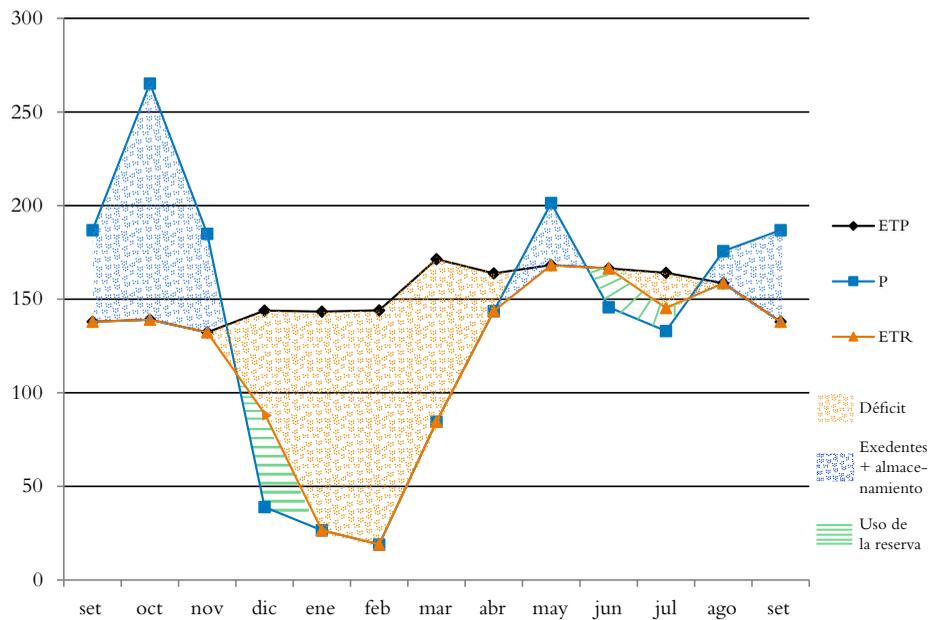


Figura 5. Estados del balance hídrico en la zona de estudio.

Fuente: elaboración propia a partir de registros multianuales de precipitación del Ideam.

2.2.2 Fase 2

2.2.2.1 Información de capas ráster y vectoriales

La información específica de los metadatos ráster y vectoriales utilizados para calcular los índices fue la siguiente:

- *Área de estudio:* shape división política de Colombia, descargado del Geoportal del DANE; año de actualización: 2020; sistema de coordenadas trabajado: 3116.
- *Precipitación:* precipitación multianual 2005 a 2020, estaciones pluviométricas CAR: La Primavera, Curumaní, Chimichagua, Poponte, Rincón Hondo, El Canal, La Jagua, Astrea, El Yucal, La Loma, El Paso, El Molino y Hacienda Mature.
- *Geología:* planchas 33, 40, 41, 42, 46, 47, 48, 55 y 56 del SGC; años: 2002 a 2015; sistema de coordenadas trabajado: 3116.
- *DEM:* escena 2011, descargada del portal ASF Data Search; sistema de coordenadas trabajado: 3116.
- *NDVI, NDMI y MNDWI:* escena Landsat 8, nivel 1, correspondiente al 6 de marzo de 2020, descargada del USGS EROS CENTER; SISTEMA de coordenadas trabajado: 3116.

2.2.2.2 Normalización de los rangos en los índices elaborados

El índice MNDWI surge por la necesidad de identificar cuerpos de agua, que se pueden distinguir si la información reporta un valor superior a 0. Sin embargo, existe un intervalo entre $-0,4$ y 0 en el que existe un contenido de humedad que se puede tener en cuenta como humedad en el terreo o una llamada *zona anegada*. Por lo tanto, si estas zonas están

situadas sobre un sistema acuífero, serán comprendidas como zonas de recarga directa. La incidencia más alta en la recarga de acuíferos se encuentra en los intervalos de $-0,02$ a 1 .

Tabla 3. Normalización de rangos índice MNDWI

Posición	Rango SIG	Denominación	Incidencia en la recarga
1	$-1 - -0,8$	Zona muy seca	Baja
2	$-0,8 - -0,5$	Zona seca	Baja
3	$-0,5 - -0,4$	Zona de déficit	Media
4	$-0,4 - -0,2$	Zonas de acumulación	Media
5	$-0,2 - -0,01$	Zonas anegadas	Alta
6	$-0,01 - 1$	Cuerpos de agua	Alta

Fuente: elaboración propia.

El índice NDMI se encuentra ligado a la evapotranspiración real (ETR), que es la pérdida de humedad en el terreno que es afectada por el clima de la región, el número de horas de luz y la precipitación. Estos factores determinan períodos en los que la recarga de acuíferos puede ser o no potencial. La incidencia más alta en la recarga de acuíferos se encuentra en los intervalos de $-0,2$ a $0,4$ (tabla 4).

Tabla 4. Normalización de rangos índice NDMI

Posición	Rango SIG	Denominación	Incidencia en la recarga
1	$-0,8 - -0,5$	Nula	Baja
2	$-0,5 - -0,4$	Muy baja	Baja
3	$-0,4 - -0,3$	Baja	Baja
4	$-0,3 - -0,2$	Aceptable	Media
5	$-0,2 - 0,01$	Alta	Alta
6	$0,1 - 0,4$	Cuerpo de agua	Alta

Fuente: elaboración propia.

El índice NDVI permite saber el estado de la vegetación. Se ha demostrado que en suelos desnudos la humedad es efímera en comparación con terrenos con índices de vegetación más saludables. La incidencia más alta en la recarga de acuíferos se encuentra en los intervalos de $0,3$ a 1 en este índice (tabla 5).

Tabla 5. Normalización de rangos índice NDVI

Posición	Rango SIG	Denominación	Incidencia en la recarga
1	$1 - 0,7$	Muy saludable	Alta
2	$0,7 - 0,5$	Saludable	Alta
3	$0,5 - 0,3$	Moderado	Alta
4	$0,3 - 0,2$	Estrés hídrico moderado	Baja
5	$0,2 - 0$	Estrés hídrico elevado	Baja
6	$0 - -1$	Cuerpos de agua	Baja

Fuente: elaboración propia.

La pendiente, representada por el modelo digital de elevación DEM, es importante porque la precipitación en zonas de pendientes tiende a convertirse en escorrentía superficial, a diferencia de terrenos llanos, en los cuales la precipitación puede infiltrarse directamente. Es la razón por la cual en zonas de pendientes la humedad es más baja que en las zonas llanas. La incidencia más alta en la recarga de acuíferos se encuentra en los terrenos de planicie (0° de inclinación) y piedemonte (inclinación de 7° a 11°) (tabla 6).

Tabla 6. Normalización de rangos DEM

Posición	Rango SIG	Denominación	Incidencia en la recarga
1	0°	Planicie	Alta
2	$7^\circ - 11^\circ$	Piedemonte	Media
3	$11^\circ - 19^\circ$	Inclinado	Baja
4	$19^\circ - 30^\circ$	Moderadamente Inclinado	Baja
5	$30^\circ - 40^\circ$	Fuertemente Inclinado	Baja
6	Más de 40°	Escarpado	Baja

Fuente: elaboración propia.

La precipitación no solo ayuda a la recarga de cuerpos superficiales, sino también a la recarga de aguas subterráneas cuando esta se infiltra; su velocidad depende de la granulometría del terreno. La incidencia más alta en la recarga de acuíferos se encuentra en los intervalos de 1000 mm a 3000 mm de precipitación (tabla 7).

Tabla 7. Normalización de rangos isoyetas

Posición	Rango SIG	Denominación	Incidencia en la recarga
1	0 - 500 mm	Árido	Baja
2	500 - 1000 mm	Muy seco	Baja
3	1000 - 2000 mm	Seco	Media
4	1000 - 2000 mm	Seco	Media
5	1000 - 2000 mm	Seco	Media
6	2000 - 3000 mm	Húmedo	Alta

Fuente: elaboración propia.

2.2.2.3 Determinación de la jerarquía mediante la metodología AHP

El método AHP fue presentado por Thomas Saaty en 1980 y se ha usado ampliamente en los estudios relacionados con aguas subterráneas (Arulbalaji *et al.*, 2019). La asociación de los factores considerados se pondera según su importancia en la recarga, ocurrencia y una supervisión de un experto (tabla 8).

Tabla 8. Cálculo de la jerarquía de las capas de información por el método AHP

Atributos		IP	NV	GE	DM	NM	MW	Peso	Puesto
Isoyetas	IP	1	-1/3	-1/7	-1/5	1	1	7,01	5
NDVI	NV	3	1	-1/3	3	-1/3	-1/3	8,93	3
GEOLÓGIA	GE	7	3	1	9	3	3	35,14	1
DEM	DM	5	-1/3	-1/9	1	-1/5	-1/5	7,13	4
NDMI	NM	1	3	3	5	1	1	20,90	2
MNDWI	MW	1	3	3	5	1	1	20,90	2

Fuente: elaboración propia.

3. Resultados y discusión

3.1 Relaciones fundamentales en la recarga directa de los acuíferos

3.1.1 Geología-MNDWI

Se identifican cuatro zonas, que configuran acuíferos de acuerdo con sus características granulométricas (Corpocesar & Ideam, 2011): 1) F la Cuesta, 2) F los Cuervos, 3) Qlla-llanura aluvial y 4) F Luna y Qlla (figura 6). Dado que esta información concuerda con los lugares que presentan altos índice en el mapa MNDWI, se puede afirmar que la recarga de estos acuíferos se hace de manera directa a través de zonas anegadas. Teniendo en cuenta la época del año en que se hace el análisis de este índice, tiene mucha más relevancia, dado que el mes de marzo pertenece a la temporada seca en los municipios de estudio, con tan solo 84,6 mm en el recuento histórico de la precipitación.

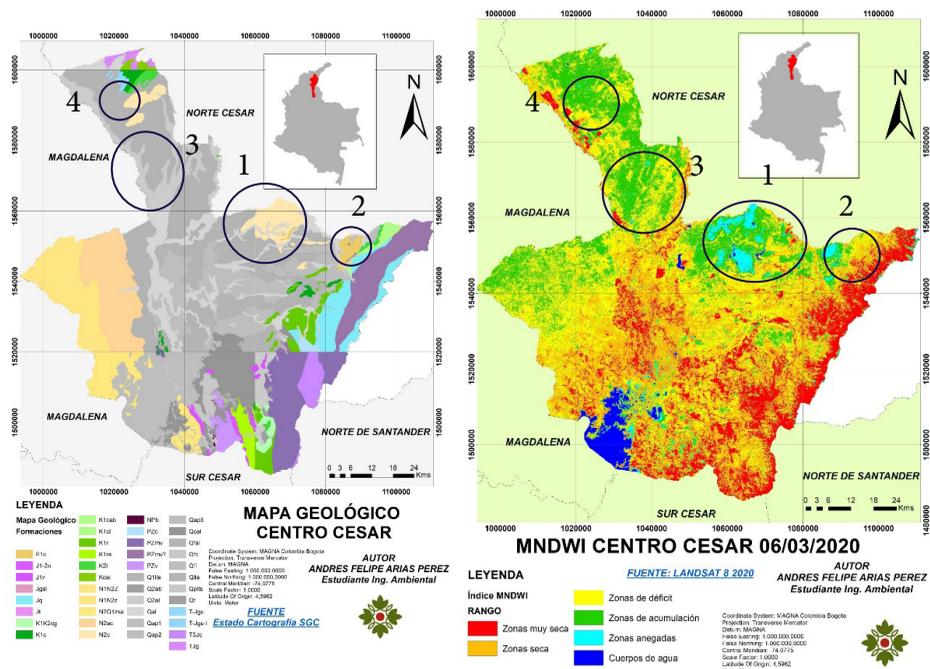


Figura 6. Comparación MNDWI-Geología.
Fuente: elaboración propia en ARCGIS.

3.1.2 Geología-NDMI

Los puntos de mayor humedad en la zona de estudio concuerdan con los acuíferos identificados en el trabajo de Corpocesar y el Ideam en el 2006. La numeración en el mapa de humedad se asocia con un sistema acuífero de la siguiente forma: 1) N2c F. Cuesta, E1c F. Cuervo y Q1a Depósitos de llanura aluvial. 2) Q1a Depósito de llanura aluvial; E1c F. Los Cuervos, Qt Terrazas aluviales y K2l F. La Luna. 3) Q1a Depósitos de llanura aluvial. 4) N2c F. Cuesta, Q1a Depósitos de llanura aluvial y K1c Grupo Cogollo. 5) N2Q1z F. Arjona. (6) Q1a Depósito de llanura aluvial y K1r F. Río Negro (figura 7). Existe una fuerte relación de la humedad con la granulometría de la zona de estudio, aunque los valores más altos de humedad rondaron los 0,5 en la escala de -1 a 1. Estos valores se presentan en un mes considerado como seco, pero en épocas lluviosas estos valores escalan hasta 0,85, ocasiones en las que existe una recarga potencial.

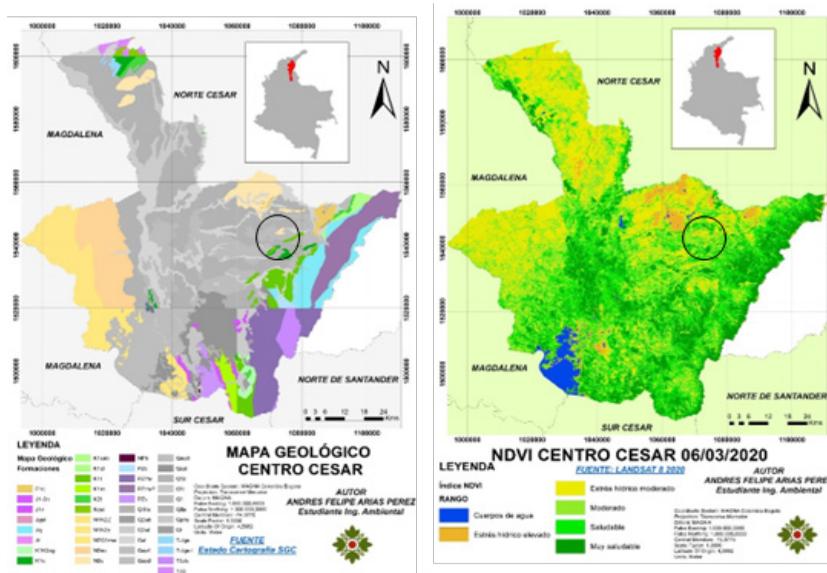


Figura 8. Comparación Geología-NDVI.
Fuente: elaboración propia en ARCGIS.

3.2 Superposición de mapas según pesos calculados

Mediante la herramienta Weighted Overlay se superpusieron los datos ráster y vectoriales utilizando la escala de medición en común, que son las clases según su potencial de recarga directa: cuerpos de agua alta, aceptable, baja, muy baja y nula. Los pesos que se introdujeron en la herramienta fueron los calculados en el método AHP. El resultado de esta herramienta arroja el mapa de potencial de recarga directa de la zona de estudio (figura 9).

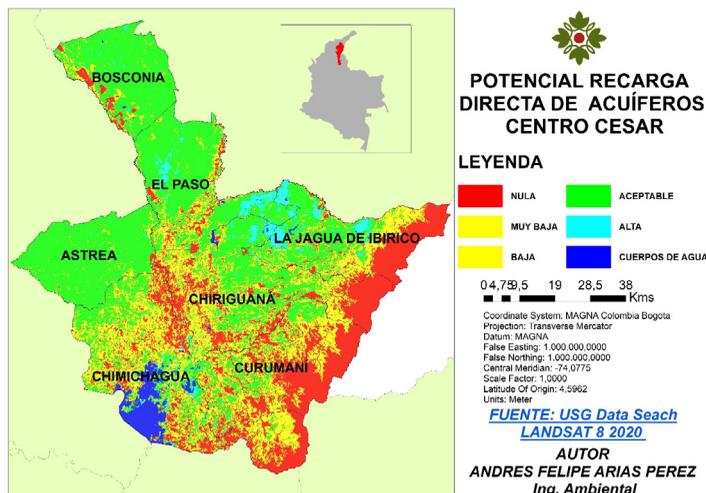


Figura 9. Zonas con mayor potencial de recarga directa.
Fuente: elaboración propia en ARCGIS.

El resultado es un mapa clasificado por clases según su potencial de recarga directa. Los cuerpos de agua están representados por las zonas en donde la humedad es muy alta sin importar la época del año, que no se pueden considerar como zonas de recarga directa de acuíferos, pues su tipo de recarga se considera desde fuentes superficiales (Escobar *et al.*, 2017). El área de los cuerpos de agua en la zona de estudio es de 161 km², que corresponde al 2,5% del territorio; el cuerpo de agua ubicado al SO es la ciénega de Zapatosa.

La zona con mayor importancia en esta categoría es la que se considera alta, en la cual realmente se evidencia que la geología, la humedad, la pendiente, la vegetación y la precipitación favorecen la recarga directa. El área total de esta categoría es de 220 km², que comprende el 3,55% de la zona de estudio. Es importante mencionar que en estas zonas ya se han reconocido sistemas acuíferos como F. Cuesta, F. Cuervos, Llanuras y terrazas aluviales, que se encuentran en los municipios de Bosconia, El Paso, Astrea y La Jagua de Ibirico.

La zona considerada como aceptable es una categoría que en la fecha del análisis no presentó valores altos, pero que en temporada de lluvia también evidencia recarga directa, específicamente en los meses de agosto a noviembre, en donde la capacidad de campo y la evapotranspiración permiten que el agua se pueda infiltrar y recargar sistemas acuíferos como: F. Río Negro, F. Cogollo, F. Arjona y Llanura aluvial. El área de la zona considerada aceptable corresponde a 2768 km², que representa el 44,85% del área de estudio.

Las zonas consideradas baja, muy baja y nula son parte de una categoría en la geología que no es favorable para la infiltración, no acumula humedad, son zonas de pendientes pronunciadas y la mayoría de la precipitación se convierte en escorrentía, mas no en infiltración; esta zona no presenta ningún interés para la recarga directa de los sistemas acuíferos. El área de esta categoría corresponde a 3046 km², que representa el 49,1% de la zona de estudio.

4. Conclusiones

La técnica decisión multicriterio (AHP) permite configurar una superposición idónea de capas temáticas trabajadas con SIG para determinar las zonas de recarga directa de los acuíferos. De acuerdo con estos análisis, los municipios que agrupan mayor potencial de recarga son: Bosconia, El Paso, Astrea y La Jagua de Ibirico, mientras que las zonas con potenciales más bajos se agrupan principalmente en: Chiriguaná, Chimichagua y Curumaní.

El balance hídrico realizado para identificar las zonas con mayor potencial de recarga directa de acuíferos arroja que los meses de agosto a noviembre son favorables para este tipo de recarga, pues estas zonas se encuentran en un período de almacenamiento y excedentes que se transforman en recarga directa de los acuíferos libres que se encuentran cerca de superficie. Las zonas categorizadas con un alto potencial de recarga reportaron niveles de humedad significativos, teniendo en cuenta que se hizo el estudio en temporada seca. Estas zonas corresponden al 3,55% del área analizada, mientras que las zonas clasificadas como aceptables son muy afectadas por el estrés hídrico de la temporada. Sin embargo, en los meses de almacenamiento y excedentes, se convierten en zonas con un potencial alto de recarga directa; estas zonas corresponden al 44,85% de la zona de estudio.

Agradecimientos

Mi profundo agradecimiento a la Universidad Central, a todos los profesores que me ayudaron en la construcción de conocimiento, en especial a mi director, Douglas Quintero, y mi codirector, Jhon Jairo Castañeda, por guiarme en este gran proceso de investigación.

Referencias

- Adham, M. I., Jahan, C. S., Mazumder, Q. H., Hossain, M. M. A., & Haque, A. M. (2010). Study on groundwater recharge potentiality of Barind Tract, Rajshahi District, Bangladesh using GIS and Remote Sensing technique. *Journal of the Geological Society of India*, 75, 432-438. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12594-010-0039-3>
- Ahuja, L. R., Wendroth, O., & Nielsen, D. R. (1993). Relationship between initial drainage of surface soil and average profile saturated conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 19-25. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700010005x>.
- Arulbalaji, P., Padmalal, D., & Sreelash, K. (2019). GIS and AHP techniques-based delineation of groundwater potential zones: A case study from Southern Western Ghats, India. *Scientific Reports*, 9, Article 2082. <https://www.nature.com/articles/s41598-019-38567-x>
- Arya, L. M., Richter, J. C., & Paris, J. F. (1993). Estimating profile water storage from surface zone soil moisture measurements under bare field conditions. *Water Resources Research*, 19, 403-412. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR019i002p00403>
- Bagyaraj, M., Tenaw Mengistie, A., Gnanachandrasamy, G., & Gemechu, B. (2019). Data of remote sensing and GIS - to demarcate the potential sector of groundwater in Debre Berhan, Amhara region, Ethiopia. *Data in Brief*, 26, Article 104542. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104542>
- Borja Pimienta, L., Beltrão Santos, N. E., Da Silva Gemaque, A. M., & Tavares, P. A. (2019). Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: Temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. *Interações*, 20(2), 407-420. <https://doi.org/10.20435/inter.v20i2.1856>
- Bouwer, H. (1989). Estimating and enhancing groundwater recharge. En M. L. Sharma (Ed.), *Groundwater recharge* (pp. 1-10). CRC Press.
- Corpocesar, & Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2006). *Aprovechamiento y protección integral del agua subterránea en las cuencas de los valles de los ríos Cesar y Magdalena, Departamento del Cesar* [Archivos Corpocesar, n.º 40]. <https://www.corpocesar.gov.co/subterranas.html>
- Corpocesar, & Instituto Nacional de investigaciones Geológico Mineras [Ingeominas]. (1995). *Evaluación de aguas subterráneas en el departamento del Cesar* [Informe final]. <https://www.corpocesar.gov.co/evaluacion-aguas-subterranas.html>

- Elbeih, S. F. (2015). An overview of integrated remote sensing and GIS for groundwater mapping in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.08.008>
- Escobar, J., Betancur, T., García, E., Martínez, C., & Palacio, P. (2017). Análisis jerárquico ponderado aplicado a la identificación de recarga y flujos regionales en acuíferos. *Revista Politécnica*, 13(24), 37-48. <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1089>
- Fallatah, O. A., Ahmed, M., Cardace, D., Boving, T., & Akanda, A. S. (2019). Assessment of modern recharge to arid region aquifers using an integrated geophysical, geochemical, and remote sensing approach. *Journal of Hydrology*, 569, 600-611. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.061>
- Hurtado, T., & Bruno, G. (2005). El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores [Monografía, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio UNMSM. <https://bit.ly/3yAXpnI>
- Jackson, T. J. (2002). Remote sensing of soil moisture: Implications for groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 40-51. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-001-0168-2>
- Parks, S., Byrnes, J., Abdelsalam, M. G., Laó Dávila, D. A., Atekwana, E. A., & Atya, M. A. (2017). Assessing groundwater accessibility in the Kharga Basin, Egypt: A remote sensing approach. *Journal of African Earth Sciences*, 136, 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.11.002>
- Senthilkumar, M., Gnanasundar, D., & Arumugam, R. (2019). Identifying groundwater recharge zones using remote sensing & GIS techniques in Amaravathi aquifer system, Tamil Nadu, South India. *Sustainable Environment Research*, 29, Article 15. <https://doi.org/10.1186/s42834-019-0014-7>
- Villanueva, H., Tovar-Cabañas, R., & Vargas-Castilleja, R. (2019). Classification of aquifers in the Mina field, Nuevo Leon, using geographic information systems. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(3), 96-121. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-03-05>