



Imagen tomada de Pixabay.com

Capítulo 4

Determinación de la vulnerabilidad a la contaminación de aguas subterráneas del sistema acuífero de La Mojana

Determination of the Vulnerability to Groundwater Pollution of La Mojana Aquifer System

Rosso-Pinto, M. J.¹; Herrera-Arango, J.¹; Florez-Castaño, J. D.¹; Pérez-Peñate, A. K.¹; Mendoza-Atencio, M. A.¹; Acuña-Ayazo, B.¹; Ospino-Contreras, J. C.¹; Marrugo-Negrete, J. L.¹, Paternina-Urbe, R.¹.

¹ Grupo de Investigación en Agua, Química Aplicada y Ambiental, Departamento de Química, Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad de Córdoba, Sede Montería, Córdoba, Colombia.

* Autor de correspondencia: mauriciorossop@correo.unicordoba.edu.co

Resumen

La contaminación de las aguas subterráneas es una preocupación importante para los administradores de recursos hídricos en todo el mundo. Se evaluará el potencial de contaminación del agua subterránea a través del método DRASTIC+N, que anexa la variable neotectónica a la ecuación del modelo original, produciendo un mapa de vulnerabilidad del SALM a través de los SIG. La modificación señala áreas con actividad tectónica, destacando el riesgo de posibles fracturas en el acuífero y su respuesta a movimientos tectónicos que puedan dejar vulnerable al acuífero. Se espera obtener un mapa de vulnerabilidad más preciso. Debido a la nueva variable se recalcularon los rangos de clasificación de la vulnerabilidad, utilizando las relaciones entre los rangos originales y se estableció un aumento del 11,5 % de estos valores. Los resultados obtenidos muestran una alta vulnerabilidad en la subregión de La Mojana debido a la neotectónica activa, lo que puede influir en la subsidencia diferencial en la zona de los cuerpos de agua. Los depósitos aluviales también presentaron alta vulnerabilidad debido a la poca profundidad de los acuíferos y la alta recarga. Las formaciones Cerrito, Ciénaga de Oro y El Carmen mostraron una vulnerabilidad moderada, principalmente debido a su material más consolidado. La información obtenida es valiosa para la planificación y la gestión del recurso hidrogeológico en el SALM. El estudio destacó la importancia de considerar la neotectónica como un factor influyente en la vulnerabilidad de los acuíferos.

Palabras clave: DRASTIC, neotectónica, sistemas de información geográfica, vulnerabilidad intrínseca.

Introducción

En las últimas décadas, la contaminación de las aguas subterráneas se ha constituido en uno de los desafíos más apremiantes a nivel mundial (1). La disponibilidad de este recurso se asocia al equilibrio del ciclo hidrológico e hidrogeológico, así como a las condiciones propias del acuífero, que pudieran alterar las condiciones físicas, químicas y biológicas del recurso (2).

El crecimiento demográfico e industrial como tendencia mundial, tiene una íntima relación con problemas graves de contaminación (3). En particular, algunas actividades antrópicas que generan contaminación, principalmente aquellas asociadas al manejo de residuos sólidos y líquidos, que pueden estar siendo conducidas hacia las zonas puntuales de recarga (4).

La vulnerabilidad se define como la condición del medio a ser dañado o afectado negativamente; los cuerpos de agua subterráneos tienen características intrínsecas que ofrecen algún grado de protección según las condiciones físicas del acuífero y de la zona no saturada, esto definirá la facilidad con la que pueden ingresar un contaminante al acuífero, de esta manera, la vulnerabilidad intrínseca determina el grado de susceptibilidad a la contaminación incorporando factores característico del acuífero (5,6).

Para evaluar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero se establecieron diferentes metodologías como SINTACS, EPIK, GALDIT y DRASTIC; estas utilizan ecuaciones lineales ponderadas, donde cada variable tiene un peso dependiendo de su incidencia en las condiciones de vulnerabilidad y cuyo valor se establece bajo la justificación técnica que argumenta el autor. Por otra parte, el método GOD utiliza una ecuación lineal donde todas las variables tienen el mismo peso; esta metodología se implementa cuando la información es escasa.

Para esta investigación se utilizó el método DRASTIC+N (por sus siglas en inglés), que evalúa los factores: profundidad del nivel freático (D), recarga del acuífero (R), tipo de suelo (A), topografía (S), cobertura vegetal (T), infiltración (I), conductividad hidráulica (C) e índice de deformación neotectónico del paisaje (N). DRASTIC se destaca entre los métodos disponibles para el estudio de la vulnerabilidad intrínseca, debido a su capacidad para incorporar un mayor número de variables en su ecuación. Sin embargo, la efectividad del método depende en gran medida de la disponibilidad de información necesaria para evaluar cada una de las variables que lo componen. La obtención de datos precisos y completos es esencial

para garantizar la exactitud de la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero a través de este método.

En este caso, los autores proponen adicionar un parámetro a la ecuación, denominado potencial de deformación neotectónico del paisaje, con lo que se establece la metodología DRASTIC+N. Este parámetro ayuda a identificar áreas con una actividad tectónica significativa, que aumentan el riesgo de fracturas o fisuras en el acuífero. Asimismo, proporciona información sobre cómo se comporta el acuífero en respuesta a movimientos tectónicos, incluyendo en la recarga y el flujo de aguas subterráneas. Al evaluar estos factores asociados con la vulnerabilidad, se proporciona una comprensión sobre su capacidad para resistir la contaminación, lo que es fundamental para la gestión sostenible de los recursos hídricos y la toma de decisiones relacionadas con la protección y conservación de fuentes de agua subterránea vitales para las comunidades.

La presente investigación se enmarca en el Sistema Acuífero La Mojana (SALM) conformado por los acuíferos de las formaciones Ciénaga de Oro, Carmen, Cerrito, Sincelejo y Betulia, así como los depósitos y abanicos aluviales de la subregión de La Mojana. Todos, en conjunto, agrupan características hidrogeológicas que lo convierten en un reservorio de aguas subterráneas con gran potencial productivo, geológicamente complejo y altamente sensible.

Estudios realizados en el SALM, revelan que, el 83 % del área de La Mojana enfrenta una preocupante vulnerabilidad hídrica relacionada con la escasez de agua (7). Además, el Índice de Riesgo de Calidad del Agua (IRCA) muestra una categoría de alto riesgo para los municipios de Guaranda, Majagual y Caimito, con puntuaciones de 46,7 %, 52 % y 50,7 %, respectivamente, como señaló la Universidad de Córdoba en 2018 (8). En contraste, los municipios de San Marcos y Sucre presentan un riesgo moderado, con puntuaciones del 17 % y 20,2 %, respectivamente, según el informe mencionado anteriormente. En el SALM se tienen identificados un total de 1.140 pozos ubicados en la jurisdicción de CORPOMOJANA, de los cuales 400 cuentan con información referente a caudales concesionados o registrados, régimen de bombeo, coordenadas geográficas y tipos de uso.

La contaminación de las aguas subterráneas en el Sistema Acuífero La Mojana es una preocupación crítica para la gestión de los recursos hídricos en la región. Esta investigación evalúa el potencial de contaminación del agua subterránea utilizando el método DRASTIC+N, que integra la variable neotectónica a la ecuación original, lo que mejora la precisión del mapa de vulnerabilidad.

Establecer la vulnerabilidad intrínseca en el SALM ofrece la oportunidad de ampliar nuestro entendimiento sobre las condiciones y procesos hidrogeológicos presentes en este sistema acuífero. Además, permite identificar los posibles riesgos asociados y las áreas geográficas donde se encuentran ubicados. Esta información se convierte en una herramienta útil para la toma de decisiones en pro de la gestión integral de los recursos hídricos, la gestión de riesgos y la gobernanza del agua en La Mojana. Se espera que la actividad tectónica significativa incremente el riesgo de fracturas en el acuífero y, por ende, aumente las zonas de recarga directa y afecte negativamente su capacidad para resistir la contaminación.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de investigación (**Figura 4-1**) se enmarca entre los departamentos de Sucre, Córdoba Antioquia, Sur de Bolívar y Magdalena, al norte de Colombia, con un área total de 12.672 km². El SALM se dividió teniendo en cuenta los límites fisiográficos, en el suroriente la subregión de la serranía de San Jerónimo, al norte la subregión de la serranía de San Jacinto, y finalmente, al oriente de la falla del San Jorge, la subregión de La Mojana.

En el área de estudio se encuentran el acuífero de Ciénaga de Oro, acuífero El Carmen, acuífero El Cerrito, acuífero Sincelejo, acuífero Betulia, acuífero Depósitos Aluviales y La Mojana, que se compone de los cuerpos de agua, los paludales y el cinturón de avulsión.

Materiales y métodos

Se utilizará el método DRASTIC+N para evaluar la vulnerabilidad intrínseca en el área de estudio, esta metodología anexa la variable INDP. Como se indicó anteriormente, a la metodología DRASTIC se le adicionó la variable del INDP, con el objetivo de obtener un resultado más preciso sobre la vulnerabilidad de un sistema acuífero que está afectado por procesos tectónicos activos, resaltando áreas que son de interés.

Figura 4-1. Área de investigación. Delimitación del Sistema Acuífero La Mojana



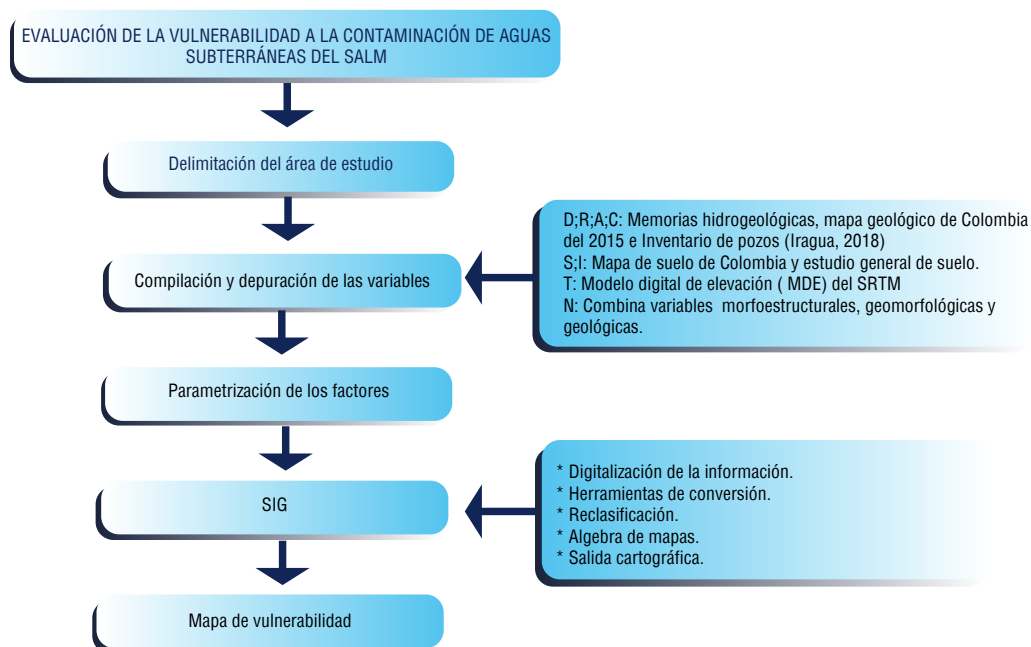
Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

Método DRASTIC+N

Método desarrollado por Aller *et al.* (1987) para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés). El objetivo fue conseguir una herramienta que permitiera evaluar la vulnerabilidad de aguas subterráneas (Nobre *et al.*, 2007), implementando datos hidrogeológicos (10).

Esta metodología utiliza las variables: profundidad del nivel freático (D), que se refiere al grosor de la capa que el contaminante debe atravesar antes de alcanzar el acuífero, cuanto menor sea esta profundidad, mayor será la vulnerabilidad (11). Recarga neta (R), representa la cantidad de agua que se infiltra en el acuífero en milímetros por año, la posibilidad de contaminación crece con un aumento en la recarga neta, lo que implica que a mayor flujo de agua hacia el acuífero, mayor será el riesgo de contaminación (11).

Figura 4-2. Diseño metodológico



Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

Medio acuífero (A): compuesto por los diversos tipos de rocas que hay en el reservorio de agua subterránea (12); estos acuíferos pueden ser confinados, semiconfinados o libres, teniendo en cuenta la capacidad de infiltración del material que lo recubre. La parte superior de la zona vadosa, donde existe una actividad biológica significativa, se conoce como el medio suelo (S). Topografía (T): se refiere a la pendiente del terreno y su variabilidad, una pendiente baja resultará en un flujo superficial reducido y, por lo tanto, un mayor riesgo de contaminación (13). El impacto de la zona vadosa (I) hace referencia a la capa insaturada o parcialmente saturada que se encuentra por encima del nivel freático (11). Conductividad hidráulica del acuífero (C): representa la capacidad de los materiales que componen el acuífero para permitir el flujo de agua a través de ellos (11). Se anexará la variable $INDP$ (N) en la ecuación, la neotectónica se trabajó en términos de índice, considerando que, a mayor índice de deformación, habrá mayor presencia de planos de debilidad que pueden actuar como vías preferenciales para el flujo vertical de agua, mayor probabilidad de ruptura o fisura de los acuíferos y zonas propensas a la subsidencia.

Obtención de la información

La litología del acuífero (A), profundidad del agua (D), conductividad hidráulica (C) y recarga (R) se definieron con base en información oficial de las memorias hidrogeológicas de Antioquia (14), Sucre (15) Bolívar (16) y Córdoba(17), y el mapa geológico de Colombia del 2015 (18). Con base en ello, se creó el mapa hidrogeológico del Sistema Acuífero La Mojana.

Las variables tipo de suelo (S) y naturaleza de la zona no saturada (I) se establecieron a partir de los estudios generales de suelo de los departamentos de Córdoba, Sucre, Bolívar y Antioquia (19–22).

Para diseñar el mapa de pendientes (T) y establecer su distribución en el área de estudio, se implementó como insumo el Modelo Digital de Elevación (MDE) de la Misión topográfica Radar Shuttle (SRTM, por sus siglas en inglés), procesado a partir de extensiones y herramientas de análisis espacial de un SIG. La resolución de los productos del SRTM es cercana a los 30 metros por pixel.

El índice de deformación neotectónica del paisaje ($INDP$), identificado con la letra N, muestra los posibles efectos de los procesos tectónicos recientes y actuales, que puedan haber contribuido a reconstruir o

reordenar de manera parcial o total, el plano morfoestructural del relieve en un área. Esta variable se obtuvo durante el desarrollo de la investigación; se identificaron los lineamientos estructurales, las roturas de los diques marginales del río Cauca y las zonas de acumulación de sedimentos.

Reclasificación de las variables

Estos factores son reclasificados bajo estándares determinados, teniendo en cuenta el nivel de la importancia para la vulnerabilidad del acuífero (Tabla 4-1).

Tabla 4-1. Valoración de parámetros para el método DRASTIC+N

Factores de valoración			
Variable	Valoración	Variable	Valoración
D (profundidad, m)	D_r	T (pendiente, %)	T_r
0 – 1,5	10	0 – 2	10
1,5 – 4,6	9	2 – 6	9
4,6 – 9,1	7	6 – 12	5
9,1 – 15,2	5	12 – 18	3
15,2 – 22,9	3	>18	1
22,9 – 30,5	2	I (naturaleza de la zona no saturada)	I_r
> 30,5	1	Capa confinante	1
R (recargas, mm)	R_r	Cieno-arcilla	2 – 6
0 – 50	1	Lutita	2 – 5
50 – 103	3	Caliza	2 – 7
103 – 178	6	Arenisca	4 – 8
178 – 254	8	Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4 – 8
> 254	9	Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4 – 8
A (litología del acuífero)	VALORACIÓN A_r	Metamórfica/Ígnea	2 – 8
Lutita masiva	1 – 3	Grava y arena	6 – 9
Metamórfica/Ígnea	2 – 5	Basalto	2 – 10
Metamórfica / Ígnea meteorizada	3 – 5	Caliza kárstica	8 – 10
Arenas y gravas de origen glacial	4 – 6	C (conductividad hidráulica m/día)	C_r
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 – 9	0,04 – 4,08	1
Arenisca masiva	4 – 9	4,08 – 12,22	2
Caliza masiva	4 – 9	12,22 – 28,55	3
Arena o grava	4 – 9	28,55 – 40,75	6
Basaltos	2 – 10	40,75 – 81,49	8
Caliza kárstica	9 – 10	> 81,49	10
S (tipo de suelo)	S_r	N (neotectónica)	VALORACIÓN IN
Delgado o ausente	10	Muy Bajo	2
Grava	10	Bajo	4
Arena	9	Moderado	6
Agregado arcilloso o compactado	7	Alto	8
Arenisca margosa	6	Muy Alto	10
Marga	5		
Limo margoso	4		
Arcilla margosa	3		
Estiércol-cieno	2		
Arcilla no compactada y no agregada	1		

Fuente: Aller et al. (1987).

Factores de ponderación

A cada parámetro, se le asignó un valor índice entre 1 y 10 (Tabla 4-1), así como un factor de ponderación para las variables D, R, A, S, T, I y C equivalente a 5, 4, 3, 2, 1, 5 y 3, respectivamente, en cuanto a la variable N, se le asignó un peso de tres, para tener una influencia neutra en el mapa final de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos (Tabla 4-2).

Ecuación lineal ponderada

Luego de asignar el peso ponderado y factor de valoración a cada una de las variables, teniendo en cuenta el tipo de contaminantes, se utiliza la Ecuación 1 para establecer la vulnerabilidad intrínseca del acuífero:

$$Iv = \sum_{i=1}^7 ri \cdot wi$$

$$DRASTIC + N = ("rD" * w) + ("rR" * w) + ("rA" * w) + ("rS" * w) + ("rT" * w) + ("rA" * w) + ("rS" * w) + ("rT" * w) + ("rI" * w) + ("rC" * w) + ("rN" * w)$$

Ecuación 1

Donde:

- r: factor de clasificación o valoración.
- w: factor de ponderación.

Asignación del grado de vulnerabilidad

Al anexar una nueva variable a la ecuación, los resultados varían con respecto a lo establecido por el autor original, por lo que cada rango se aumentó un 11,5 %; de igual manera, se reclasificaron en cinco rangos, con grados que van de muy bajo a muy alto (Tabla 4-2).

Tabla 4-2. Categorías de vulnerabilidad para el método drastic

Grado	Vulnerabilidad general
Muy bajo	26 – 72
Bajo	73 – 119
Moderado	120 – 165
Alto	166 – 211
Muy alto	212 – 260

Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

El resultado es plasmado en un mapa temático que muestra la distribución de la vulnerabilidad en el área de estudio.

Resultados y discusión

La profundidad del agua subterránea se refiere al espesor de la zona no saturada. Por su parte, la vulnerabilidad a la contaminación es inversamente proporcional a la profundidad. Cuando el espesor de la zona no saturada es mayor, el tiempo de tránsito de sustancias hasta el acuífero aumenta, lo que resulta en mayor probabilidad de atenuación de una carga contaminante por degradación o retención natural.

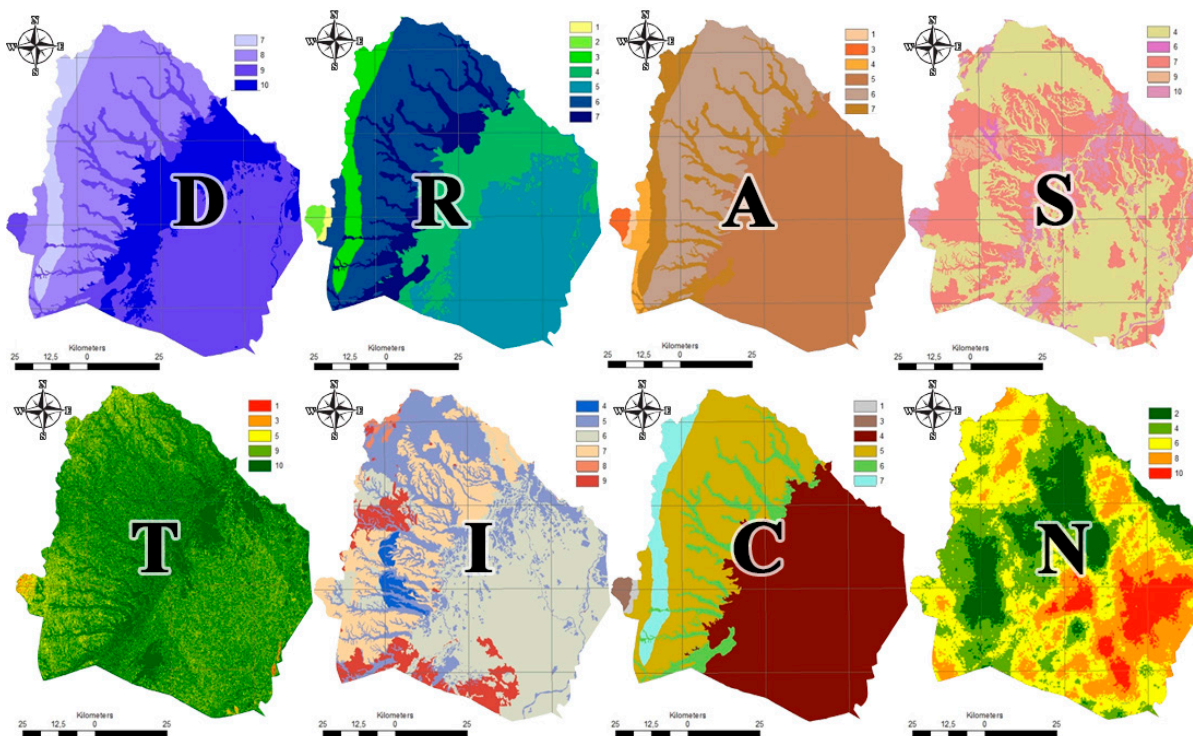
La reclasificación de los factores se obtuvo a partir del mapa hidrogeológico, donde se establece una profundidad promedio por unidad geológica (Tabla 4-1). Como resultado de la reclasificación, se determinó

un rango de valores entre siete y diez. Los acuíferos más someros son los ubicados en las zonas de las ciénagas y paludales, con una profundidad de hasta un metro aquellos con una valoración de diez. Con una valoración de nueve están los acuíferos ubicados en las formaciones Ciénaga De Oro, Depósitos Aluviales y el cinturón de avulsión con una profundidad de dos metros. Las formaciones Carmen, Cerrito, Betulia y abanicos aluviales mantienen una profundidad de aguas subterráneas de cuatro metros, por lo que se les otorga una valoración de ocho. Finalmente, la unidad que registra el nivel más profundo son los acuíferos de la Formación Sincelejo, con un promedio de quince metros de profundidad, por lo que se le da, según el autor, una valoración de siete (**Figura 4-3A**).

La capacidad de infiltración se relaciona directamente con la porosidad, las arenas tendrán una mayor capacidad de infiltración y permitirán el ingreso de mayor volumen de recarga en comparación con las arcillas (11). Hay que considerar que las arcillas expansivas por sus propiedades generan grietas de desecación que permiten el paso de sustancias con mayor facilidad hacia las aguas subterráneas (23). En general, las zonas de recarga de los acuíferos se consideran altamente sensibles ya que pueden permitir el ingreso de sustancias al acuífero (24).

Cada litología identificada en la zona de estudio ha sido evaluada y calificada en términos de su potencial de infiltración (**Tabla 4-1**). Los factores de la variable de recarga se reclasificaron en términos de valores numéricos que van de uno a siete (**Figura 4-3R**).

Figura 4-3. Clasificación de los parámetros profundidad (D), recarga (R), litología del acuífero (A), tipo de suelo (S), topografía (T), naturaleza de la zona no saturada (I), conductividad hidráulica (C), y neotectónica (N)



Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

En la **Figura 4-3R**, las zonas con baja recarga se encuentran hacia el oeste de la zona de estudio, ubicados en las formaciones El Carmen y Sincelejo. La formación Ciénaga de Oro tiene texturas con mayor presencia de arcillas como las arcillolitas y las lodolitas, que actúan como capas con alta capacidad de impermeabilidad que pueden ralentizar el paso de contaminantes hacia el acuífero.

En la subregión La Mojana, hacia el cinturón de avulsión, los depósitos paludales y las llanuras de inundación, enmarcadas por los cuerpos de agua, se tiene una zona de recarga moderada con valoraciones de cuatro y cinco. Esta zona mantiene granulometrías de granos finos a moderados con presencia de texturas mixtas, además, ofrece una capacidad de retención de agua moderada, lo que impide la rápida escorrentía superficial y permite que el agua se filtre lentamente hacia el acuífero.

Finalmente, la Formación Sincelejo, así como los abanicos aluviales, son zonas de alta recarga teniendo en cuenta su granulometría, la presencia de areniscas al ser más permeables, permiten una infiltración relativamente rápida. Sin embargo, las intercalaciones de arcillas plásticas actúan como capas semi-impermeables que pueden ralentizar significativamente los flujos de infiltración y percolación. Esto crea un escenario en el que la recarga es intermitente y depende en gran medida de las condiciones climáticas y la saturación de las arcillas.

Desde el punto de vista litológico, la Formación Sincelejo presenta las condiciones más sensibles a la contaminación, ya que se clasifica como una secuencia de areniscas conglomeráticas intercaladas con arcillolitas. Le sigue en términos de sensibilidad la Formación Betulia, compuesta por gravas, arenas y arcillas que forman capas irregulares y acuíferos localmente aislados. Por otro lado, la Formación El Carmen presenta condiciones granulométricas menos favorables para la acumulación de aguas subterráneas, ya que predomina la presencia de capas de arcillolitas (**Figura 4-3A**).

En el área del Sistema Acuífero La Mojana hay predominio de suelos con textura arcillosa. Este tipo de materiales teóricamente se considera poco permeable ya que retiene los contaminantes. Los coloides del suelo, constituidos por minerales arcillosos presentan cargas eléctricas superficiales provenientes de sustituciones isomórficas naturales (25).

Hacia las subregiones San Jerónimo y La Mojana, estas zonas arcillosas son el constituyente principal de los depósitos aluviales, están bajo el cinturón de avulsión, bajo los cuerpos de agua y sobre la formación Betulia. Esta característica genera una capa que limita el alto flujo de contaminantes hacia el acuífero, dándole una valoración de cuatro. Seguido de estas, se encuentran los suelos arcillosos a arenosos y arcillo gravosos, con una valoración de seis y siete, respectivamente, y se hallan mayormente en las zonas de amortiguación de inundación y ríos de la zona de estudio (**Figura 4-3S**).

Con una clasificación de diez se encontraron zonas urbanas, con ausencia de suelo, en estos puntos es donde se generan las mayores concentraciones de residuos sólidos y líquidos, que se vuelven una amenaza debido a la ausencia de un tratamiento adecuado. Esto genera una alta probabilidad de contaminación del recurso hídrico por producción de lixiviados que se infiltran y pueden alcanzar los acuíferos superficiales o son vertidos directamente a los cuerpos superficiales de agua. Finalmente, con una valoración de nueve se tienen las zonas con texturas pedregosas ubicadas en la Formación Ciénaga de Oro y norte de la Formación Sincelejo (**Figura 4-3S**).

El Sistema de Acuífero La Mojana se caracteriza por el predominio de pendientes que varían entre el 0 y el 12 %. Estas pendientes favorecen la acumulación de sedimentos y la formación de sistemas de ciénagas. Por otro lado, en las zonas norte, oeste y sureste se identifican pendientes que oscilan entre el 15 y el 30 %, así como pendientes superiores al 30 %, que corresponden a afloramientos rocosos. En estos sectores, el valor de las pendientes promueve el escurrimiento y la eliminación de sedimentos de manera más eficiente.

A menor pendiente mayor acumulación de flujo. En este caso, las mayores acumulaciones se encuentran hacia la subregión La Mojana, exactamente en la zona de ciénagas, por eso tiene una valoración de diez y es una zona de gran interés para la variable de pendiente; los puntos con valoración más bajos se

encuentran en la parte norte y oeste del área de estudio donde se logran identificar los paisajes montañosos de las formaciones Ciénaga de Oro y El Carmen (**Figura 4-3T**).

El mapa resultante presenta diferencias notables en la naturaleza de la zona no saturada. Se da una reclasificación de sus factores, que van de cuatro a diez; los valores más bajos se encuentran hacia el norte de las formaciones Betulia y Sincelejo. Además, abarca las extensiones de área de los depósitos aluviales y cuerpos de agua. En estas regiones, las texturas ricas en arcillas, como las arcillolitas y las lodolitas, actúan como barreras con baja permeabilidad, ralentizando el movimiento de contaminantes hacia el acuífero, con una valoración de cuatro a cinco (**Figura 4-3I**).

Con una valoración de seis y ubicados especialmente hacia el cinturón de avulsión, se encuentran los sedimentos aluviales con una granulometría de finos a medios, y hacia las formaciones Sincelejo y Betulia se encuentran arcillolitas con intercalaciones de areniscas y material calcáreo (**Figura 4-3I**).

En gran parte de las formaciones Ciénaga de Oro, El Carmen, Sincelejo y Betulia, así como en los abanicos aluviales, predomina una valoración entre siete y ocho. Los sedimentos que van de finos a gruesos, que incluyen gravas, arcillas, arenas, areniscas conglomeráticas, aluviones mixtos y arenas poco consolidadas, desempeñan un papel significativo en la vulnerabilidad de los acuíferos.

La heterogeneidad en la textura y la composición de estos sedimentos puede influir en la capacidad del acuífero para retener y filtrar contaminantes. Las gravas y areniscas conglomeráticas, debido a su mayor permeabilidad, permiten una infiltración más rápida del agua, pero a menudo carecen de la capacidad de retener contaminantes, lo que puede aumentar la vulnerabilidad del acuífero. Por otro lado, las arcillas, en general, pueden actuar como barreras de baja permeabilidad, reduciendo la velocidad de infiltración y protegiendo el acuífero de la contaminación. (**Figura 4-3I**).

Finalmente, con la mayor valoración se tienen zonas urbanizadas, sedimentos gruesos y gravas, que favorecen la infiltración del agua, lo que puede ser beneficioso para la recarga de los acuíferos. Sin embargo, esta misma característica los hace más susceptibles a la contaminación, ya que los contaminantes pueden moverse con relativa facilidad a través de estos sedimentos hacia los acuíferos. La falta de retención de contaminantes en los sedimentos gruesos aumenta la vulnerabilidad del acuífero a la intrusión de sustancias no deseadas (**Figura 4-3I**).

La conductividad hidráulica es la capacidad de un material de transmitir un fluido, por lo tanto, un material será más permeable cuando sea poroso, y estos poros sean de gran tamaño y estén interconectados (26).

La conductividad hidráulica se expresa en una escala de uno a diez, donde un valor de uno indica una baja conductividad, lo que significa que el flujo de agua a través del medio es muy lento. Un valor de diez, por otro lado, representa una alta conductividad, lo que indica que el agua puede moverse rápidamente a través del sustrato. La conductividad hidráulica es influenciada por diversas características del material, como la granulometría, la porosidad, la conectividad de los poros y la presencia de fracturas o grietas (**Figura 4-3C**).

Se evidenció una baja conductividad en la subregión La Mojana y las formaciones Ciénaga de Oro y Carmen con una valoración de cuatro, tres y uno; por otra parte, las condiciones de conductividad hidráulica moderadas están en las formaciones Carmen, Betulia y depósitos aluviales, estas entran en un rango de valoración entre cinco y seis. Finalmente donde se tiene una mayor conductividad hidráulica es la Formación Sincelejo (**Figura 4-3C**).

El índice de deformación neotectónica del paisaje (INDP) para el Sistema Acuífero La Mojana se derivó de nueve variables morfométricas, morfotectónicas y geológicas. Estas variables se integraron mediante

un análisis de decisión multicriterio empleando procesos de jerarquía analítica y una combinación lineal ponderada en un Sistema de Información Geográfica.

Los resultados resaltan un mayor potencial de deformación en la subregión de La Mojana, donde se encuentran valoraciones moderadas a altas, especialmente en las áreas centrales y orientales, específicamente en las proximidades de cuerpos de agua. Por el contrario, en la zona suroeste del área de estudio, se observa una valoración de INDP baja a muy baja (**Figura 4-3N**).

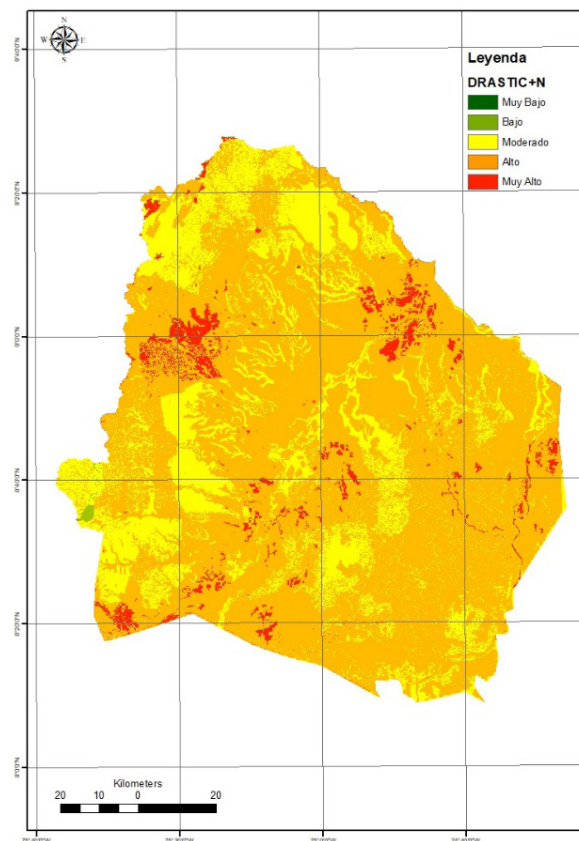
El análisis del potencial de deformación neotectónica del paisaje se centra en gran medida en la subregión de La Mojana, donde se concentran los focos más significativos de alto potencial de deformación. Esta correlación se observa en la extensión de sistemas de fallas de Sucre, que coincide con una mayor saturación del suelo con relación a la topografía. Sin embargo, no todas las áreas con cuerpos de agua se correlacionan con un alto potencial de deformación, ya que, en la zona central del área de estudio, donde no predominan los complejos cenagosos, se identifican cuerpos de agua con valoraciones altas a muy altas.

En las zonas con colinas de alturas medianas a bajas, como la serranía de San Jacinto-Montes de María y la serranía de San Jerónimo hacia el sur, coinciden con valoraciones de deformación neotectónica moderadas y algunos focos altos. Las zonas categorizadas con una deformación neotectónica baja a muy baja reflejan la influencia de los abanicos y los depósitos aluviales debido a la naturaleza poco consolidada del material, en contraste con lo observado en el cinturón de avulsión, que coincide con zonas de mayor índice de deformación. Esto se interpreta como la tendencia de ciertos tipos de litología a favorecer cambios en el paisaje según la actividad tectónica.

Para calcular la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos se tuvieron en cuenta los pesos de las variables establecidos por el autor, anexando el peso de la variable neotectónica y los valores de la estandarización de los factores establecidos en la **Tabla 4-1**. Se utilizó la ecuación lineal ponderada (Ecuación 1) para establecer un valor que represente la vulnerabilidad en el área de estudio. Esta fórmula se trabajó a través de la herramienta “calculadora ráster” propias del software ArcGIS, lo que dio como resultado la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos en el Sistema Acuífero La Mojana.

El resultado de la aplicación del método DRASTIC+N muestra un valor mínimo de 112 y un valor máximo de 246 en el SALM. Para la reclasificación de los rangos se aumentó un 11,5 % cada valor, siguiendo lo establecido por el autor original, validando así los resultados obtenidos en la investigación (**Figura 4-4**).

Figura 4-4. Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos en el Sistema Acuífero La Mojana

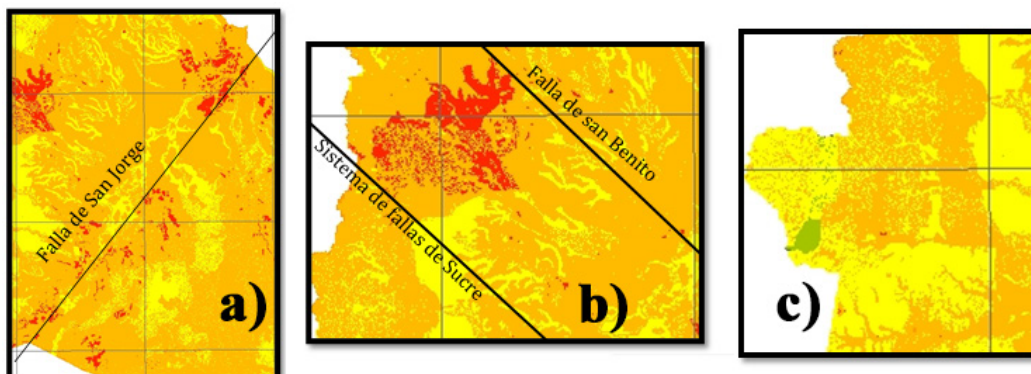


Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

El mapa final muestra gran parte del área de estudio con una vulnerabilidad alta a moderada. La zona del acuífero La Mojana tiene gran parte de su territorio en alta vulnerabilidad, se evidencian trazas de muy alta vulnerabilidad que cruzan de suroeste a noreste, enmarcados por los cuerpos de agua y la falla del San Jorge (Figura 4-5a).

La subregión de La Mojana mantiene una neotectónica bastante activa, lo que provoca deformaciones de paisaje que pueden ser responsables de procesos de recarga altamente eficiente, de reforzar los fenómenos de subsidencia diferencial por sobrecarga de sedimentos o las roturas del dique marginal izquierdo del río Cauca hacia el sur. Esto ha dado como resultado los sistemas avulsivos que incrementan la vulnerabilidad, teniendo en cuenta la poca consolidación del material parental, una recarga moderada y un nivel freático alto.

Figura 4-5. a) Falla del San Jorge, b) Depósitos aluviales, y c) Formaciones Ciénaga de Oro, El Carmen y Betulia



Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

La zona de los depósitos aluviales mantiene una vulnerabilidad alta, estos acuíferos son muy someros, aproximadamente dos metros de profundidad, lo que hace que el contaminante tenga que transportarse verticalmente una distancia relativamente corta para llegar al nivel freático. Esta zona es representativa de alta recarga en el área de estudio, lo que aumenta la vulnerabilidad de los acuíferos, para la variable pendiente son zonas de acumulación de topografía baja y la conductividad hidráulica es alta. La zona de mayor interés se ubica hacia el norte, donde se observan áreas con vulnerabilidad muy alta, que se encuentran casualmente delimitadas por la falla de San Benito y el sistema de fallas de Sucre **Figura 4-5b**.

En las formaciones Ciénaga de Oro, El Carmen y Cerrito se tiene una vulnerabilidad moderada con zonas de interés en categoría baja. Las zonas con calificación baja se presentan sobre los acuíferos de la Formación El Carmen con algunas zonas hacia la Formación Ciénaga de Oro, considerada como una unidad de poco potencial hidrogeológico (**Figura 4-5c**).

Estas formaciones se destacan por ser materiales con alta consolidación, además, de ser áreas de baja recarga hacia las formaciones Ciénaga de Oro y El Carmen. Allí se encuentran los paisajes montañosos de las formaciones de Ciénaga de Oro que impiden la acumulación de flujo.

La distribución de esta categoría sobre la Formación Betulia coincide con litología arcillosa, suelos finos y baja densidad de lineamiento. La vulnerabilidad muy alta, corresponde a dos zonas puntuales sobre los centros poblados y la zona con mayor densidad de lineamientos, y, por lo tanto, con mayor permeabilidad por fracturamiento, este punto se localiza a la altura del municipio de Magangué.

El acuífero Sincelejo, considerado como uno de los más importantes del departamento de Sucre, presenta resultados de vulnerabilidad entre moderada a alta, teniendo en cuenta que la litología del acuífero está conformada por granulometrías porosas de arenas y conglomerados. Se asume que funciona como una zona de alta infiltración y percolación, por lo tanto, es de alta sensibilidad.

En la subregión de La Mojana, los procesos de subsidencia diferencial, provocada por altas cargas de sedimentación (27-31), es un fenómeno recurrente en la región, influyendo significativamente en la dinámica hidrogeológica de los acuíferos. La subsidencia diferencial puede intensificar los procesos de recarga eficiente al modificar el relieve y las características de permeabilidad del suelo. Esta interacción entre la deformación neotectónica y la hidrogeología local crea condiciones que favorecen una mayor vulnerabilidad de los acuíferos, particularmente en áreas donde los materiales son poco consolidados y permiten una rápida infiltración de agua.

Conclusiones

Se utilizó un enfoque de clasificación y ponderación de estos factores diferenciales para calcular la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos en la zona de estudio. Se anexó la neotectónica, la cual logra influir en la dinámica hidrogeológica de los acuíferos, con presencia, especialmente, en zonas con condiciones hidrogeológicas de alta vulnerabilidad; de ahí que, esta variable puede modificar a futuro la manera tradicional de establecer la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos.

Los resultados sugieren un refuerzo desde la deformación neotectónica del paisaje a los procesos de subsidencia diferencial debidos a altas cargas de sedimentación, ampliamente discutidos por Martínez (1981), Van der Hammen (1986), Plazas *et al.* (1988), Smith (1986) y Herrera *et al.* (2001), sobre la subsidencia diferencial en la subregión de La Mojana (27-31).

Los depósitos aluviales también exhiben una alta vulnerabilidad debido a su poca profundidad y alta recarga. Las formaciones Ciénaga de Oro, El Carmen y Cerrito, muestran una vulnerabilidad moderada, en parte debido a mayor consolidación de sus materiales y su baja recarga hidrogeológica. En cuanto al acuífero Sincelejo, se considera una zona de alta sensibilidad debido a su litología porosa. La información

aquí suministrada es útil para la elaboración de los instrumentos de planificación y gestión del territorio en la región de La Mojana, especialmente para los asociados con la gestión del recurso hidrogeológico.

Agradecimientos

El presente trabajo se financió a través del Fondo Ciencia Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías como parte del proyecto “Implementación de estrategias de gestión de riesgo en el manejo integral de zonas de recarga de los acuíferos utilizados como fuente de abastecimiento de las comunidades de la subregión Mojana, departamento de Sucre”, código BPIN 2020000100361.

Referencias

1. Umar R, Ahmed I, Alam F. Mapping groundwater vulnerable zones using modified DRASTIC approach of an alluvial aquifer in parts of central Ganga plain, Western Uttar Pradesh. *J Geol Soc India*. febrero de 2009;73(2):193-201.
2. Aller L, Thornhill J, Bennet T, Lehr H, Petty J, Hackett G. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency. 1987.
3. Singh A, Srivastav SK, Kumar S, Chakrapani GJ. A modified-DRASTIC model (DRASTICA) for assessment of groundwater vulnerability to pollution in an urbanized environment in Lucknow, India. *Environ Earth Sci*. octubre de 2015;74(7):5475-90.
4. Al-Zabet. Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. *Environmental Geology*. 2002;43:203-8.
5. Foster S. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: van Duijvenbooden W, van Waegeningh HG (eds) TNO Committee on Hydrological Research, The Hague. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Proc Inf 38, pp 69–86. 1987.
6. Vrba, Zaporozec. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. IAH; 1994.
7. IDEAM. Estudio Nacional del Agua 2018. [Internet]. 2019. Disponible en: https://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf
8. Instituto Regional del Agua -Iragua. Estudio Regional del Agua de la Cuenca Baja del río San Jorge, jurisdicción de Corpomojana. Inédito. Corpomojana y Universidad de Córdoba; 2018.
9. Nobre, Rotunno Filho, Mansur, Nobre, Cosenza. Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. *Journal of Contaminant Hydrology* [Internet]. 2007 [citado 3 de octubre de 2022];94(3):277-92. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169772207000861>
10. Baez. Mapeo de la Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación del Agua Subterránea del Gran Asunción. 2014.
11. Sophocleous M. Groundwater recharge estimation and regionalization: the Great Bend Prairie of central Kansas and its recharge statistics. *Journal of Hydrology*. agosto de 1992;137(1-4):113-40.
12. Burkart M, Kolpin D, James D. Assessing groundwater vulnerability to agrichemical contamination in the Midwest US. *Water Science and Technology* [Internet]. 1999 [citado 19 de octubre de 2023];39(3). Disponible en: <http://wst.iwaponline.com/content/39/3/103>
13. Rueda O, Betancur T. Evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea en el Bajo Cauca antioqueño. 2006;

14. INGEOMINAS. Mapa geológico departamento de Antioquia escala 1:100.000 geología, recursos minerales y amenazas potenciales. Memoria explicativa. 1996
15. INGEOMINAS. Mapa hidrogeológico de de Sucre. 2003.
16. INGEOMINAS. Mapa geológico generalizado del departamento de Bolívar. 2000.
17. INGEOMINAS. Mapa hidrogeológico de Córdoba. 2003.
18. Gómez J, Montes N, Nivia A, Diederix H. Mapa Geológico de Colombia 2015. Escala 1:1 000 000. Servicio Geológico Colombiano. SGC. 2015.
19. IGAC. Estudio general de suelos del Oriente Atioqueño. 1964.
20. IGAC. Estudio general de suelos departamento de Sucre. 1998.
21. IGAC. Estudio general de suelos departamento de Córdoba. 2009.
22. IGAC. Cartografía de Colombia. 2019.
23. Holtz WG, Gibbs HJ. Engineering Properties of Expansive Clays. T Am Soc Civ Eng. enero de 1956;121(1):641-63.
24. Foster SSD, Chilton PJ. Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation. Falkenmark M, Folke C, editores. Phil Trans R Soc Lond B. 29 de diciembre de 2003;358(1440):1957-72.
25. Marco JL. Adsorción de picloram sobre minerales arcillosos. [Internet] [Tesis Doctoral]. [Buenos Aires]: Universidad de Buenos Aires; 2011. Disponible en: https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n4825_MarcoBrown
26. Ordoñez. Agua Subterránea - Acuíferos. “Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico” [Internet]. 2011. Disponible en: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterranas.pdf
27. Martínez A. Subsistencia y geomorfología de la depresión inundable del río Magdalena. 1981;319-28.
28. Van Der Hammen T. Fuctuaciones holocénicas del nivel de inundaciones en la cuenca del bajo Magdalena, Cauca-San Jorge (Colombia). 1986;
29. Plazas C, Van Der Hammen T, Falchetti A, Botero P. Cambios ambientales y desarrollo cultural en el bajo río San Jorge. 1988.
30. Smith DG. Anastomosing river deposits, sedimentation rates and basin subsidence, Magdalena River, northwestern Colombia, South America. Sedimentary Geology. febrero de 1986;46(3-4):177-96.
31. Herrera L, Sarmiento G, Romero F, Botero P, Berrio J. Evolución ambiental de la depresión momposina (Colombia) desde el Pleistoceno Tardío a los paisajes actuales. Geología Colombiana. 2001;(26).