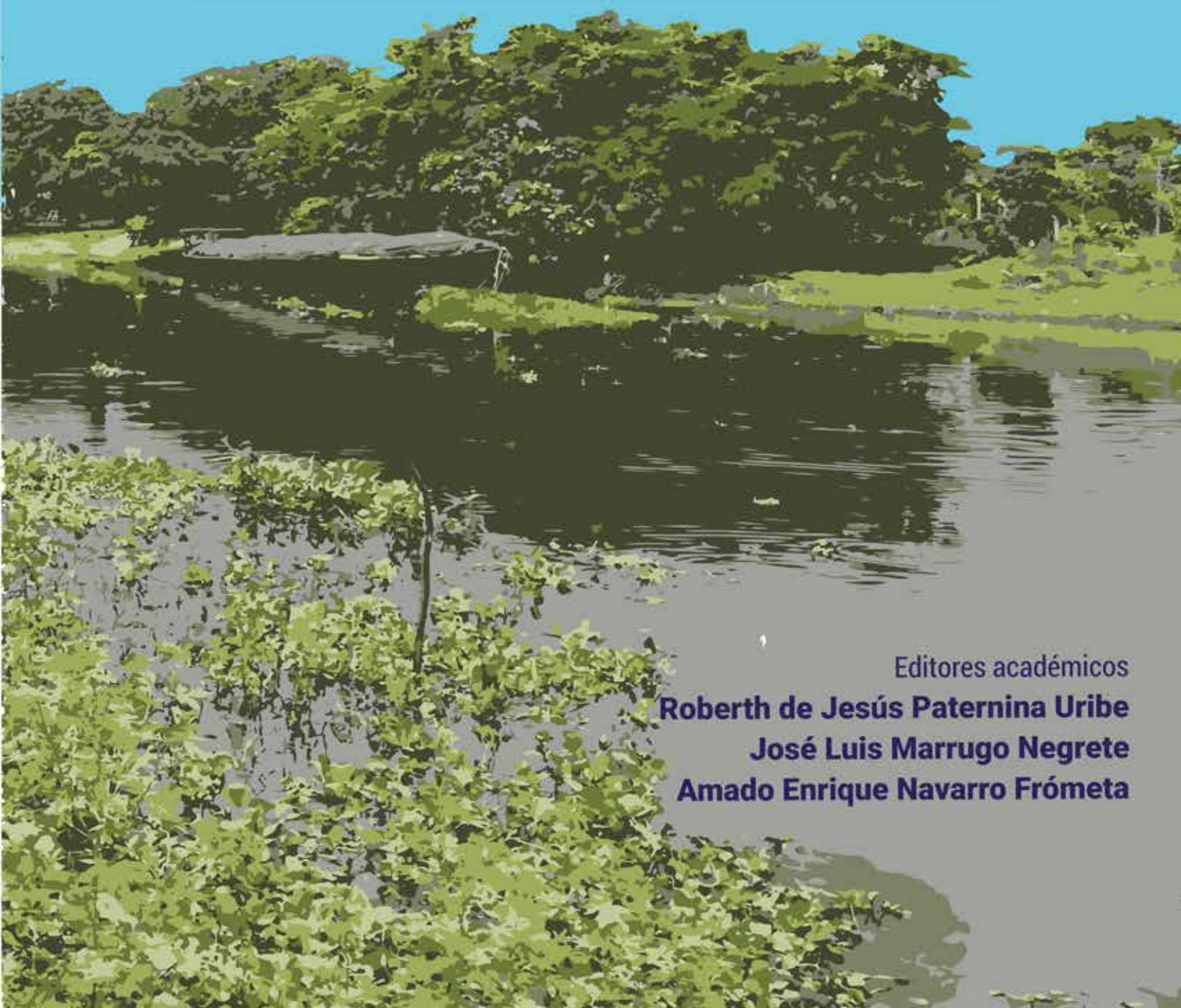


Sistema acuífero **La Mojana:**

elementos para la gestión hídrico integral del recurso



Editores académicos

Roberth de Jesús Paternina Uribe

José Luis Marrugo Negrete

Amado Enrique Navarro Frómata



SISTEMA ACUÍFERO LA MOJANA:

Elementos para la gestión integral del recurso hídrico

Editores académicos

Roberth de Jesús Paternina Uribe

José Luis Marrugo Negrete

Amado Enrique Navarro Frómata

Autores

Jairo Herrera Arango / Ana Karina Pérez Peñate

José Luis Marrugo Negrete / Roberth de Jesús Paternina Uribe

José Flórez Castaño / Mauricio Rosso Pinto

María Angélica Mendoza Atencio / Bernardo Acuña Ayazo

Juan Camilo Ospino Pérez / Germán Holland Enamorado Montes

Joel David Alean Flórez / Saudith María Burgos Núñez

Elvia Valeria Durante Yáñez / Iván David Urango Cárdenas

Amado Enrique Navarro Frómata / Marisol Laza Durante

José Pinedo Hernández / José Peroza Sierra



Sistema acuífero La Mojana: elementos para la gestión integral del recurso hídrico

© Universidad de Córdoba

© Corporación Universitaria Remington

Primera edición, febrero de 2025

ISBN: 978-628-96305-7-2 (Internet-PDF)

DOI: <https://doi.org/10.22209/9786289630572>

Editores académicos: Roberth de Jesús Paternina Uribe, José Luis Marrugo Negrete y Amado Enrique Navarro Frómata

Directora editorial: Adriana Patricia Bustamante Fernández.

Coordinadora de procesos editoriales: Viviana Díaz.

Diseñador editorial: Alfonso Tobón Botero.

Correctora de textos: Isadora González Rojas.

Fondo Editorial Remington

fondo.editorial@uniremington.edu.co

Calle 51 # 51-27, Edificio Uniremington

PBX: (604) 3221000, extensión 3505

Medellín, Colombia

Nota legal

Las opiniones expresadas en el presente texto no representan la posición oficial o institucional de la Universidad de Córdoba ni de la Corporación Universitaria Remington. Las citas realizadas y la originalidad de la obra son responsabilidad de los autores; en consecuencia, ninguna de las dos instituciones será responsable ante terceros por el contenido técnico o ideológico expresado en el texto, ni asume responsabilidad alguna por las infracciones a las normas de propiedad intelectual.

Paternina Uribe, Roberth de Jesús

Sistema acuífero La Mojana: elementos para la gestión integral del recurso hídrico / Editores académicos Roberth de Jesús Paternina Uribe, José Luis Marrugo Negrete, Armando Enrique Navarro Frómata. - 1.ª ed. - Medellín: Universidad de Córdoba; Corporación Universitaria Remington. 2025

Número de páginas: 150 pag. Tamaño: 21 × 28 cm

ISBN: 978-628-96305-7-2

1. Acuíferos (Colombia). 2. Aguas subterráneas (Colombia). 3. Desarrollo de recursos hídricos. 4. Gestión integrada de recursos hídricos. 5. Hidrocarburos aromáticos policíclicos. 6. Recursos hídricos (Colombia). I. Paternina Uribe, Roberth de Jesús. II. Tít.

CDD: 628.114 / P295

CONTENIDO

PRESENTACIÓN	8
PRÓLOGO	9
CAPÍTULO 1	
Introducción al sistema acuífero La Mojana.....	11
Herrera-Arango, J. / Pérez-Peñate, A. K. / Rosso-Pinto, M. J. / Marrugo-Negrete, J. L. / Paternina-Urbe, R.	
CAPÍTULO 2	
Potencial de deformación del paisaje neotectónico en el sistema acuífero La Mojana	32
Florez-Castaño. J. D. / Herrera-Arango, J. / Rosso-Pinto, M. J. / Marrugo-Negrete, J. L. / Paternina-Urbe, R.	
CAPÍTULO 3	
Identificación de zonas potenciales de recarga hidrogeológica mediante procesos de análisis jerárquico en el sistema acuífero La Mojana	52
Herrera-Arango, J. / Pérez-Peñate; A. K. / Rosso-Pinto, M. J. / Marrugo-Negrete, J. L. / Paternina-Urbe, R.	
CAPÍTULO 4	
Determinación de la vulnerabilidad a la contaminación de aguas subterráneas del sistema acuífero de La Mojana.....	76
Rosso-Pinto, M. J. / Herrera-Arango, J. / Florez-Castaño, J. D. / Pérez-Peñate, A. K. / Mendoza-Atencio, M. / A.Acuña-Ayazo, B. / Ospino-Contreras, J. C. / Marrugo-Negrete. J. L. / Paternina-Urbe, R.	
CAPÍTULO 5	
Hidrocarburos aromáticos policíclicos en agua subterránea y superficial de la región de La Mojana sucreña	91
Enamorado-Montes, G. / Alean-Flórez, J. / Burgos-Núñez, S. / Durante-Yáñez, E. V. / Urango-Cárdenas, I. / Ospino-Contreras, J. / Marrugo-Negrete, J. / Paternina-Urbe, R. / Navarro-Frómata, A.	
CAPÍTULO 6	
Análisis multitemporal del comportamiento de las áreas húmedas y las plumas de sedimentos de la subregión La Mojana entre 1982 y 2022.....	110
Mendoza-Atencio, M. A. / Herrera-Arango, J. / Rosso-Pinto, M. J. / Marrugo-Negrete, J. L. / Paternina-Urbe, R.	
CAPÍTULO 7	
Acumulación de mercurio en variedades criollas de arroz (<i>Oryza sativa L.</i>) cultivadas en suelos de la región de La Mojana.	133
Laza-Durante, M. / Urango-Cárdenas, I. / Enamorado-Montes, G. / Pinedo-Hernández, J. / Marrugo-Negrete, J. / Paternina-Urbe, R. / Peroza-Sierra, J.	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.	Cuenca baja del río Magdalena	13
Figura 1-2.	Unidades hidrológicas de la depresión momposina.....	16
Figura 1-3.	Mapa del delta interior del Magdalena	18
Figura 1-4.	Mapa de distribución de municipios en La Mojana	19
Figura 1-5.	Sistemas fluviales avulsivos en los abanicos de desbordamiento generados por los rompederos (chorros) del río Cauca en el Abanico Aluvial de La Mojana	22
Figura 1-6.	Abanico de Santiago	23
Figura 1-7.	Sector septentrional de La Mojana	25
Figura 2-1.	Área de estudio en el Sistema Acuífero La Mojana	35
Figura 2-2.	Diseño metodológico para la evaluación de la deformación del paisaje neotectónico en el Sistema Acuífero La Mojana.....	36
Figura 2-3.	Mapas de distribución espacial de los criterios utilizados en la metodología ADMC basada en SIG: DL y FL.....	41
Figura 2-4.	Mapas de distribución espacial de los criterios utilizados en la metodología ADMC basada en SIG: IHT y P.....	41
Figura 2-5.	Mapas de distribución espacial de los criterios utilizados en la metodología ADMC basada en SIG: DD y FD.	42
Figura 2-6.	Mapas de distribución espacial de los criterios utilizados en la metodología ADMC basada en SIG: LT. Litología -LT.....	43
Figura 2-7.	Mapas de distribución espacial de los criterios utilizados en la metodología ADMC basada en SIG: AR y ILC	44
Figura 2.8.	Potencial de deformación del paisaje neotectónico en el Sistema Acuífero La Mojana	47
Figura 3-1.	Mapas de los parámetros analizados.....	63
Figura 4-1.	Área de investigación. Delimitación del Sistema Acuífero La Mojana	79
Figura 4-2.	Diseño metodológico	80
Figura 4-3.	Clasificación de los parámetros.....	83
Figura 4-4.	Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos en el Sistema Acuífero La Mojana	87
Figura 4-5.	a) Falla del San Jorge, b) Depósitos aluviales, y c) Formaciones Ciénaga de Oro, El Carmen y Betulia	87
Figura 5-1.	Hidrocarburos aromáticos policíclicos priorizados por la EPA, monitoreados en el presente estudio	93
Figura 5-2.	Sitios de monitoreo del estudio.....	97
Figura 5-3.	Concentración promedio y frecuencia de detección de HAPs en el agua de la región de La Mojana.....	99

Figura 5-4.	a) Porcentaje de contribución individual de cada HAPs en la sumatoria de HAPs para agua superficial y subterránea. b) Porcentaje de contribución de HAPs de 2-3, 4, 5 y 6 anillos en la sumatoria de HAPs para las diferentes épocas de muestreo en el agua subterránea y superficial.....	100
Figura 5-5.	Concentraciones de Σ HAPs y naftaleno.....	102
Figura 5-6.	Distribución espacial del promedio de la Σ HAPs en las 72 estaciones de monitoreo en los municipios de Majagual, Guaranda, Sucre, San Marcos, San Benito, La Unión y Caimito de la región de La Mojana.....	103
Figura 5-7.	Índice molecular.....	104
Figura 6-1.	Diseño metodológico.....	113
Figura 6-2.	Área de estudio.....	114
Figura 6-3.	Ciénagas de mayor interés del área de estudio.....	119
Figura 6-4.	Áreas húmedas periodo.....	121
Figura 6-5.	Plumas de sedimentos.....	123
Figura 7-1.	Variables morfométricas obtenidas de variedades comerciales y criollas del cultivo de <i>O. Sativa L.</i>	140
Figura 7-2.	Concentraciones de Hg).....	142
Figura 7-3.	a) valores de ingesta semanal estimada de Hg (ISHg).....	144

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.	Volúmenes de sedimentación estimados a partir de las diferentes aproximaciones de tasas de sedimentación	17
Tabla 2-1.	Asignación de pesos para los factores en la escala de 1 a 5	44
Tabla 2-2.	Normalización y promedio de los pesos de los factores	45
Tabla 2-3.	Pesos de las variables para evaluar la neotectónica en el Sistema Acuífero La Mojana	45
Tabla 2-4.	Tabla de reclasificación de los factores.....	46
Tabla 3-1.	Jerarquía de criterios según varios autores	55
Tabla 3-2.	Gradiente de la pendiente.....	58
Tabla 3-3.	Rangos asignados a los criterios evaluados.....	61
Tabla 3-4.	Frecuencia de uso de criterios en la literatura especializada	65
Tabla 3-5.	Resultados de la ponderación de parámetros	66
Tabla 3-6.	Porcentaje de área clasificada según el potencial de recarga hidrogeológica	67
Tabla 4-1.	Valoración de parámetros para el método DRASTIC+N	81
Tabla 4-2.	Categorías de vulnerabilidad para el método drastic.....	82
Tabla 5-1.	Hidrocarburos aromáticos policíclicos incluidos en el listado de sustancias carcinogénicas de la IARC	94
Tabla 5-2.	Estadístico H de Kruskal-Wallis para el comportamiento de los diferentes HAPs por época de muestreo. En la columna “Rango medio” letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$).....	101
Tabla 6-1.	Imágenes Landsat adquiridas.....	115
Tabla 6-2.	Eventos climatológicos de impacto considerable en La Mojana entre 1982-2022	115
Tabla 6-3.	Concentración de plumas de sedimentos en cuerpos de agua de acuerdo con el periodo analizado	125
Tabla 7-1.	Caracterización del suelo proveniente de Majagual empleado en el ensayo de potes	139
Tabla 7-2.	Biomasa seca, rendimiento de variedades criollas y comerciales de <i>O. sativa L.</i> cultivadas en suelos de La Mojana.....	140
Tabla 7-3.	Factores de bioconcentración y translocación de Hg estimados para las variedades criollas y comerciales de arroz en suelos de la región de La Mojana.....	144

PRESENTACIÓN

En este libro –*Elementos para la gestión del agua subterránea en el Sistema Acuífero La Mojana*– se tratan aspectos y temas clave en materia de gestión del recurso hídrico en la región de La Mojana, desarrollados desde la perspectiva de diversos profesionales que dominan la complejidad de los tópicos abordados. Es así como se describen las condiciones geológicas de la depresión momposina y de la región de La Mojana, se analizan las formaciones geológicas principales a nivel regional y local, y se superan las limitaciones de información.

En la misma línea, se examina el establecimiento y delimitación del Sistema Acuífero La Mojana y, a través de un análisis multitemporal de imágenes, se estudian las plumas de sedimentos y sitios de acumulación en las ciénagas, y su asociación con la deformación del paisaje neotectónico. También se realizó la delimitación de zonas de recarga integrando parámetros geomorfológicos, coberturas de suelos y climáticos, así como la demanda del recurso hidrogeológico a partir de las actividades económicas y de insumos del balance hídrico.

Finalmente, el lector encontrará la aplicación de los métodos GOD, SINTAC y DRASTIC, con ciertas modificaciones, en el estudio de la vulnerabilidad hidrogeológica y una descripción de las condiciones hidrogeoquímicas de 50 pozos de agua subterránea recolectadas en diferentes campañas de monitoreo; mientras que, el recurso hídrico superficial es examinado a partir del componente hidrobiológico y los índices de calidad ecológica. En adición, se aportan datos relevantes sobre el estado del agua destinada al consumo humano y su nivel de contaminación, como consecuencia de la presencia de compuestos emergentes e hidrocarburos.

PRÓLOGO

El agua subterránea no solo representa un recurso que ha sido poco explorado en Colombia, también es un recurso que diariamente se somete a presiones de las cuales, no se tienen claras las consecuencias en el corto y mediano plazo. Diariamente, incontables cantidades de agua del subsuelo son extraídas a la superficie para suplir las necesidades de comunidades enteras, rurales y urbanas, empresas, y hasta para producir la energía que llega a cientos de miles de hogares.

Tenemos la urgente necesidad de controlar y regular nuestro recurso hídrico. Colombia es uno de los países que cuenta con las mayores reservas de agua dulce en el mundo; no obstante, sufre los efectos del cambio climático y de eventos como los fenómenos de La Niña y El Niño, que desestabilizan el recurso hídrico, no solo superficial sino también el subterráneo.

La normatividad colombiana y las corporaciones autónomas regionales parecen ser el pilar fundamental de la organización alrededor del agua en Colombia, en cabeza del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Sin embargo, después de 15 años de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico con avances importantes para señalar, los retos del sector agua subterránea siguen siendo su delimitación, dinámica y conocimiento hidrogeológico.

Pese a que en el país existen avances importantes en el estudio de los acuíferos de algunas regiones, este no es el panorama general. En el caso de la región de La Mojana sucreña, los estudios son insuficientes, lo que ha impedido un mayor conocimiento del acuífero y, por tanto, repercute en su adecuada gestión.

La mayoría de los habitantes de esta zona se conectan a un pozo de agua subterránea, tanto en el área rural como en el área urbana. Hay una clara dependencia entre la supervivencia de las personas y el acceso al agua subterránea. Es tal la abundancia del agua subterránea percibida por las comunidades de la región de la Mojana sucreña, que algunos habitantes optan por hacer un pozo en el patio de su vivienda y, de esta manera, suplir sus necesidades respecto de este recurso.

También se identifica una gran cantidad de agua superficial en una parte importante de la región de La Mojana sucreña, pero los habitantes perciben este recurso de manera negativa, ya que se asocia a las inundaciones que genera el río Cauca. Este río —uno de los más importantes de Colombia— atraviesa parte de la región y arrastra consigo sedimentos de la minería de oro que se desarrolla en el Bajo Cauca antioqueño. Entre estos contaminantes se encuentran metales y metaloides tóxicos como el mercurio, el arsénico y el plomo, conocidos por sus efectos adversos en la salud del ser humano.

Algunos asuntos relevantes sobre el agua subterránea de La Mojana sucreña merecen la atención, sobre todo por el uso actual que las comunidades le dan a este recurso. Deben tenerse en cuenta los criterios de cantidad, disponibilidad y calidad; este último, depende de múltiples factores como los climáticos, morfológicos, geológicos y bióticos y, sobre todo, la existencia de un modelo hidrogeológico que dimensione las interacciones con el agua superficial y las recargas. Hasta ahora, este modelo ha sido levemente abordado.

En esta publicación se tratan aspectos y temas clave en materia de gestión del recurso hídrico en la región de La Mojana sucreña, desarrollados desde la perspectiva de un grupo de autores de diferentes disciplinas académicas, lo que garantiza una visión holística del acuífero.

En el capítulo 1 se realiza una descripción detallada del área de estudio a partir de elementos comunes de tipo geológico, geomorfológico e hidrológico, a través de una revisión bibliográfica; esto deja entrever las complejidades y particularidades de la depresión momposina. Los capítulos 2 y 4 exponen las herramientas utilizadas para estimar el potencial de deformación neotectónico y la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea; ambos apuntan a ofrecer más información sobre las condiciones y procesos hidrogeológicos presentes en este sistema acuífero. En el capítulo 3 se da cuenta sobre zonas potenciales de recarga del acuífero a partir de una serie de criterios que incluyen aspectos geográficos, geológicos, climatológicos, edáficos, algunos índices topográficos y variables hidrológicas; los resultados pueden contribuir a la planificación y la gestión del recurso hidrogeológico.

En el capítulo 5 se analiza la calidad del agua subterránea en términos de la presencia y los tipos de hidrocarburos aromáticos policíclicos, un grupo de compuestos orgánicos que podrían tener efectos adversos sobre la salud de las personas.

Por su parte, en el capítulo 6, a través de un análisis multitemporal de imágenes satelitales, se estudian las plumas de sedimentos y los sitios de acumulación de sedimentos en las ciénagas. Esta información es crucial para entender el comportamiento de cuerpos de agua superficial, la dinámica de los sólidos suspendidos y el transporte de sedimentos, variables que pueden afectar la calidad del agua subterránea y los procesos de recarga del acuífero.

Por último, en el capítulo 7 se analiza el componente suelo. Se comparten los resultados obtenidos mediante un ensayo controlado para determinar la absorción de un metal tóxico, como el mercurio, en uno de los cultivos más abundantes en la región de La Mojana: el arroz. Sin duda, este es un estudio relevante para esta zona pues se han encontrado trazas de mercurio en estos suelos como resultado de las inundaciones procedentes del río Cauca.

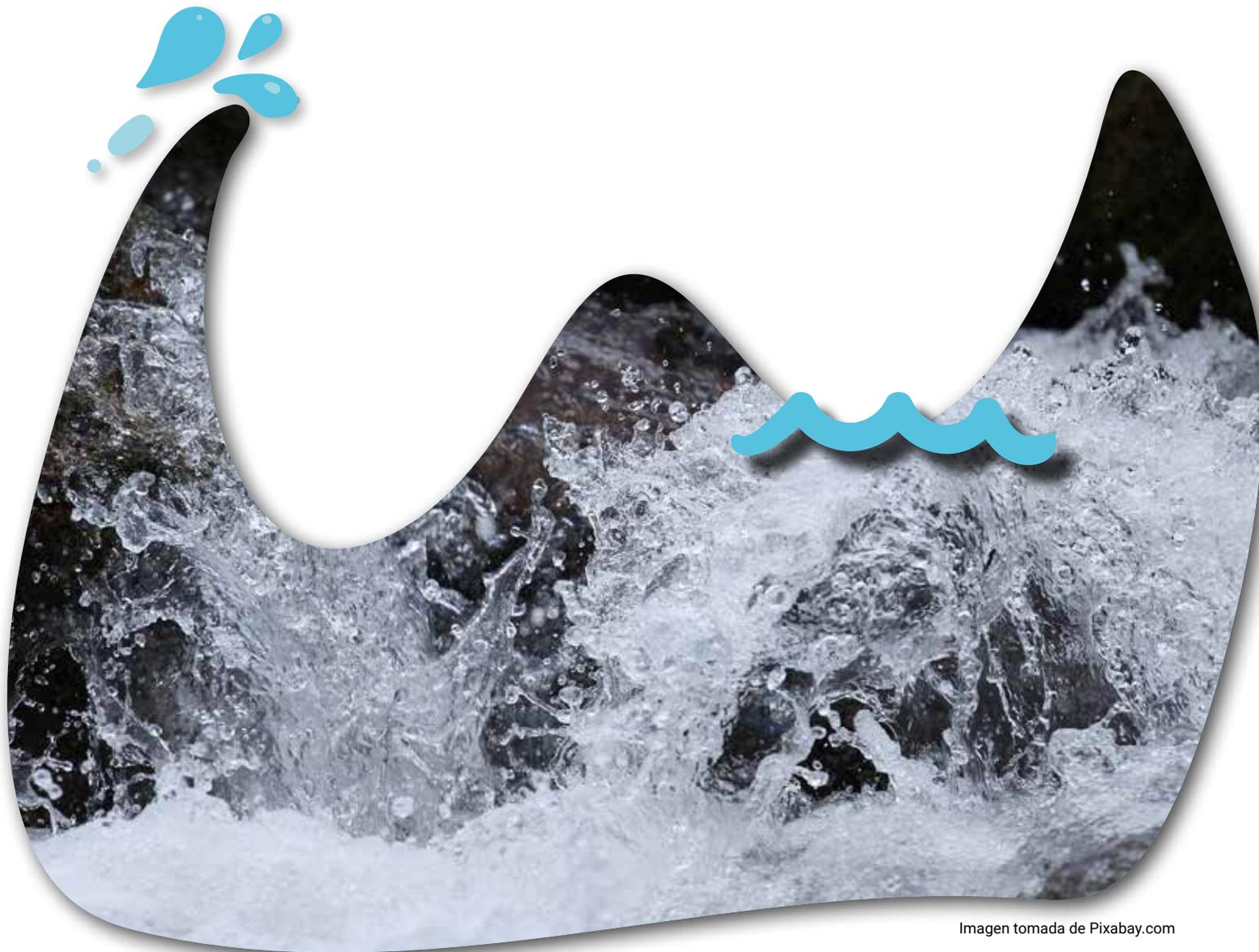


Imagen tomada de Pixabay.com

Capítulo 1

Introducción al sistema acuífero La Mojana

Introduction to La Mojana Aquifer System

Herrera-Arango, J.¹, Pérez-Peñate, A. K.¹, Rosso-Pinto, M. J.¹,
Marrugo-Negrete, J. L.¹, Paternina-Uribe, 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: jairo.herrera@geologist.com

Resumen

La inclusión de la cuenca baja del río Cesar, la ciénaga de Zapatosa y La Mojana como componentes de la depresión momposina no es aceptada por todos los autores; sin embargo, en este capítulo, se consideran elementos comunes de tipo geológico, geomorfológico e hidrológico, a partir de los cuales se delimita una misma unidad dinámica. Para estimar su extensión, se tienen en cuenta, además de las características de las grandes aglomeraciones de humedales y bajos inundables junto a los sistemas fluviales avulsivos, las alturas inferiores a los 30 metros sobre el nivel del mar enmarcadas dentro de los límites orientales, meridionales y occidentales para la cuenca baja del río Magdalena, y a las fronteras de la provincia geológica del Valle Inferior del Magdalena. Bajo estos mismos criterios, se propone, una demarcación de La Mojana, ubicada en la región sur del Brazo de Loba —que la separa de la unidad fisiográfica Isla Margarita—, entre el límite occidental de la llanura de inundación del río San Jorge al oeste, las estribaciones de la serranía de San Lucas al este y las serranías de Ayapel y Sacramento al sur. Para comprender los sistemas de recarga directa e indirecta del Sistema Acuífero La Mojana, se analizaron las principales unidades hidrogeomorfológicas: 1) el cono aluvial del río Cauca junto con los canales y ciénagas heredados de su evolución más reciente; 2) el abanico de Santiago; 3) la cuenca baja del río San Jorge y el complejo cenagoso asociado a esta; 4) el complejo cenagoso de Ayapel; 5) los sistemas fluviales anastomosados avulsivos y 6) el sector septentrional de La Mojana. Finalmente, se presentan algunas amenazas sufridas por el complejo cenagoso y paludal, debido al poco entendimiento sobre su función en la regulación hídrica y la recarga hidrogeológica a lo largo de la historia.

Palabras clave: cono aluvial, depresión momposina, regulación hídrica, sistemas anastomosados avulsivos, unidades hidrogeomorfológicas.

Introducción

La depresión momposina es un gran bajo topográfico dominado por procesos de subsidencia que se derivan de la alta sedimentación y la actividad tectónica que rige la provincia geológica del Valle Inferior del Magdalena. Geomorfológicamente, se considera un delta interior donde confluyen los ríos Magdalena, Cauca, Cesar y San Jorge en un ambiente de muy baja energía, que ha generado sistemas fluviales anastomosados avulsivos.

La inclusión de la cuenca baja del río Cesar, la ciénaga de Zapatosa y La Mojana como componentes de la depresión momposina no es aceptada por todos los autores, sin embargo, para la presente investigación se consideran elementos de una misma unidad dinámica que comparten características geomorfológicas, geológicas e hidrológicas.

Como parte de la investigación se delimitó la depresión momposina con base en los límites geológicos y los ambientes geomorfológicos, según los cuales ocupa una extensión de 14.437 km², distribuidos en los departamentos de Bolívar, Sucre, Magdalena, Córdoba, Cesar y Antioquia, en las regiones cenagosas e inundables asociadas a los brazos de Loba y Mompós del río Magdalena, del río Cauca y de las cuencas bajas de los ríos Cesar y San Jorge.

Por su parte, La Mojana es una extensa llanura aluvial comprendida entre la margen izquierda del río Cauca al sur, la llanura de inundación del río San Jorge al oeste, las estribaciones de la serranía de San Lucas al este y la margen izquierda del brazo de Loba del río Magdalena al norte, donde confluyen los ríos San Jorge y Cauca.

Al igual que para la depresión momposina, también se propone una delimitación de La Mojana desde los criterios descritos anteriormente y estableciendo como frontera norte los diques marginales o albardones de la margen izquierda del Brazo de Loba, que la separan de la isla Margarita. Esta última, considerada la isla aluvial más extensa del país y comprendida entre los brazos de Loba y Mompós. La extensión

determinada de esta manera fue de 9.097 km², distribuidos entre los departamentos de Sucre, Bolívar, Córdoba y Antioquia.

Como parte del análisis requerido para comprender los sistemas de recarga directa e indirecta del Sistema Acuífero La Mojana, se analizaron sus principales ambientes geomorfológicos: 1) como aluvial del río Cauca y las roturas del dique marginal de este mismo río, que generan los principales sistemas fluviales internos de la región; 2) abanico de Santiago y su relación con el control de un tramo de 17 km del río San Jorge y el caño Grande de Santiago, entre las ciénagas de La Villa y Santiago; 3) la cuenca baja del río San Jorge con sus ciénagas asociadas; 4) los sistemas fluviales anastomosados avulsivos que dominan La Mojana y 5) el sector septentrional de La Mojana donde se produce el mayor taponamiento hidráulico.

Finalmente, se presentan algunas amenazas del complejo cenagoso y paludal de La Mojana, generadas como consecuencia del poco entendimiento sobre su importante función en la regulación hídrica y la recarga hidrogeológica durante la formulación de proyectos, programas y normas.

Cuenca baja del río Magdalena

La cuenca baja del río Magdalena está ubicada en los sectores sur y centro de la región Caribe; ocupa una extensión aproximada de 105.250 km² (1) que abarca desde la Sierra Nevada de Santa Marta al norte, las serranías de Perijá y San Lucas al oriente, las serranías de Ayapel y Sacramento al sur y las serranías de San Jerónimo y San Jacinto (Montes de María) al occidente, como se muestra en **Figura 1-1**.

Figura 1-1. Cuenca baja del río Magdalena



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

El tramo del río Magdalena en este sector, con 438 km de longitud y una pendiente media de 0,075 m/km, está comprendido entre El Banco Magdalena y su desembocadura principal en Bocas de Ceniza en Barranquilla, donde forma un delta arqueado de 1.690 km², y desembocaduras secundarias en la bahía de Cartagena a través del canal del Dique; el canal corresponde a un antiguo curso del río de 115 km de longitud que fue rehabilitado durante el período colonial y, finalmente, a través de una red compleja de conexiones menores en la ciénaga Grande de Santa Marta (1–3).

La principal característica geomorfológica de este tramo son los tres grandes complejos fluvio-lacustres que sirven como reguladores hídricos: la Ciénaga Grande de Santa Marta al norte, el circuito de humedales del Canal del Dique al oeste y la depresión momposina al sur.

Depresión momposina

Las características especiales de esta depresión, tales como ser el área de amortiguamiento hídrico de los ríos Magdalena, Cauca, Cesar y San Jorge, contener un gran complejo cenagoso y paludal, mostrar altas tasas de sedimentación y subsidencia, y presentar sistemas fluviales anastomosados avulsivos, entre otros, han despertado el interés científico, lo que ha dado lugar a múltiples estudios, en particular desde la década de los setenta del siglo pasado.

La hidrografía de la región está caracterizada por las descargas del río Magdalena y sus brazos Loba y Mompós, su principal tributario —el río Cauca— y los ríos San Jorge y Cesar; esto configura un complejo sistema de cientos de ciénagas que conforman un gran reservorio natural que absorbe los caudales pico de estas corrientes hídricas (4).

Esta región de transición hidrológica entre la región Andina y las llanuras del Caribe ha sido considerada por algunos autores como una de las zonas de humedales más grandes de América (5,6) e incluso del mundo (7).

A pesar de la reconocida importancia de esta región, no existe consenso sobre su extensión y, por lo tanto, sobre los municipios que la conforman. El área reportada varía según el autor, así: 3.200 km² (8), 4.760 km² (9), 6.000 km² (10), 10.000 km² (5,11); 13.157 km² (12) y 24.650 km² (13).

Con el objetivo de estimar la dimensión del área ocupada por la depresión momposina, en este trabajo se propone considerar, además de las características de las grandes aglomeraciones de humedales y bajos inundables junto a los sistemas fluviales avulsivos, las alturas inferiores a los 30 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.) enmarcadas dentro de los límites orientales, meridionales y occidentales indicados anteriormente para la cuenca baja del río Magdalena, y a las fronteras de la provincia geológica del Valle Inferior del Magdalena.

De esta forma, a partir del modelo digital de elevación (MDE), derivado de la misión topográfica de radar (SRTM por sus siglas en inglés), portada por el transbordador espacial Endeavour (14), se extrajeron las áreas con alturas inferiores a los 30 m s. n. m. Estas áreas están comprendidas entre la zona de influencia de la ciénaga de Zapatosa en Tamalameque, Cesar, y la confluencia de los brazos de Loba y Mompós, al sur del corregimiento de Tacamocho en el municipio de Córdoba, departamento de Bolívar, donde el Magdalena retoma su condición de río monocanal (15).

La inclusión de la cuenca baja del río Cesar y de La Mojana como componentes de la depresión momposina no es aceptada por todos los autores, por lo que en algunas publicaciones se presenta restringida exclusivamente al corredor del Magdalena, entre los municipios de El Banco y Magangué (16), en lo que algunos autores han denominado el cinturón de Mompós (17,18). Sin embargo, durante el análisis realizado en esta investigación no se hallaron razones geomorfológicas, geológicas o hidráulicas que puedan sustentar tal exclusión.

En consecuencia, en este trabajo se define la depresión momposina como la región de almacenamiento hídrico temporal, ubicada bajo los 30 m s. n. m en las áreas de influencia de los ríos Magdalena, entre los municipios de El Banco en Magdalena y Mangangué en Bolívar; Cauca, entre Nechí en Antioquia y Pinillos en Bolívar; San Jorge, entre Ayapel, Córdoba y Magangué, Bolívar; y Cesar, desde Chiriguaná, hasta la ciénaga de Zapatosa en los municipios de Chimichagua y Tamalameque en el departamento de Cesar.

Esta delimitación da como resultado un área de 14.437 km² distribuidos en 44 municipios pertenecientes a los departamentos: Bolívar (41,4 %), Sucre (32,1 %), Magdalena (10,4 %), Córdoba (10,2 %), Cesar (5,5 %) y Antioquia (0,4 %).

Al comparar la extensión obtenida para la depresión momposina con el listado de humedales de importancia internacional, publicado por Ramsar en el 2023 (19), se observa que este ocuparía el décimo primer puesto en América y el trigésimo primero en el mundo.

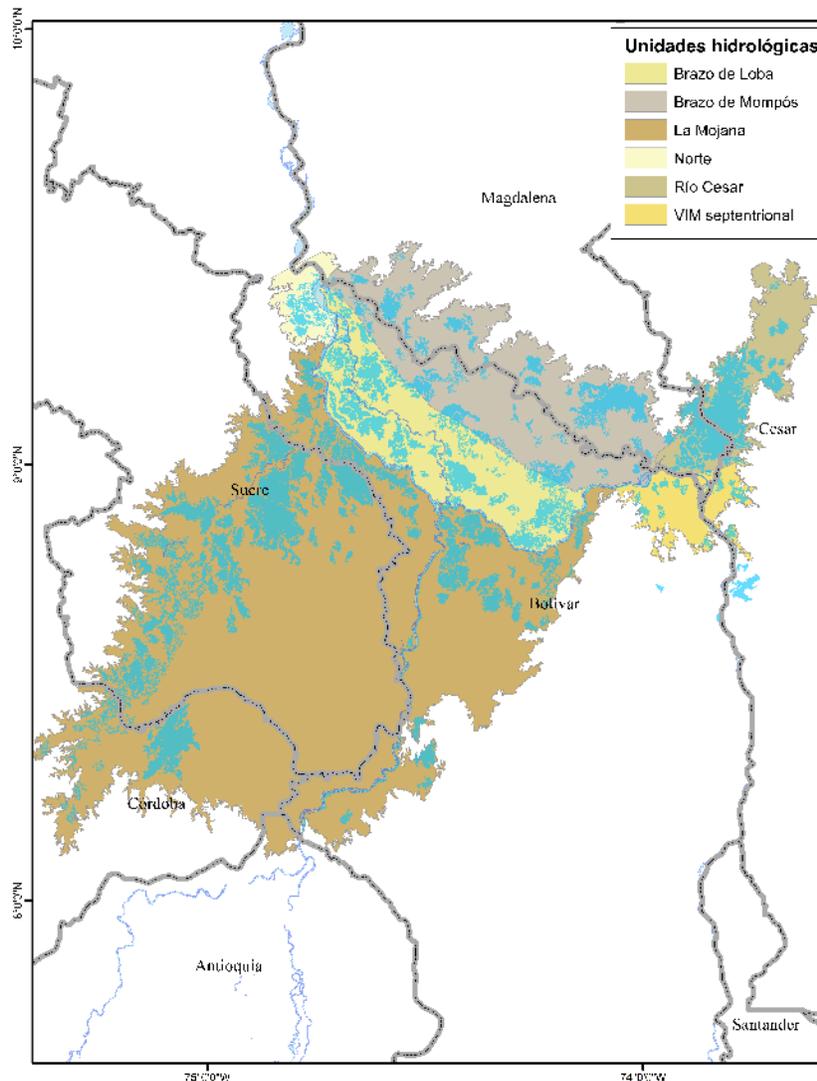
También se estableció que hay 1.302 áreas inundables entre ciénagas, bacines y planos anegadizos con superficies mayores a 0,5 km², que en conjunto suman 4.039 km², es decir, el 28 % del área total de esta depresión. Existen 88 áreas inundables mayores a 7 km² que ocupan 2.546 km², una extensión similar a los 2.596 km² reportados por IDEAM y Cormagdalena en el año 2001 (20) para las ciénagas de la depresión Momposina. Finalmente, el 4,3 % (61) supera los 10 km² y ocupa 2.321 km² (536 %).

Como se muestran en la **Figura 1-2**, las unidades hidrológicas que conforman la depresión momposina son: 1) cuenca baja del río Cesar y ciénaga de Zapatosa; 2) la isla Margarita, entre los brazos de Loba y Mompós; 3) La Mojana; 4) bajo Cauca y 5) extremo septentrional del valle medio del Magdalena (7).

Procesos de sedimentación

Los análisis de la concentración de sedimentos a partir de los registros históricos muestran que la carga de sólidos del río Magdalena en cercanías de la desembocadura del río Cauca es de 60,3 Mm³, de los cuales el 66 % es aportado por el primero y el 34 % restante por el segundo; no obstante, en el municipio de Calamar, desde donde parte el Canal del Dique, el registro de transporte de sedimentos muestra un promedio anual de 52,4 Mm³, lo que revela que aproximadamente el 13,1 % de la carga, equivalente a 15,9 Mt, queda retenida en las áreas de influencia de los brazos de Loba y Mompós (20).

Figura 1-2. Unidades hidrológicas de la depresión momposina



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

A partir de modelos conceptuales de transporte de sedimentos, basados en que el 16 % del flujo total anual de sedimentos del río Magdalena se deposita en las planicies aluviales de la depresión momposina, Restrepo *et al.* 2020 estiman que la tasa anual de sedimentación en esta zona oscila entre 20 Mt y 80 Mt (21).

Otros autores han realizado diferentes cuantificaciones de las tasas anuales de sedimentación en la depresión momposina para los últimos 1.500 a 11.000 años. Para HIMAT, en 1977, la tasa anual de sedimentación varía entre 1,8 mm y 2,5 mm (5); para Martínez, en 1981, entre 3 mm y 4,5 mm durante los últimos 1.500 años (22); para Van der Hammen, en 1986, entre 2,1 mm y 3 mm para los últimos once mil años (23); para Smith, en 1986, es de 4,54 mm para los últimos 2.500 años (24).

A partir de las tasas anuales de sedimentación estimadas, la extensión de las áreas inundables obtenidas (4.039 km²), y considerando una densidad para arcillas húmedas de 2,1 t/m³, es posible aproximar un volumen anual de sedimentos depositados en la depresión momposina, como se muestra en la **Tabla 1-1**.

Tabla 1-1. Volúmenes de sedimentación estimados a partir de las diferentes aproximaciones de tasas de sedimentación

Autor	Período	Tasa de sedimentación [mm/año]	Volumen de sedimentación [t/año]
Himat (1977)	-	1,8 – 2,5	15,3 – 21,2
Martínez (1981)	Últimos 11.000 años	2,1 – 3,0	25,5 – 38,2
Van der Hammen (1986)	Últimos 11.000 años	2,1 – 3,0	17,8 – 25,5
Smith (1986)	Últimos 2.500 años	4,54	38,5

Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361 a partir de HIMAT (1977), Martínez (1981), Van der Hammen (1986) y Smith (1986).

Tasas de subsidencia

En respuesta a las altas tasas de sedimentación en esta región, se presenta un continuo proceso de subsidencia producido por la interacción entre el peso de los sedimentos y la actividad de las fallas presentes en la zona (1,5,22–24).

El HIMAT (1977) determinó, a partir de dataciones por radiocarbono, que este hundimiento ocurre a una tasa anual que varía entre 1,8 mm y 2,5 mm. Por su parte, Van der Hammen (1986), mediante análisis palinológicos, propuso que dichas tasas muestran un rango un poco superior entre 2,1 mm y 3 mm; esto determina, además, que al menos los cincuenta metros más superficiales del aluvión fueron depositados durante los últimos once mil años (5,23).

Delta interior

Los deltas son ambientes geomorfológicos resultantes de la desaceleración del flujo aluvial y el consecuente depósito de sedimentos, registrado durante el ingreso de un río a un cuerpo de agua (25,26). Son depósitos sedimentarios generados por la descarga de sedimentos en suspensión y de fondo, la interacción energética entre el río y el cuerpo de agua receptor, y el espacio de acomodación de los sedimentos (27).

Empero, puede ocurrir que, en una zona plana, por exceso de sedimentos, el río se divida en múltiples brazos para unirse nuevamente al final del tramo, lo que configura lo que se conoce como un delta interior. Una variante de este tipo de delta corresponde a la confluencia de varios ríos en un fondo de valle semi-cerrado que da lugar a humedales y canales secundarios (28,29).

La primera descripción de un delta interior con estas últimas características fue utilizada por Alexander von Humboldt (1851). Con base en esta denominación, describió el ambiente geomorfológico del río Orinoco entre los ríos Arauca y Apure, el cual comparó posteriormente con las condiciones de la depresión momposina que había recorrido en el año 1801 (30).

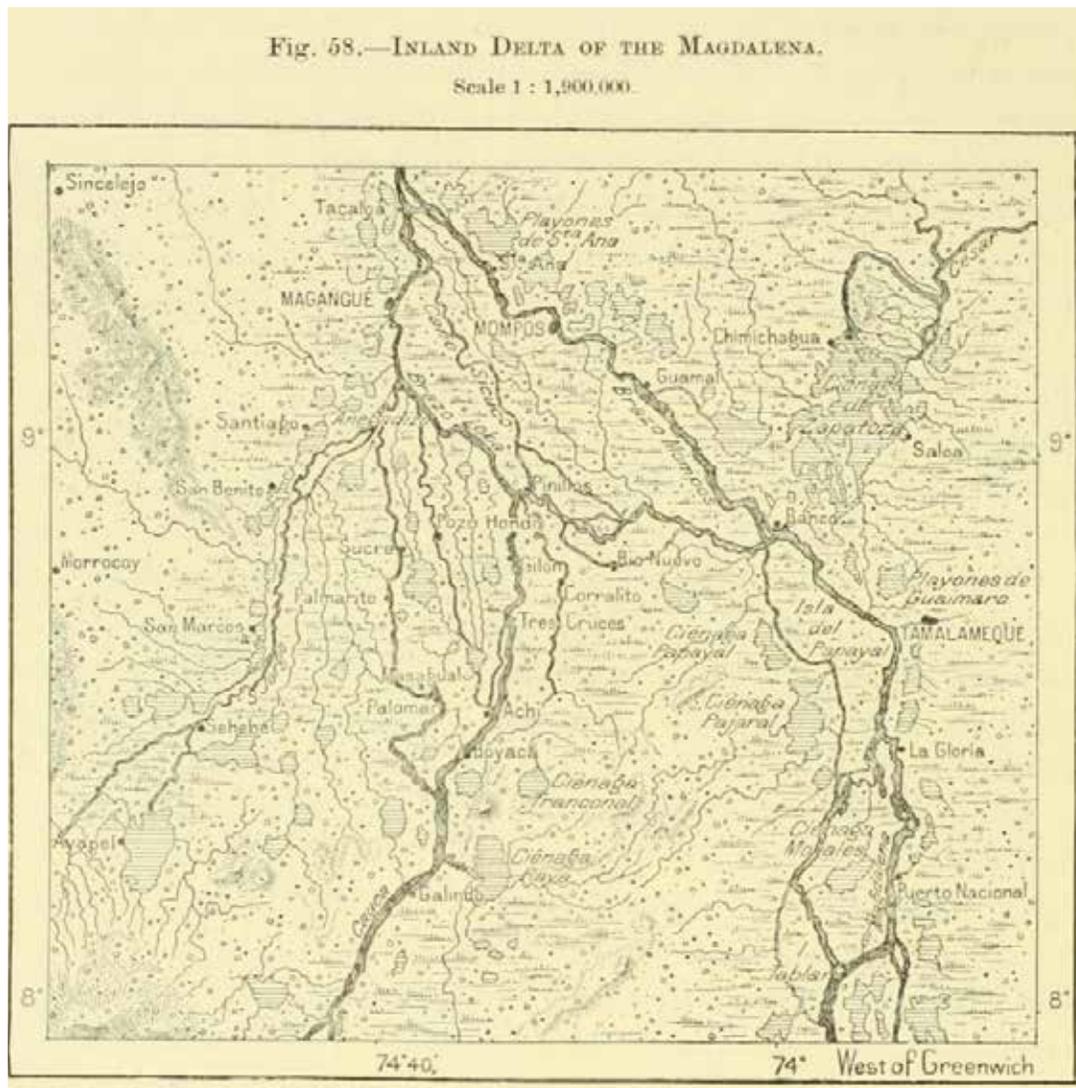
Aunque suele citarse al Proyecto Colombo Holandés (HIMAT, 1977) como el autor de la descripción del delta interior de la depresión momposina, dicha condición ya se había identificado durante las intervenciones sobre el Brazo de Loba en la primera mitad del siglo XIX, que buscaban preservar el Brazo de Mompós como el canal principal del río Magdalena. Estos esfuerzos resultaron inútiles a partir de 1868, cuando el primero se convirtió en el cauce principal debido a la agradación del lecho del segundo. Así lo describe Reclus en 1894: “en la confluencia del río Nechí con el Cauca, comienza una zona pantanosa de canales y remansos laberínticos que forman el delta interior de los ríos Magdalena, Cauca, San Jorge y Cesar” (31) (**Figura 1-3**).

Región La Mojana

Corresponde a la región de la depresión momposina ubicada al sur del Brazo de Loba, entre el límite occidental de la llanura de inundación del río San Jorge al oeste, las estribaciones de la serranía de San Lucas al este y las serranías de Ayapel y Sacramento al sur. Con base en estos límites, se estimó el área de La Mojana en 9.097 km², distribuidos entre los departamentos de Sucre (50,9 %); Bolívar (32,2 %); Córdoba (16,2 %) y Antioquia (0,7 %).

La jurisdicción total o parcial de veintidós municipios conforman La Mojana (**Figura 1-4**), así: Nechí en Antioquia; Barranco de Loba, Montecristo, Altos del Rosario, Tiquisio, Pinillos, San Jacinto del Cauca, Magangué y Achí en Bolívar; La Apartada, Planeta Rica, Buenavista, Pueblo Nuevo y Ayapel en Córdoba; La Unión, Galeras, Caimito, Guaranda, San Marcos, Majagual, Sucre y San Benito Abad en Sucre.

Figura 1-3. Mapa del delta interior del Magdalena

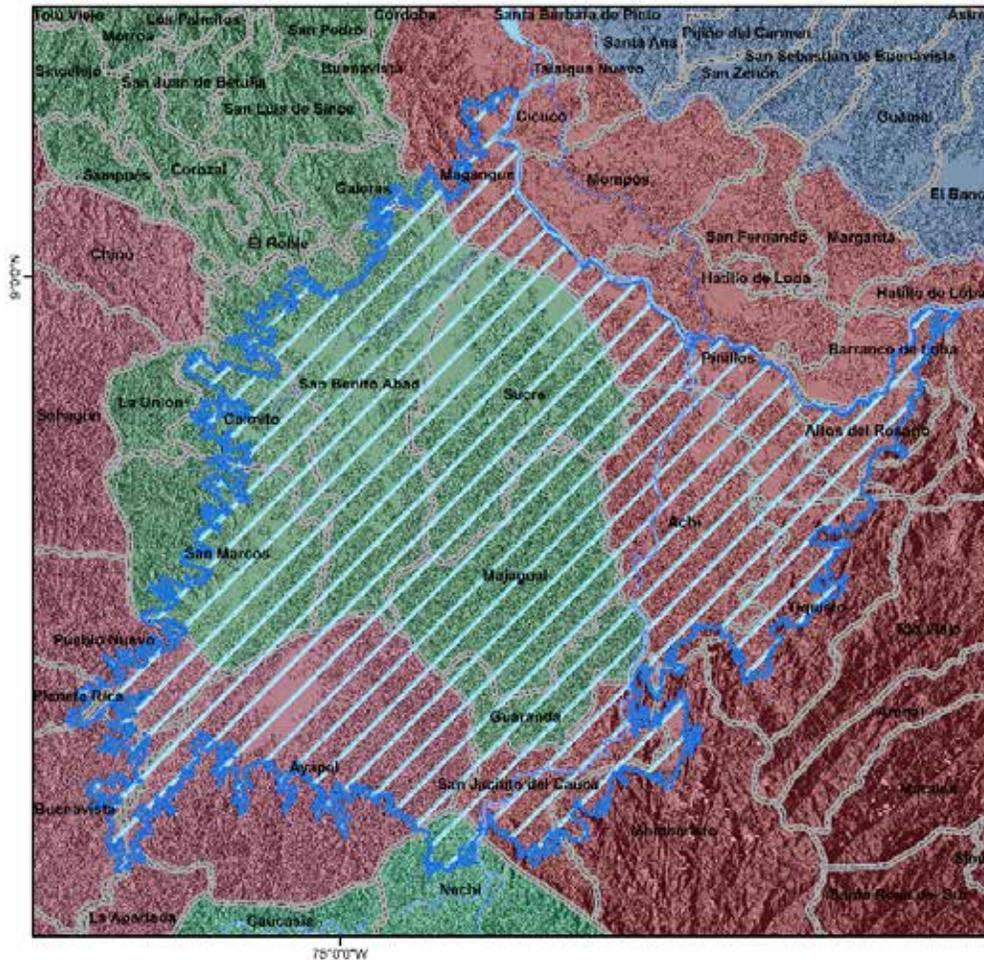


Fuente: Reclus (1894) (31).

La región de La Mojana es de alta complejidad hidrológica debido a su riqueza en ecosistemas acuáticos que incluye sistemas lóticos, ambientes lénticos compuestos por ciénagas y zapales, cuerpos de agua permanentes a lo largo del año, o temporales que se activan solo durante los períodos de inundación, y otros que varían entre lénticos y lóticos según la época hidrológica (32).

En el sistema hídrico de La Mojana, cada cuerpo de agua es un elemento de almacenamiento que está interrelacionado mediante canales bidireccionales o por vía subterránea con otras ciénagas o con los ríos, de esta forma recibe aportes netos desde otros elementos y está sujeto a evaporación y a transpiración superficial, al tiempo que recibe la precipitación sobre el espejo de agua. Los intercambios hídricos están en función de las diferencias de nivel entre los cuerpos de agua y su variación, así como de las características hidráulicas de los canales (33).

Figura 1-4. Mapa de distribución de municipios en La Mojana



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

En La Mojana se forman planos de inundación adyacentes a las ciénagas, que están sometidas a inundaciones periódicas durante las épocas de invierno; esto facilita la acumulación de sedimentos de diversos tamaños, principalmente materiales finos, provenientes de las terrazas y colinas periféricas (34).

De esta manera, el complejo sistema hídrico, encaja dentro de la definición fijada en el Artículo 1 de la Convención de Ramsar de 1971 (35), adoptada por Minambiente en el año 2001 (36),

(...) son humedales aquellas extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros (p. 13).

Características fisicoquímicas de las aguas

Desde el punto de vista fisicoquímico existen dos tipos de aguas en La Mojana, según la influencia del río Cauca (37):

Aguas de tipo mineral: se trata de caños y ciénagas con aguas de color blanco por el alto contenido de sedimentos en suspensión debido a los aportes del río Cauca. Son aguas mineralizadas y, por lo tanto, con mayor conductividad eléctrica y tendencia a la basicidad. Los principales caños con esta característica son: Muñoz, San Matías, Rabón y Viloría; ciénagas Candelaria y San Francisco.

Aguas dominadas por reacciones orgánicas: correspondientes a los caños y las ciénagas con menor interacción con los grandes ríos y mayor influencia del río San Jorge. Son aguas de color ámbar oscuro (negra en imágenes satelitales), debido al poco contenido de sedimentos suspendidos y al alto contenido de compuestos orgánicos disueltos como taninos y ácidos húmicos y fúlvicos, que permiten una mayor degradación de la materia orgánica. Tienen alta concentración de nitrógeno total, pH tendiente a ácido, bajas concentraciones de fósforo y sólidos en general. Los principales caños con estas aguas son Pescado, Barro, Gil, Ventanillas, Los Patos y Río Frío, mientras que las ciénagas son Tomala, San Cayetano y Los Suanes.

Principales ambientes geomorfológicos

En general, La Mojana corresponde a una planicie aluvial de relieve plano, que está sometida a inundaciones y encharcamientos periódicos asociados con los desbordamientos de ríos y caños; de ahí que se constituye en un importante sistema regulador de las corrientes fluviales aguas abajo de la depresión momposina (33).

Las principales unidades hidrogeomorfológicas de La Mojana son: 1) el cono aluvial del río Cauca, junto con los canales y ciénagas heredados de su evolución más reciente; 2) el abanico de Santiago; 3) la cuenca baja del río San Jorge y el complejo cenagoso asociado a esta; 4) el complejo cenagoso de Ayapel; 5) los sistemas fluviales anastomosados avulsivos y 6) el sector septentrional con alturas muy inferiores al nivel de los albardones del Magdalena.

Cono aluvial del río Cauca

Definido por Martínez en 1981 como un depósito sedimentario con relieve plano-convexo, con una diferencia altitudinal de 14 m entre Nechí en Antioquia y Pinillos en Bolívar (22), de 100 km de largo y 75 km de ancho, medidos entre los corregimientos de Caimital en el municipio de San Jacinto del Cauca (Bolívar) y Cecilia en el municipio de Ayapel (Antioquia); ocupa el 90 % de La Mojana. Según este autor, los bordes del cono constituyen la zona menos inclinada, aproximadamente 0,15 cm/km, y terminan contra la depresión cenagosa del Magdalena y el San Jorge, lo cual produce las extensas áreas inundables por desbordamiento de estos ríos.

Posteriormente, González *et al.* (2015) lo denominan abanico aluvial de La Mojana, describiendo su expresión geomorfológica como de relieve muy bajo, levemente ondulado, laderas planas a suavemente inclinadas y redondeadas (38–40).

Con base en el modelo digital de elevación (MDE) con resolución de 5 m, obtenido por el Fondo Adaptación del año 2016 (41) a partir de tecnología de detección y medición de luz —Laser Imaging, Detection, and Rangin (LIDAR)—, batimetrías y aforos con sistemas perfiladores de corrientes acústico *doppler* (ADCP) (42), se determinó una longitud de 122 km entre la zona de desbordamientos del Cauca, aguas arriba de la inspección de policía de Colorado en Nechí y el corregimiento de El Retiro en Magangué, donde se encuentra la desembocadura del río San Jorge, con una diferencia de altura entre ambos centros poblados de 29,5 m.

Según González *et al.* (2015) (38), este abanico, compuesto por sedimentos de arenas finas, limos y arcillas, se depositó sobre la Formación Betulia y está cubierto por los sedimentos de los depósitos fluvio-lacustres. Adicionalmente, estos autores argumentan que el sistema de drenaje trenzado de sinuoso a meándrico, indica un origen fluvial de condiciones de depósito de flujo hiperconcentrado.

Los depósitos fluviales de canal, definidos por González *et al.* (2015) (38), corresponden a materiales detríticos entregados por las quebradas y los caños; estos representan áreas con morfologías planas y, en su mayoría, están compuestos por arenas cuarzosas finas a muy finas, arcillosas y por arcillas limosas con fragmentos de grava menores a 5 mm.

Por su parte, Mantilla *et al.* (2006) (43) definen los depósitos fluviolacustres de La Mojana como aquellos cubiertos por lagos, lagunas y ciénagas, algunas de estas bordeadas por materiales recientes de terrazas de playa que las separan de las zonas de aporte fluvial, así como también aquellos asociados a deltas y paleodeltas de antiguas corrientes de agua que desembocaban en las zonas lacustres. Estos depósitos están compuestos fundamentalmente por arcillas con alto contenido de materia orgánica, lodos, arenas finas y paleosuelo que reposan sobre la Formación Betulia, el cono aluvial del río Cauca, el Abanico de Santiago y la llanura de inundación (38-40,43).

Los perfiles realizados por González *et al.* (2015) (38), mediante perforaciones de poca profundidad, indican espesores variables entre 0,63 m y 1,30 m, aproximadamente, presentan abundante materia orgánica y un alto grado de humedad.

Los espejos de agua ubicados al norte del abanico son de gran tamaño, con gran cobertura de macrófitas que, en algunos casos, alcanza hasta el 99 % del espejo de agua, como las ciénagas de San Cayetano, Zapata, del Medio y Chuirá, y algunos cinturones de mangle en sus orillas. La construcción de terraplenes a orillas del caño Mojana obstruye la interconexión entre el caño y las ciénagas (32).

Los principales caños son Mojana y Misalo, Corredor y Ventanillas, caño Balina (ciénaga de San Cayetano), El Chorro y Tortuga (ciénaga de Zapata). Los caños Rabón y El Humo en Guaranda están perdidos (secos y llenos de vegetación). En cuanto a las ciénagas representativas, se tienen: Galindo, Iguana, Balanta, San Cayetano, Zapata, Mojanita, Chuirá, del Medio y La Sierpe.

Sobre el extremo meridional de este gran cono aluvial se presentan roturas en el dique marginal izquierdo del río Cauca, conocidos localmente como rompederos o chorros; los más activos en la última década son los de Santa Anita, Mundo Nuevo y Caregato.

Aunque las roturas ocurren en diferentes tramos del río Cauca, existen evidencias geomorfológicas observables en el modelo digital de elevación a 5 m analizado, de que la persistencia de algunas a lo largo de la evolución del cono aluvial ha originado los principales sistemas fluviales internos de La Mojana.

Rompedero de San Anita. Ubicado en jurisdicción de la inspección de policía de Colorado, en el municipio de Nechí, aproximadamente 12 km aguas abajo de la confluencia del río del mismo nombre en el Cauca. Este rompimiento se constituye en la cabecera de la quebrada Aguas Claras, afluente del complejo cenagoso de Ayapel después de registrar un giro de 90° hacia el oeste.

Rompedero de Mundo Nuevo. Se presenta aproximadamente a 7 km aguas arriba de la desembocadura del río Nechí, en límites del municipio del mismo nombre con San Jacinto del Cauca, donde se muestran las cabeceras del caño Matías al oeste y uno de sus principales canales de avulsión, el caño Rabón; mientras que hacia el este se encuentra el caño Moja Escopetas, que da origen a caño Ventanillas, afluente del caño Mojana.

Rompederos de Guaranda. En los alrededores del casco urbano de Guaranda se observan evidencias de roturas que originaron los caños de Mojana Viejo, al sur de Guaranda; de Mojana 8 km aguas abajo de Guaranda en el rompedero la Boca del Cura y de Pancegüita al norte.

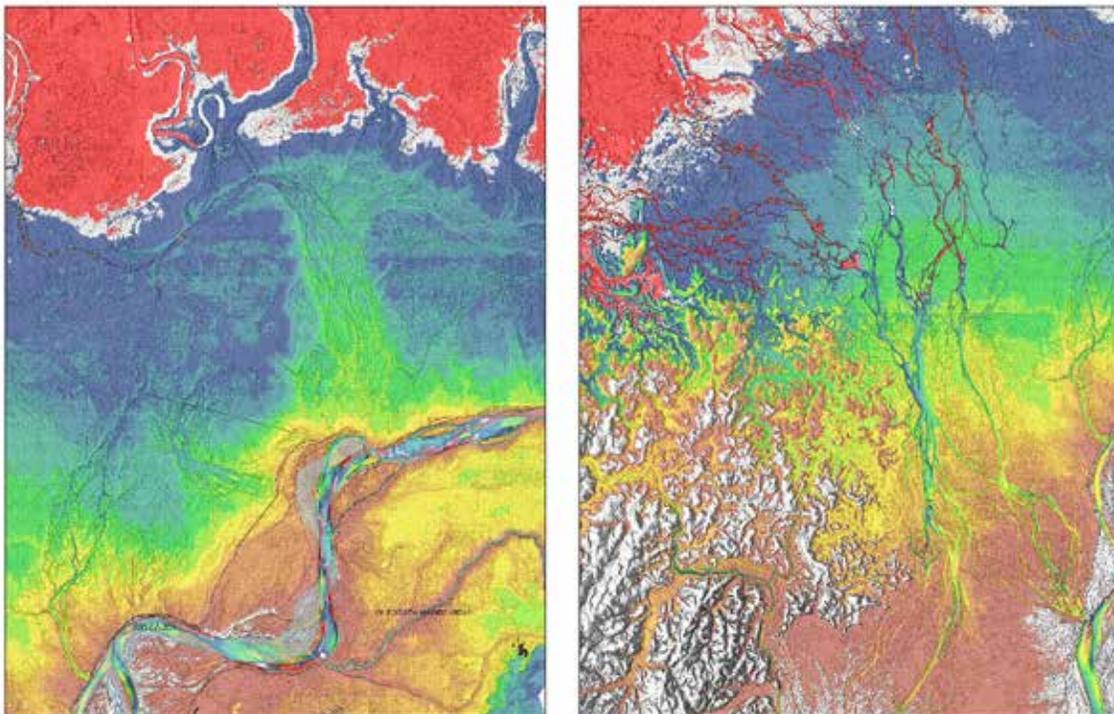
Rompedero de Caimital. Se observan huellas antiguas de este rompedero localizado un kilómetro aguas arriba del corregimiento de Caimital, en el municipio de San Jacinto del Cauca; se constituye en la cabecera de los caños Gramalote y Hondo, afluentes del caño Ventanillas.

Los dos sistemas fluviales originados por las roturas del dique del río Cauca en jurisdicción del municipio de Nechí están interconectados por los canales derivados de procesos avulsivos y se constituyen en el principal mecanismo de entrada de aguas ricas en sedimentos al sistema cenagoso del San Jorge (Figura 1 - 5).

Rompedero Caregato. Está localizado al oeste de la inspección de policía de San Jacinto de Achí, en el municipio de San Jacinto del Cauca, aproximadamente 17 km aguas abajo de la desembocadura del río Nechí. El ancho de esta rotura es de aproximadamente 1,1 km, medido sobre el modelo de elevación digital.

Abanico de Santiago. Este abanico, definido por Ochoa et al. (2016) (44) y cuyo ápice se ubica en cercanías al corregimiento de Tierra Santa, cubre un área de 252 km² expandiéndose hacia el sureste. Su morfología es plana, levemente inclinada hacia el río San Jorge al sureste, con numerosas zonas pantanosas y una red de drenaje subparalela – radial, donde las principales corrientes son los arroyos Cundoso, Grande de Corozal, Algarrobo, La Palmita y El Cedro.

Figura 1-5. Sistemas fluviales avulsivos en los abanicos de desbordamiento generados por los rompederos (chorros) del río Cauca en el Abanico Aluvial de La Mojana. a) Nuevo Mundo y Santa Anita, entre Nechí y San Jacinto; b) Caregato en San Jacinto del Cauca



Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361 a partir del MDE de 5 mm.

Este abanico, sedimentológicamente está caracterizado por lodos de grano muy fino a medio, con granos angulares a subredondeados, ocasionalmente subesféricos, compuestos por cuarzo (98 %), líticos rojos

(1 %) y líticos negros (1 %). También presenta arcillas limosas, con espesor de 0,70 m. En zonas secas aparecen arcillas limosas con muy bajo contenido de gravas (38).

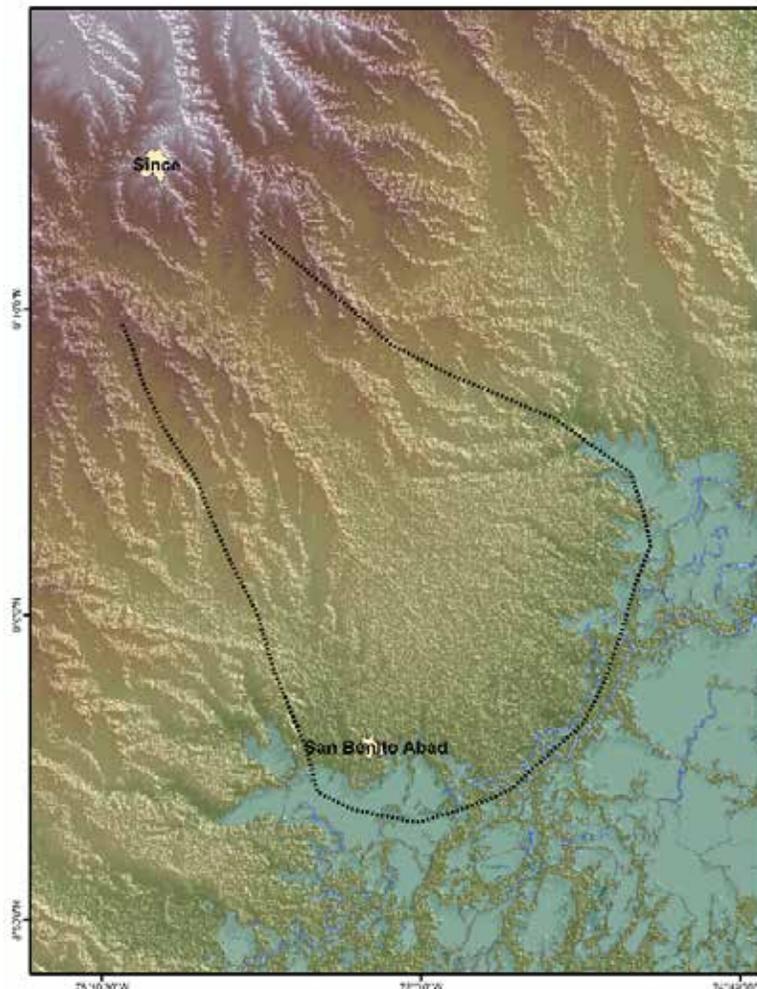
Hacia el noroeste se depositó sobre la Formación Betulia y hacia el sureste sobre el abanico aluvial de La Mojana; en ambos casos está cubierto por los depósitos aluviales y fluviales de canal, y se encuentra interdigitado con los depósitos fluviolacustres (38,44).

Una de las expresiones geomorfológicas más llamativas de este abanico es que su borde inferior, ubicado entre las ciénagas La Villa (Machado) y Cabeza de Vaca al sur y Santiago al norte, curva hacia el sureste al río San Jorge y al caño Grande de Santiago, una corriente tipo Yazoo que discurre paralela al primero a lo largo de 17 km entre las ciénagas mencionadas (**Figura 1-6**).

Cuenca baja del río San Jorge. Los sistemas fluviales que alimentan las inundaciones anuales en toda La Mojana son el Brazo de Loba del río Magdalena al norte, el río San Jorge al oeste y el río Cauca al sur y al este; a estos se suma una intrincada red interconectada de canales y ciénagas. Esta red hace que el bajo San Jorge se constituya en la mayor trampa de sedimentos de toda la depresión momposina (22,45).

La dinámica de las llanuras de inundación está regida por el intercambio de agua entre el río y las ciénagas y viceversa; las inundaciones periódicas se consideran la fuente principal de la diversidad del sistema.

Figura 1-6. Abanico de Santiago. Nótese la curvatura del río San Jorge y el caño Grande de Santiago hacia el sureste



Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361 a partir del MDE SRTM.

Dentro de esta cuenca baja existen subambientes como el complejo cenagoso de Ayapel y los canales que la alimentan, entre ellos el río San Jorge y los caños Muñoz, Barro, Grande y Marralú, el cual se contrae hasta los 20 km² en períodos de máxima sequía y se expande hasta los 140 km² durante inundaciones extremas (46).

Se han registrado las variaciones en el aporte hídrico hacia las ciénagas entre los períodos de aguas altas y de aguas bajas, al igual que la pérdida total de los límites que las separan de otras durante las épocas de invierno (47). Un caso extremo fue el registrado en la llamada Ola Invernal 2010-2011, cuando el 72 % de La Mojana quedó sumergida y todas las ciénagas formaron un gran lago de 6.568,6 km² (48).

Sistemas anastomosados avulsivos

Los patrones multicanal de La Mojana han sido desencadenados por mecanismos de avulsión, mientras que las llanuras aluviales de acreción vertical han resultado de los desbordamientos periódicos de los ríos y caños (6).

Latrubesse (2015) identifica el río Magdalena en la depresión momposina como el sistema avulsivo anastomosado más extenso del norte de los Andes. La presente investigación revela que este tipo de sistema es particularmente evidente en los sectores central y oriental de la región de La Mojana, donde se caracteriza por canales que abandonan rápidamente su cauce original en busca de mayores pendientes, con albardones prominentes y bien desarrollados que bordean islas y encierran pantanos y lagos, así como una significativa agradación vertical en la llanura de inundación (6).

El análisis de los sistemas avulsivos en La Mojana requiere especial atención debido a la intensa modificación antrópica de su red de drenaje en los últimos 2.500 años, en especial debido a la presencia del sistema hidráulico prehispánico Zenú (10,49), que ha contribuido a la prominencia de los albardones en algunos tramos de caños como Rabón y el eje Pita-Carate-Pajalar, y que es observable en los modelos de elevación digital, así como la alteración reciente de canales naturales y la creación de canales artificiales para avenamiento, irrigación y desecación de ciénagas, una práctica ampliamente extendida en toda la región.

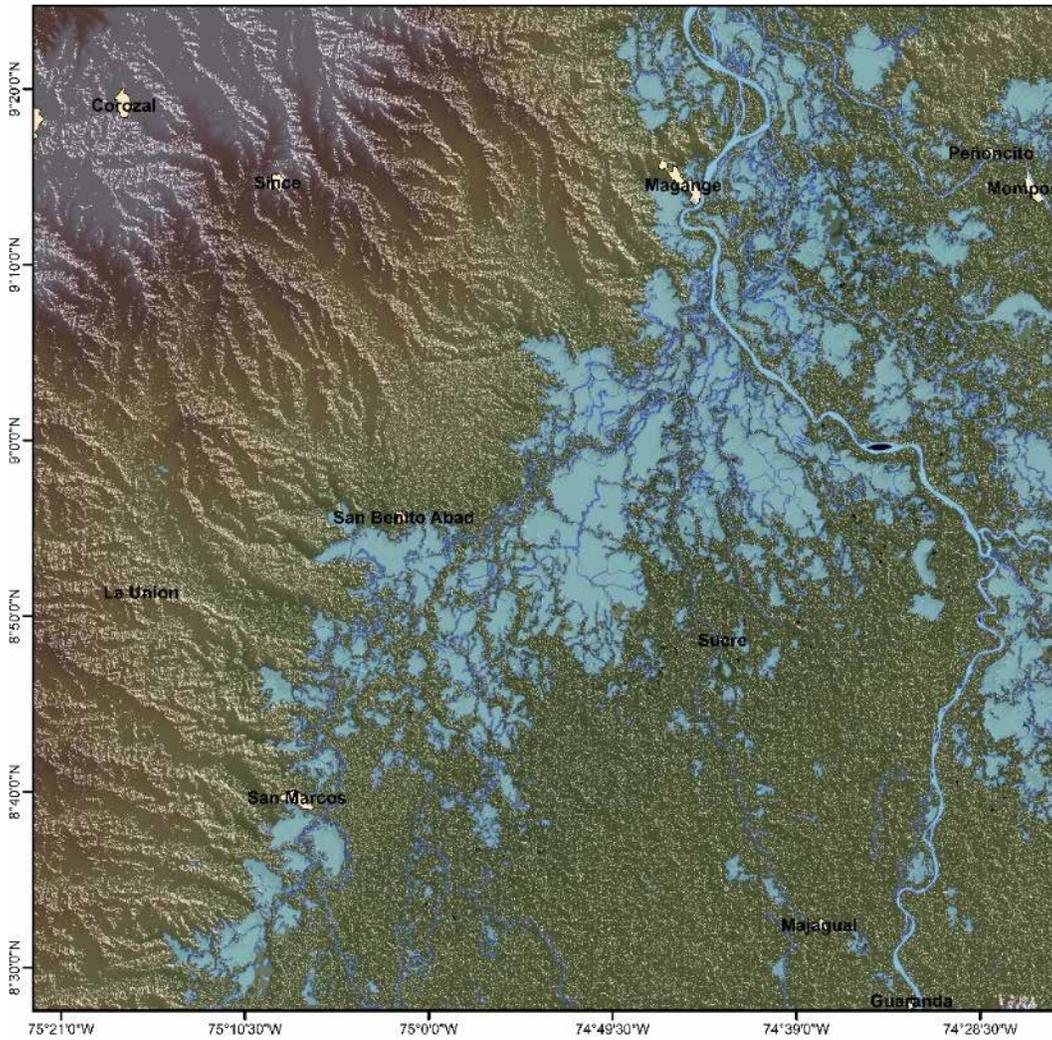
Sector septentrional de La Mojana, margen izquierda del Brazo de Loba

Este sector corresponde a una gran depresión limitada al este, al sur y al oeste por la cota 15,5 m s. n. m. y por los albardones de la margen izquierda del Brazo de Loba al norte, cuyos niveles superiores alcanzan los 16 m y 17 m s. n. m. (**Figura 1-7**).

Los albardones del Brazo de Loba y las estribaciones de la serranía de San Jacinto forman un embudo que restringe a la desembocadura del río San Jorge la evacuación de todas las aguas almacenadas en La Mojana por precipitación y aportes de los ríos Cauca y San Jorge. Debido a esta condición, en épocas invernales las aguas se acumulan, se incrementa el nivel y ocupa los canales de los caños Pancegüita, Mojana y las áreas susceptibles de anegamiento, en lo que la comunidad ha identificado como el retorno de las aguas.

Las tasas anuales de sedimentación de 1 mm, reportadas para los últimos 2.000 a 2.500 años por Plazas *et al.* (1988), en el sector meridional de la cuenca baja del río San Jorge, en cercanías de los caños Carate, Pajalar, Hormiga y Rabón, muestran una gran diferencia con aquellas de 3 mm a 4,5 mm anuales determinadas por Martínez (1981) para los últimos 1,500 años y de 4,5 mm anuales para los últimos 2,500 años indicadas por Smith (1986), para la región de la isla de Margarita entre el Brazo de Loba y el Brazo de Mompós.

Figura 1-7. Sector septentrional de La Mojana



Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361 a partir del MED de 5 mm.

Esas diferencias en las tasas de sedimentación entre los sectores meridional y septentrional de La Mojana explican la mayor profundidad verificada hacia el norte, a pesar de contar con una mayor carga de sedimentos anuales. Adicionalmente, los desbordamientos del brazo de Loba fortalecen los diques marginales naturales elevándolos constantemente frente a la llanura de inundación, y forman una barrera que, en algunos casos, supera los ocho metros de altura.

Esta zona se ha visto afectada por el taponamiento de los caños naturales mediante la construcción de jarillones, en especial en los sistemas Pancegüita - Playa Afuera y Orejero - San Mateo (50).

Las ciénagas más importantes de este sector son Murciélago, El Roble, La Ceibita, La Cocinera, De Los Monos, Boca Grande, Retamocera, Terneros, Grande de Barbosa, Cincahecha, Chiquegua, El Agalla, La Fangua, Los Albertos, Los Manatías, El Guamo, El Yuyá, Los Patícos, Los Caimanes, Las Llaves, Carbonera y Los Animes. En este complejo se encuentra el canal Covao, un drenaje artificial que deseca las ciénagas.

Las ciénagas de esta región son alimentadas por la precipitación, los caudales del río San Jorge y los desbordamientos del río Cauca en Nechí y San Jacinto del Cauca.

Entre los caños Pancegüita y Mojana se desarrollan grandes islotes, llamados firmales, formados por la colmatación del lecho causada por las macrófitas flotantes, que son usados para agricultura y pastoreo. A estos firmales, que se desplazan con el viento, afectan la dinámica de las ciénagas, se suma la construcción de terraplenes que acelera la desecación y origina bosques inundables regionalmente conocidos como zapales (32).

Los principales canales del sector son el río San Jorge y los caños Pancegüita, Chicagua, Mojana, Quitasueño, Portaca, Guateas, Tomala, Aguacate, Mojanita, Chaparral y Machetón; mientras que las ciénagas más representativas son La Pelúa, Las Leguas, Los Mangos, Portaca, La Esperanza, El Totumo, El Pedral, Aguas Turbias, Los Mimbres y La Gusanera (32).

Amenazas a los sistemas cenagosos de la mojana

A lo largo de la historia, el desconocimiento de la importancia de La Mojana en la regulación hídrica de Colombia ha permitido que se confunda con una zona poco aprovechada para actividades agropecuarias e incluso se hayan promulgado normas promoviendo la desecación. A continuación, se citan algunas decisiones que motivaron la desecación de ciénagas y la modificación de los canales naturales.

- Con el fin de identificar las principales necesidades para el desarrollo del país, el Banco Mundial envió en 1949 una misión dirigida por el economista canadiense Lauchlin Currie, con la tarea de sentar las bases para superar la pobreza. Entre sus conclusiones, la Misión Currie determinó que gran parte de las tierras con potencial agrícola estaban anegadas o se inundaban frecuentemente, en especial en La Mojana y el bajo Sinú (51).
- Con base en lo anterior, el Gobierno contrató en 1955 a la firma estadounidense Tipton and Kalmbach inc., especialista en ingeniería hidráulica, irrigación y drenaje, para buscar soluciones a los problemas identificados por la Misión Currie. Esta firma concluyó que, para expandir la agricultura, debían desecarse más de 3.100 km² en las cuencas bajas del Sinú, el San Jorge y el Magdalena (52).
- En 1957, el ingeniero hidráulico Hugo Vlugter, técnico del Comité Nacional de Planeación, recomendó la eliminación de 2.500 km³ de ciénagas en La Mojana.
- En 1960, el Gobierno nacional solicitó al economista Lauchlin Currie el diseño de la Corporación del Valle del Magdalena; entre sus conclusiones se incluyó la de eliminar en su totalidad la Ciénaga Grande de Santa Marta y parte de La Mojana (53).
- Durante los debates sobre la reforma agraria que se tramitaba en 1961, el expresidente Laureano Gómez sugirió la desecación de humedales como solución agropecuaria, indicando que: “Si quieren que haya tierra para los campesinos, el país tiene abundantísimas tierras [...] son pantanos, pero si se secan pueden redistribuir ahí lo que se quiera, sin perjudicar a ningún propietario legítimo” (54).
- En 1974, el Decreto-Ley 2811 de 1974 reguló el aprovechamiento de las aguas no marítimas en todos sus estados (lagos, ciénagas, lagunas y embalses naturales o artificiales) y las prácticas en contra de los humedales señalan que se prohíbe “desecar, variar o bajar el nivel de los ríos, lagunas, ciénagas o cualquier otra fuente, con fines de pesca (Artículos 77 y 282)” (55).
- Sin embargo, el Decreto 624 de 1989 —Estatuto tributario—, indicó que: “... serán considerados como gastos deducibles del impuesto sobre la renta, en sus coeficientes de amortización, [...] los desmontes, obras de riego y de desecación [...] y demás inversiones en la fundación, ampliación y mejoramiento de fincas rurales” (Artículo 158) (56).

Finalmente, la estrategia de la desecación de humedales como respuesta a las necesidades agropecuarias culminó con la ratificación del convenio Ramsar, mediante la Ley 357 de 1997. Más tarde, la Sentencia T 194/99 de la Corte Constitucional, resolviendo una acción de tutela contra la Corporación Eléctrica de la Costa Atlántica (Corelca) y la sociedad de economía mixta Urrá S. A., ordena al entonces Instituto Colombiano de la Reforma Agraria (Incora) detener la adjudicación de los terrenos de las

ciénagas en Córdoba, y declararlos baldíos. Por último, en 2002, se publica la Política Nacional de humedales interiores de Colombia, con estrategias para su conservación y uso sostenible.

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. Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena (CORMAGDALENA). Atlas cuenca del río Grande de la Magdalena. 2001.
2. Restrepo J. Dinámica Sedimentaria en Deltas Micromareales – Estratificados de Alta Descarga: Delta del Río Magdalena (Colombia – Mar Caribe) [Internet] [Tesis doctoral]. Barranquilla: Universidad del Norte; 2014. Disponible en: <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/7422/dinamica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
3. Restrepo JC, Schrottke K, Traini C, Ortiz JC, Orejarena A, Otero L, et al. Sediment transport and geomorphological change in a high-discharge tropical delta (Magdalena River, Colombia): insights from a period of intense change and human intervention (1990–2010). *J Coast Res*. 2016 May;319:575-89.
4. Alfonso JL. Optimisation of monitoring networks for water systems: information theory, value of information and public participation. Leiden: CRC Press; 2010.
5. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT). Informe General “Proyecto Cuenca Magdalena-Cauca”. Convenio Colombo-Holandés. Vol. 1. Bogotá (Colombia); 1997.
6. Latrubesse EM. Large rivers, megafans and other Quaternary avulsive fluvial systems: A potential “who’s who” in the geological record. *Earth-Sci Rev*. 2015;146:1-30.
7. Angarita H, Delgado J, Wickel B, Escobar M. Biodiversidad, ecosistemas de humedal y riesgo de inundación: Implicaciones de la expansión hidroeléctrica en la cuenca del río Magdalena. *Stockh Environ Inst [Internet]*. 2016. Disponible en: <https://mediamanager.sei.org/documents/Publications/SEI-TNC-USAID-FS-2016-Hidroelectrica-Depresion-Momposina.pdf>
8. Vilorio J. Economía extractiva y pobreza en la Ciénaga de Zapatosa [Internet]. Banco de la República; 2008. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Joaquin-Hoz/publication/4828442_Economia_Extractiva_Y_Pobreza_En_La_Cienaga_De_Zapatosa/links/59235ad8aca27295a8a891cf/Economia-Extractiva-Y-Pobreza-En-La-Cienaga-De-Zapatosa.pdf
9. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). Informe General: Proyecto piloto La Mojana Bajo Cauca y Bajo San Jorge. Programa Nacional de Manejo de Suelos y Aguas, C.I. Tibaitatá; 1995.
10. Plazas C, Falchetti AM, Van Der Hammen T, Botero P. Cambios ambientales y desarrollo cultural en el bajo río San Jorge. *Bol Mus Oro*. 1988;20:58-9.
11. Herrera LF, Sarmiento G, Romero F, Botero PJ, Berrío JC. Evolución ambiental de la depresión Momposina (Colombia) desde el Pleistoceno tardío a los paisajes actuales. *Geol Colomb [Internet]*. 2001. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/42093>
12. The Nature Conservancy, Fundación Alma, Fundación Humedales, Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP). Estado de las planicies inundables y el recurso pesquero en la Macrocuenca Magdalena-Cauca y propuesta para su manejo integrado. Bogotá, Colombia; 2016.

13. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Reducción del riesgo y de la vulnerabilidad frente al cambio climático en la región de la depresión momposina en Colombia: Proyecto del Fondo de Adaptación del protocolo de Kioto [Internet]. 2012. Disponible en: http://snip.gov.ni/Docs/capacitaciones/tallerInter/Colombia_CasoDepresionMomposina.pdf
14. National Aeronautics and Space Administration (NASA). U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data. Shuttle Radar Topography Mission – SRTM. Calif Inst Technol [Internet]. 2014. Disponible en: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
15. Montejo F. Estudio comparado de sistemas agrícolas andinos basados en el control de la inundación y la transformación del medio [Internet]. [México D.F.]: Universidad Nacional Autónoma de México; 2008. Disponible en: <http://132.248.9.195/ptd2009/enero/0638486/0638486.pdf>
16. Fundación Fluvialia, Instituto Alexander von Humboldt. Proyecto Planeación ambiental para la conservación de la biodiversidad en las áreas operativas de Ecopetrol. Informe final –Producto doce [Internet]. Bogotá; 2015 jun. p. 119. Disponible en: http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/9345/11Fluvialia_Cienaga_Zapotosa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
17. Posada García L, Rhenals Garrido RL. Controles fluviales del río Cauca en la región de La Mojana. *Rev Geogr.* 2006 Sep 15;655-62.
18. Servicio Geológico Colombiano (SGC), Universidad Nacional de Colombia (UNAL). Memoria técnica explicativa del mapa geomorfológico analítico aplicado a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000 plancha 54 – Mompós, departamentos de Bolívar y Magdalena. Medellín; 2016.
19. Ramsar. Ramsar list, the list of wetlands of international importance [Internet]. 2023. Disponible en: <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/sitelist.pdf>
20. Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena (CORMAGDALENA), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Estudio Ambiental de la Cuenca Magdalena–Cauca y elementos para su ordenamiento territorial [Internet]. Bogotá: IDEAM - Cormagdalena; 2001. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000051/EstudioAmbientaCMagdalena-Cauca.pdf>
21. Restrepo A JD, Kettner AJ, Brakenridge GR. Monitoring water discharge and floodplain connectivity for the northern Andes utilizing satellite data: A tool for river planning and science-based decision-making. *J Hydrol.* 2020 Jul;586:124887.
22. Martínez A. Subsistencia y geomorfología de la depresión inundable del río Magdalena. *Rev CIAF.* 1981;6(1-3):319-28.
23. Van der Hammen T. Fluctuaciones holocénicas del nivel de inundaciones en la cuenca del Bajo Magdalena-Cauca-San Jorge (Colombia). *Geol Norandina.* 1986;10(1):11-7.
24. Smith DG. Anastomosing river deposits, sedimentation rates and basin subsidence, Magdalena River, northwestern Colombia, South America. *Sediment Geol.* 1986 Feb 1;46(3):177-96.
25. Charlton R. *Fundamentals of fluvial geomorphology.* Routledge; 2007. 249 p.
26. Bridge JS. *Rivers and floodplains: forms, processes, and sedimentary record.* John Wiley & Sons; 2003. 491 p.
27. López S, Restrepo J. Modelos morfodinámicos de los deltas fluviales colombianos. *Bol Geol.* 2007;29(1):103-13.
28. Burke T. WSID and BBID Water Availability Analysis [Internet]. 2016. Disponible en: https://www.waterboards.ca.gov/waterrights/water_issues/programs/hearings/byron_bethany/docs/exhibits/wsid_cdwa_sdwa/wsid0124.pdf

29. McKee L, Lewicki M, Schoellhamer DH, Ganju NK. Comparison of sediment supply to San Francisco Bay from watersheds draining the Bay Area and the Central Valley of California. *Mar Geol.* 2013;345:47-62.
30. Von Humboldt A, Bonpland A. Personal narrative of travels to the equinoctial regions of America, during the years 1799-1804 [Internet]. Edición digital proyecto Gutenberg. Henry G. Bohn; 1851. (George Bell & Sons; vol. 3). Disponible en: <https://www.gutenberg.org/ebooks/7254>
31. Reclus E. The earth and its inhabitants, South America [Internet]. New York; 1894. 260 p. (The Andes Regions; vol. 1). Disponible en: <https://archive.org/details/earthitsinhabita941recl/page/n7/mode/2up>
32. Torres J, Pinilla G. Revisión de las características limnológicas de los sistemas acuáticos de la región de La Mojana. Informe final. Estudios, análisis y recomendaciones para el ordenamiento ambiental y el desarrollo territorial de La Mojana [Internet]. Departamento Nacional de Planeación - Universidad Nacional de Colombia; 2011. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/9310/gabrielpinilla.2011.pdf?sequence=1&isAllowed>
33. Díaz-Granados M, Camacho LA, Maestre A. Modelación de balances hídricos de ciénagas fluviales y costeras colombianas. I: Fundamentos técnicos. *Rev Ing.* 2001;(13):12-20.
34. Mosquera L. Estudio general de suelos de los municipios de Caimito, la Unión de Sucre, Majagual, San Benito Abad, San Marcos y Sucre (departamento de Sucre). Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC; 1986.
35. Convención Ramsar. Convención relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas [Internet]. 1971. Disponible en: https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/current_convention_s.pdf
36. Ministerio de Ambiente. Política nacional para humedales interiores de Colombia estrategias para su conservación y uso racional [Internet]. 2001. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Poli%20Nacional-de-Humedales.pdf>
37. Universidad Nacional de Colombia - UNAL. Control de inundaciones en la región de La Mojana. Volúmenes I y II. Informe preparado para el Instituto Nacional de Vías (Invías). 2002.
38. González H, Maya M, Tabares LF, Barajas A, Montoya A, Vélez Giraldo W. Elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1:100 000 ubicadas en cuatro bloques del territorio nacional, identificados por el Servicio Geológico Colombiano. Plancha 63 – San Marcos. Memoria Explicativa [Internet]. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano; 2015 jun. (Consortio GS GEOMINAS-SERVIMINAS-GEMI). Disponible en: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B15/23008010028466/Documento/Pdf/2105284661101000.pdf>
39. González H, Maya M, Tabares L, Barajas A, Montoya A, Vélez Giraldo W. Elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1:100.000 ubicadas en cuatro bloques del territorio nacional, identificados por el servicio geológico colombiano. Plancha 73 – Ayapel. Memoria explicativa [Internet]. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano; 2015 jun. (Consortio GSG GEOMINAS-SERVIMINAS-GEMI). Disponible en: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B15/23008010028467/Documento/Pdf/2105284671101000.pdf>
40. González H, Maya M, Tabares L, Barajas A, Montoya A, Giraldo W. Elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1:100.000 ubicadas en cuatro bloques del territorio nacional, identificados por el servicio geológico colombiano. Plancha 74 – Guaranda. Memoria explicativa [Internet]. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano; 2015 jun. (Consortio GSG (GEOMINAS-SERVIMINAS-GEMI)). Disponible en: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B15/23008010028467/Documento/Pdf/2105284671101000.pdf>

41. Fondo Adaptación. Plan de acción integral para la reducción del riesgo de inundaciones y adaptación al cambio climático en la región de La Mojana [Internet]. 2016. Disponible en: https://storage.googleapis.com/fnad-www-storage/FA2016/Macroproyectos/La_Mojana/Plan_de_Accion/Plan_de_Accio%20Integral.pdf
42. Hernández B, Obregón N. Elementos conceptuales y desarrollo metodológico modelamiento componente 2 gestión de la salud de los ecosistemas. Proyecto manejo sostenible y conservación de la biodiversidad en la cuenca del río Magdalena. [Internet]. Bogotá: Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF), Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y Fundación Natura Colombia; 2018 may. Disponible en: https://natura.org.co/wp-content/uploads/2021/04/20180530_-_ConsMetoModelaci%C3%B3n.pdf
43. Mantilla L, Clavijo J, Pinto J, Bernal L, Pérez A. Memoria explicativa de la cartografía geológica de la Plancha 64 Barranco de Loba, sur del departamento de Bolívar. Bogotá: Ingeominas; 2006. (Proyecto San Lucas).
44. Ochoa A, García G, Martínez E, Leixon A, Paula R, Oviedo J. Geología de la plancha 53 - Magangué a escala 1:100.000 departamentos de Bolívar y Sucre / Servicio Geológico Colombiano (SGC). Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Colombiano (SGC); 2016. 60 p.
45. Aguilera Garramuño E, Neira F. Comprobación y orientación de la sostenibilidad en la región de La Mojana. Corpoica Tibaitatá Septiembre. 1999;80-4.
46. Aguirre N, Palacio J, Flórez M, Wills A, Caicedo O, Jiménez L, et al. Análisis de relación Río-Ciénaga y su efecto sobre la producción pesquera en el sistema cenagoso de Ayapel, Colombia. [Internet]. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia; 2005 [citado 28 de julio de 2023] p. 419. (Grupo GAIA). Disponible en: <https://repositorio.minciencias.gov.co/handle/20.500.14143/39070>
47. Hoyos Arrieta OI, Muñoz Robayo A. Estudio de la hidrodinámica de la ciénaga La Villa (Machado) y sus interconexiones en la ecorregión de La Mojana a través de la mecánica de fluidos computacional. Tesis de Maestría [Internet]. Bogotá (Colombia): Pontificia Universidad Javeriana; 2016 [citado 28 de julio de 2023]. Disponible en: <http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/21193>
48. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Mapa de zonas de susceptibilidad a la inundación: Bolívar y Sucre. Bogotá (Colombia); 2011.
49. Plazas C, Falchetti de Saens A. Asentamientos prehispánicos en el bajo río San Jorge. Banco Repúb. 1981;(11):1-136.
50. Ministerio de Medio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (Minambiente), Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar (CSB). Plan de manejo integral de los humedales de la subregión de la depresión momposina, parte baja de los ríos Cauca, Magdalena y San Jorge y Cuenca del río Sinú en el área de la jurisdicción de la CSB, CVS, Corpomojana, Corpamag y Corantioquia. Magangué; 2002.
51. Programa de desarrollo económico del valle del Magdalena y norte de Colombia: informe de una misión. Bogotá (Colombia): Ministerio de obras públicas; 1960. (Robert R. Nathan Associates. Ferrocarriles Nacionales de Colombia, Empresa Colombiana de Petróleo).
52. Camargo A. Landscapes of fear: water grabbing, wetland conservation, and the violence of property in Colombia. 2012. Disponible en: <https://cornell-landproject.org/download/landgrab2012papers/camargo.pdf>
53. Acosta AJ, Cabrera MS, Mendoza CA. Lauchlin Currie y el futuro de la Costa Atlántica. Investig Desarro. 1992;(2):79-86.
54. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Colombia rural, razones para la esperanza [Internet]. Bogotá; 2011. Disponible en: https://planipolis.iiep.unesco.org/sites/default/files/ressources/colombia_nhdr_2011.pdf

55. República de Colombia. Decreto 2811 de 1974. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente [Internet]. 1974. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551>
56. República de Colombia. Decreto 624 de 1989. Estatuto Tributario de los impuestos administrados por la Dirección General de Impuesto Nacionales [Internet]. 1989. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=6533>



Imagen tomada de Pixabay.com

Capítulo 2

Potencial de deformación del paisaje neotectónico en el sistema acuífero La Mojana

Potential for Deformation of the Neotectonic Landscape in La Mojana Aquifer System

Flórez-Castaño, J. D.¹, Herrera-Arango, J.¹, Rosso-Pinto, M. J.¹,
Marrugo-Negrete, J. L.¹, Paternina-Uribe, 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: jairo.herrera@geologist.com

Resumen

El índice de deformación neotectónica del paisaje (IDNP) permite identificar los efectos de los procesos tectónicos recientes y actuales, que han contribuido a reconstruir o reordenar de manera parcial o total, el plano morfoestructural del relieve en un área. Se tuvieron en cuenta estudios previos, donde se presentan a los complejos cenagosos dentro de los límites del Sistema Acuífero La Mojana (SALM), como posibles trampas de sedimentos debido a la subsidencia diferencial con tasas de hundimiento que varían entre 1 mm/año y 4,5 mm/año. Así, el estudio tuvo como objetivo determinar con un mayor grado de certeza el impacto de la neotectónica sobre la subsidencia, el transporte de sedimentos y la recarga hidrogeológica en el SALM. Para ello, se analizaron nueve variables (dos morfoestructurales, cuatro geomorfológicas y tres geológicas) procesadas en un sistema de información geográfica (SIG), en complemento con un análisis de decisión multicriterio basado en el proceso jerárquico analítico (PJA). Para obtener el IDNP, cada variable se estandarizó utilizando el método de rupturas naturales de Jenks y se reclasificó en diez clases, representadas en diez valores. Los resultados revelan que las áreas con alta y muy alta categoría coinciden con los lineamientos estructurales, esto indica la incidencia de deformación neotectónica en el SALM. Por su parte, las roturas de los diques marginales del río Cauca, generadores de sistemas avulsivos e inundaciones en La Mojana, coinciden con un IDNP muy alto. Algunos complejos cenagosos con IDNP alto concordaron con zonas de acumulación debido a una deformación gobernada por bloques micro tectónicos. Además, se observó coincidencia entre las áreas de alto potencial de recarga hidrogeológica y alto IDNP, lo que sugiere que las deformaciones neotectónicas favorecen la recarga. El IDNP es una herramienta valiosa para la comprensión y planificación del territorio, lo cual contribuye a la gestión adecuada del recurso hidrogeológico en el SALM.

Palabras clave: índice de deformación neotectónica del paisaje, subsidencia, transporte de sedimentos, proceso jerárquico analítico, recarga hidrogeológica.

Introducción

La neotectónica estudia lo concerniente al reconocimiento de las fuerzas tectónicas desde la base del Plioceno y el Holoceno hasta los tiempos actuales (1); por lo tanto, al evaluar la deformación del paisaje se han de considerar como relevantes las geoformas que indican actividad geológica reciente o actual, tales como escarpes de fallas, facetas triangulares y trapezoidales, silletas de fallas, corrientes alineadas, basculamientos del terreno, depósitos cuaternarios confinados y superficies de rupturas, entre otras (2).

La subregión de La Mojana, perteneciente al Sistema Acuífero La Mojana, actúa como un delta interior donde confluyen los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge (3,4). Este territorio se ha visto relacionado con subsidencia diferencial hacia los complejos cenagosos con tasas de hundimiento que varían entre 1 mm/año y 4,5 mm/año (5–8). Así se plantea que la formación de trampas naturales de sedimento en los complejos cenagosos ocurre debido al posible diseño neotectónico del paisaje.

El Sistema Acuífero La Mojana enfrenta un problema significativo de subsidencia y transporte de sedimentos, influenciado por posibles procesos neotectónicos. Esta subsidencia diferencial ha provocado la formación de trampas de sedimentos en los complejos cenagosos (5–8); este sedimento es aportado principalmente por los rompimientos del río Cauca, por lo que afecta la dinámica hidrológica y geomorfológica de la región.

El análisis multiespectral realizado con imágenes Landsat, para el período comprendido entre 1982 y 2022, reveló tres complejos cenagosos como los mayores sumideros de los sedimentos aportados por los sistemas avulsivos alimentados por los desbordamientos del río Cauca: el complejo cenagoso Ayapel, al sur; el complejo cenagoso Las Flores, al sur oeste; y el complejo cenagoso Hormiga – La Villa, en la zona centro occidental de La Mojana. También se ha indicado la existencia de microbloques

neotectónicos en la isla aluvial de Margarita, separada del SALM por el Brazo de Loba del río Magdalena (9).

En esta investigación se determinó con un mayor grado de certeza el impacto generado por la neotectónica sobre la subsidencia, el transporte de sedimentos y la recarga hidrogeológica en el Sistema Acuifero La Mojana (SALM). Este sistema está distribuido en 34 municipios pertenecientes a los departamentos de Antioquia, Bolívar, Córdoba y Sucre; y cuenta con características geológicas, geotectónicas y morfométricas que evidencian deformaciones del paisaje, como: cuerpos de agua alineados y sistemas de falla.

La deformación neotectónica del paisaje puede estudiarse a partir de las evidencias geomorfológicas, depositacionales y erosivas, causadas por actividad tectónica reciente sobre los materiales neógenos y cuaternarios (10,11), sin dejar de lado las particularidades geológicas y la calidad de la información disponible en la zona de estudio (12).

Por otro lado, el índice de deformación neotectónica del paisaje (IDNP) permite identificar los efectos de procesos tectónicos recientes y actuales, que han contribuido a reconstruir o reordenar de manera parcial o total, el plano morfoestructural del relieve en la zona de estudio (1,13).

Para obtener el IDNP del Sistema Acuífero La Mojana, se utilizó el método de Argyriou *et al.* (2016), basado en nueve variables (14): la amplitud del relieve (AR) y el índice de gradiente de la longitud de la corriente (ILC) como morfoestructurales; el gradiente de la pendiente (P), el índice de humedad topográfica (IHT), la densidad de drenaje (DD) y la frecuencia de drenaje (FD), como geomorfológicas; y la litología (LT), la densidad de lineamientos (DL) y la frecuencia de lineamientos (FL), como geológicas. La información anterior es obtenida a partir de los derivados del modelo digital de elevación y los mapas geológicos del área de estudio.

La distribución espacial del IDNP se obtuvo mediante la integración de las variables mencionadas y un análisis de decisión multicriterio (ADMC) para determinar el grado de incidencia de cada variable en las deformaciones del paisaje, y una combinación lineal ponderada para expresar la escala del índice.

Existen otras propuestas metodológicas para determinar el IDNP que incluyen variables adicionales: factor de forma (FF), relación circulatoria (RC), integral hipsométrica (IH), relación entre el ancho y la altura del piso del valle (VF) e índice de sinuosidad de la corriente (ISC) (15); sin embargo, estas propuestas metodológicas no fueron consideradas debido a que la zona de estudio se encuentra bajo el dominio de la topografía plana, así como también se observa la presencia de sistemas avulsivos definidos por el desbordamiento del río Cauca hacia nuevos canales en su llanura aluvial.

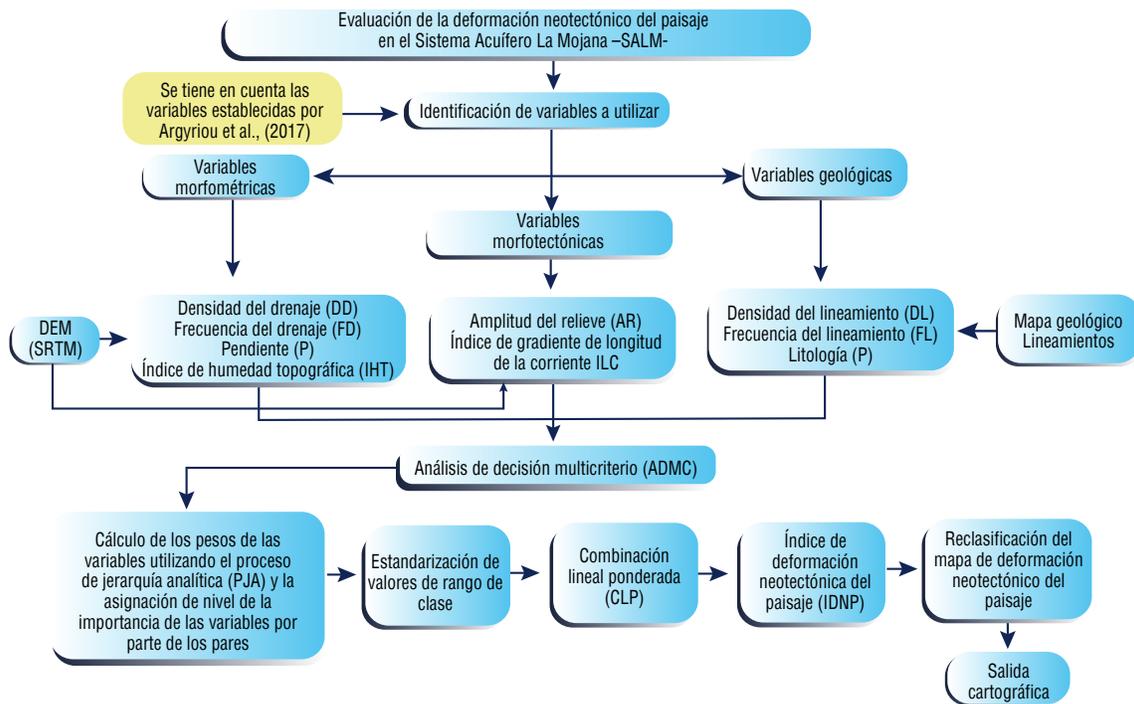
Otro método implementado en el estudio de la deformación del paisaje consistió en analizar los marcadores geomórficos y estratigráficos, considerando esto como evidencias de la respuesta del relieve a eventos neotectónicos, entre los que se cuentan la red de drenaje, el perfil de la cuenca y las zonas de incisión. Autores como Burbank y Anderson (2013) exponen que estos marcadores permiten generar u obtener información sobre la variabilidad y los patrones de los paisajes en diferentes periodos de tiempo (1). Estudios realizados en la India con esta metodología identificaron características tectonogeomórficas significativas en las cuencas del sur de este país, rotación en sentido antihorario de la placa India y cambios de dirección en la cuenca del río Thamirabarani (16).

Metodología

Área de estudio

El Sistema Acuífero La Mojana está distribuido en 34 municipios pertenecientes a los departamentos de Antioquia, Bolívar, Córdoba y Sucre, y cuenta con una extensión territorial de 12.672 km² (**Figura 2-1**).

Figura 2-2. Diseño metodológico para la evaluación de la deformación del paisaje neotectónico en el Sistema Acuífero La Mojana



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

Identificación de variables

La deformación del paisaje neotectónico en el Sistema de Acuífero La Mojana fue evaluada a través del índice propuesto por Argyriou *et al.*, (2016), el cual considera como criterio de investigación un total de nueve variables (14), entre las que se encuentran: cuatro de tipo morfológicas, dos morfotectónicas y tres geológicas, correspondiendo a límites, lineamientos, fallas, litología, cuencas hidrográficas, drenajes y elevación, siendo estas replicadas por diversos autores (6,8,9).

Variables morfológicas

Entre las variables morfológicas, se encuentran las siguientes:

Densidad de drenaje (DD): define la capacidad de la roca a ser degradada; puede estar sujeta a zonas de fallas ocultas, lo que proporciona una ruta para las aguas subterráneas. Además, los pequeños lagos y ríos suelen ser abundantes a lo largo de las zonas de falla, mientras los valores bajos están asociados a poco relieve y material permeable (19). De igual manera, la agrupación, la bifurcación o el cambio de dirección de ríos o arroyos a lo largo de una zona de falla, pueden verse representados en la cartografía con una alta densidad de drenajes (20). Esta variable está definida por un valor promedio sobre una unidad de área de la cuenca, en la que convergen diversos drenajes, estimando la sumatoria total de estos (21). Para el cálculo de esta variable se utiliza la ecuación 1:

$$DD = \Sigma L/A, \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- ΣL: es la longitud total de todas las corrientes ordenadas en kilómetros (Km).
- A: es el área de la cuenca en kilómetros cuadrados (Km²).

Esta variable revela información sobre el potencial de escorrentía superficial, la pendiente de la superficie del suelo, el grado de disección del paisaje, la permeabilidad de las rocas y la resistencia a la erosión (22,23).

Frecuencia de drenaje (fd): los valores altos se asocian con altos relieves, baja capacidad de infiltración y la presencia de material impermeable en el subsuelo, mientras que valores bajos implican geología de alta permeabilidad, bajo relieve y alta capacidad de infiltración (23–25). Para el cálculo de esta variable se utiliza la fórmula de la ecuación 2:

$$FD = N/A, \quad \left| \begin{array}{l} \text{Ecuación} \\ 2 \end{array} \right.$$

Donde:

N: es el número total de segmentos de flujo.

A: es el área de la cuenca.

Índice de humedad topográfica (IHT): este índice permite interpretar la distribución y el origen de la escorrentía superficial e identificar las zonas potencialmente saturables (25). Existen varios métodos para el cálculo del parámetro de índice de humedad topográfica, a partir del modelo digital de elevación. Se realiza el cálculo mediante la ecuación 3:

$$HT = \ln ((AF + 0.001) / ((P * 1.570796/90))) + 0.001 \quad \left| \begin{array}{l} \text{Ecuación} \\ 3 \end{array} \right.$$

Donde:

P: pendiente en grados.

AF: acumulación de flujo.

Al asociar esta variable con el comportamiento de la zona, se determina que, a mayor índice de humedad topográfica, mayor humedad presentará la celda en función de su configuración topográfica, mientras que los valores bajos indican condiciones secas y cercanía a las divisiones de agua en áreas de mayor escorrentía, o donde el gradiente de la pendiente es mayor (26).

Pendiente (P): esta variable actúa como indicador de la susceptibilidad ante los movimientos en masa, manteniendo una relación proporcional entre el grado de pendiente y la susceptibilidad a la deformación del paisaje; opera en compañía de parámetros como la rugosidad y cuenca acumulada (27). Se ve representada dentro de la morfología como el ángulo existente respecto a la superficie del terreno y la horizontal (27), tal como se indica en la ecuación 4:

$$S = \sqrt{(G^2 + H^2)} \quad \left| \begin{array}{l} \text{Ecuación 4} \end{array} \right.$$

Donde:

G: gradiente de este a oeste.

H: gradiente de norte a sur.

El mapa de pendientes destaca el impacto de la actividad tectónica en la forma del paisaje. Se calcula a partir del modelo de elevación digital (MDE), mediante herramientas de superficie del software ArcGIS.

Variables morfotectónicas

Entre las variables morfotectónicas se encuentran las siguientes:

Amplitud del relieve (AR): esta variable está influenciada por la presencia de accidentes geográficos, y posee dominio sobre el gradiente de la corriente en las cuencas; por lo tanto, influye en los patrones de inundación y la cantidad de sedimento que se puede transportar (28). La distribución espacial del parámetro se interpreta como la diferencia entre los puntos de elevación máxima y mínima de la cuenca. (29,30); esto ayuda a comprender la relación entre la formación de drenaje y la superficie (29,31). El comportamiento de esta variable se interpreta a través de la ecuación 5:

$$AR = H - h \quad \Bigg| \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

H: punto más alto de la cuenca.

h: punto más bajo de la cuenca.

Índice de gradiente de longitud de la corriente (ILC): esta variable es interpretada como la potencia total de la corriente disponible en un tramo del drenaje; es una variable hidráulica que está relacionada con la capacidad de la cuenca para transportar sedimentos y erosionar su lecho. El ILC funciona como una herramienta práctica que permite evaluar las posibles relaciones entre actividad tectónica, resistencia de la roca y topografía (1,25,32). Para el cálculo de este índice se emplea la ecuación 6:

$$SL = (\Delta H / \Delta L) \times L, \quad \Bigg| \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

ΔH : aumento de altura.

ΔL : distancia horizontal correspondiente en cada caso a ΔH .

L: la longitud acumulada desde el punto de partida hasta el punto medio del intervalo.

El índice de longitud de la corriente se calcula mediante la ecuación 7:

$$ILC = SL/k \quad \Bigg| \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

SL: índice de gradiente de la longitud de la corriente.

k: gradiente graduado del río.

Al momento de interpretar el valor de la variable en la cartografía, altos valores de índice de longitud de la corriente implican cuencas con alto relieve, roca dura y levantamiento activo; mientras que los valores más bajos sugieren una posible tectónica baja y una roca más blanda (32,33).

Variables geológicas

Entre las variables geológicas se encuentran las siguientes:

Litología (LT): la litología se comporta de diversas maneras de acuerdo con el nivel de consolidación del material, a partir de agentes externos como empujes tectónicos, clima, erosión y transporte, debido a la carga aplicada, por lo que tiende a la deformación. Se tiene en cuenta que la respuesta de la litología a acciones externas será más severa en litologías menos consolidadas, mientras que las litologías consideradas “fuertes” producen una respuesta contraria (30,34). Esta información fue obtenida a través del Atlas geológico de Colombia 2015, escala 1:500,000, del Servicio Geológico Colombiano (35).

Frecuencia de lineamientos (FL): esta variable corresponde al número de lineamientos por unidad de área. Estos lineamientos se observan como estructuras definidas o controles rectilíneos de gran extensión en valles, colinas y segmentos de ríos, que pueden demarcar espacialmente como un cambio en la litología, o expresarse geomorfológicamente (36). El manejo de esta variable se realizó a partir de las herramientas de densidad del kernel del software ArcGIS, y para su interpretación se consideró que las regiones de alta densidad de lineamientos son más susceptibles a la erosión que otras (37).

Densidad de lineamientos (DL): esta variable corresponde a la sumatoria de la longitud de lineamientos por unidad de área; se encuentra asociada a la presencia de controles rectilíneos en cursos individuales de corrientes, divisorias de aguas, alineamientos de cuerpos de aguas lénticas, y cambios bruscos de dirección de tramos de corrientes presentes en el área de estudio (36). Se estima o evalúa a partir de la herramienta de densidad de lineamientos de ArcGIS que calcula la densidad de entidades lineales; al momento de interpretar los resultados de esta variable, se tiene en cuenta que las regiones con alta densidad de lineamientos son más susceptibles a eventos erosivos que otras áreas (37).

Análisis de decisión multicriterio (ADMC)

Los diferentes métodos de análisis de decisión multicriterio se encargan de identificar y seleccionar las alternativas basadas en conocimientos y experiencias de los pares, reduciendo la subjetividad de las decisiones, y optando por la solución más idónea para resolver el problema planteado. Esta investigación pretende evaluar y cartografiar el impacto de la neotectónica sobre la distribución de la subsidencia, el transporte de sedimentos y la recarga hidrogeológica en el Sistema Acuífero La Mojana (SALM). A través de la aplicación de un enfoque ADMC basado en SIG, que incluye la superposición de varios mapas temáticos, se tiene en cuenta la reclasificación de las variables por medio del método de rupturas naturales de Jenks, y la implementación de un proceso de jerarquía analítica detallado, seguido de la aplicación del método de combinación lineal ponderada.

Proceso analítico jerárquico

Para el correcto análisis de las variables, el peso de cada una se obtuvo a través de un juicio de valor, homogenizando y evaluando los parámetros a través de la matriz de comparación por pares. Esto dio como resultado un coeficiente de ponderación de los factores, utilizando para su representación, una escala de números absolutos que permite transformar aspectos cualitativos en cuantitativos, lo que facilita la comparación entre las distintas alternativas y da lugar a resultados más objetivos y fiables (38,39).

Reclasificación de las variables

Tras completar el proceso de ponderación de las variables, para la obtención de los valores de deformación del paisaje neotectónico, se realizó la reclasificación de estas variables para facilitar su interpretación. La tabla de los valores se clasificó mediante el método de rupturas naturales de Jenks —*Jenks natural breaks*— en diez clases, para, posteriormente, clasificarlos y representarlos en valores de uno a diez (13,14).

Combinación lineal ponderada

Más adelante, se multiplicaron los pesos determinados en el proceso analítico jerárquico, con el valor obtenido en la estandarización de cada variable, obteniendo como resultado el potencial de la deformación del paisaje neotectónico en el Sistema Acuífero La Mojana. El proceso matemático utilizado para calcular las prioridades es llamado síntesis; dicho proceso implica el cálculo de valores y vectores característicos. De ahí surgió, a través de la herramienta SIG, un mapa del índice de deformación neotectónico del paisaje (IDNP), después de la asignación de los valores ponderados de sus celdas, según la ecuación 8, propuesta por Argyriou *et al.*, (2016) (14):

$$IDPN = \sum FW * fr \quad \Bigg| \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

Fw: peso de cada factor.

fr: valor de rango estandarizado de cada clase de criterio.

El mapa resultante tiene el mismo rango de valores que los mapas de criterios estandarizados utilizados, y al momento de su interpretación, se considera que los valores más altos del índice corresponden a áreas altamente deformadas o sobre todo susceptibles a la deformación neotectónica.

Los valores del IDNP obtenidos sobre el área de estudio se clasificaron con el método de rupturas naturales de Jenks y se obtuvieron cinco clases: muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto (40). Por último, a través del software ArcGIS, se generó la salida gráfica, que mostró como resultado el potencial de deformación neotectónico del Sistema Acuífero La Mojana.

Resultados y discusión

Al interpretar los resultados obtenidos en la evaluación del IDNP en el Sistema Acuífero La Mojana, se observa que las zonas están representadas con valores de uno a diez, donde uno indica zonas con muy baja deformación del paisaje neotectónico y diez, zonas con muy alta deformación. La variabilidad espacial de este índice está determinada por el comportamiento de las diversas variables dentro de la zona de estudio.

En el caso de la densidad de lineamientos, los valores más altos se asocian a la presencia de sistemas de fallas como el sistema de Sucre, sistema de Loba, falla de San Benito y falla del San Jorge. Mientras que, en el sector septentrional del SALM, hacia la confluencia de los ríos San Jorge y Magdalena, se presentan los valores más altos debido a la intersección de las fallas de Loba y San Jorge (**Figura 2 - 3**).

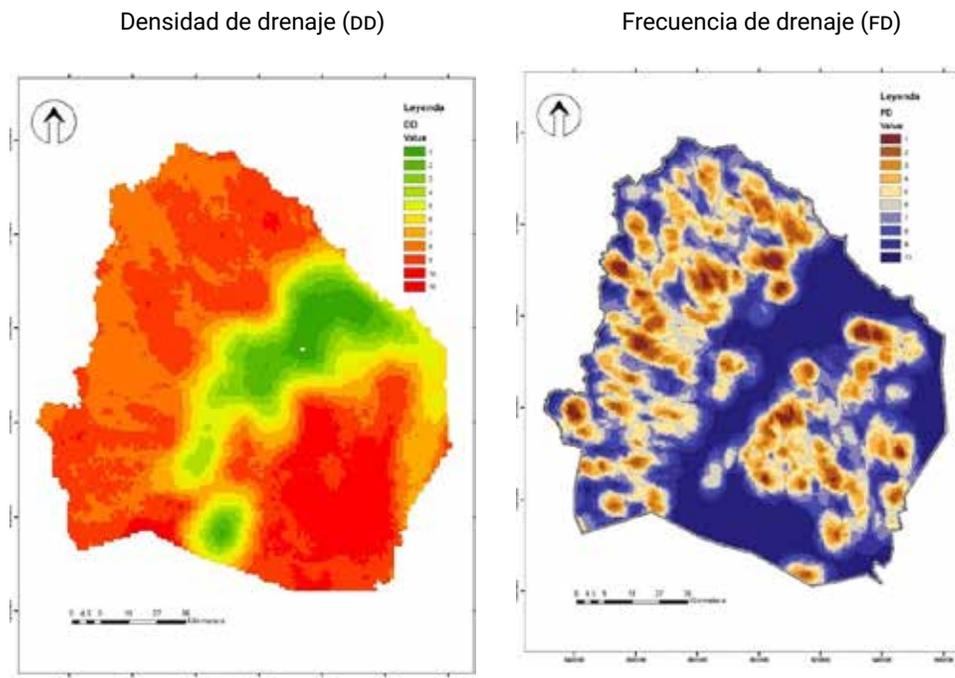
En cuanto a la pendiente, los valores oscilan desde 0° hasta 45° ; la distribución espacial de este criterio se ve representada en el mapa de la **Figura 2-4**. Se logra identificar que la mayor parte del área de estudio se caracteriza por pendientes con categorías de baja a media, presentando un valor de cero a seis con pendientes de 0° a $9,3^\circ$, sumado a la presencia de algunas zonas de importancia neotectónica. Por otro lado, las pendientes con una categoría de muy bajas, con valoración de uno a dos, con pendientes de 0° a $2,5^\circ$, se asocian con la presencia de drenajes y zonas cenagosas del Sistema Acuífero La Mojana; mientras que las pendientes más altas, con valores superiores a seis, con pendientes entre $9,3^\circ$ hasta 45° , se encuentran en la parte norte y oeste del área de estudio, donde se logran identificar los paisajes montañosos de las formaciones de Ciénaga de Oro y El Carmen.

La distribución espacial de los parámetros, densidad de drenajes y frecuencia de drenajes se ve representada en la **Figura 2-5**. Se aprecia que los valores más bajos coinciden con cuerpos de agua ubicados en los municipios de Magangué, San Benito Abad, Caimito, Sucre, Ayapel y San Marcos, los cuales se encuentran distribuidos en la parte norte y sureste del área de estudio.

Los valores más altos se concentran en la parte sureste del Sistema Acuífero La Mojana, donde se ubica el cinturón de avulsión en los municipios de Sucre, Achí, Majagual, Guaranda y sur de San Benito Abad, hasta llegar a los depósitos y abanicos aluviales en los municipios de Magangué, San Marcos, Caimito, y algunos sectores de San Jacinto del Cauca; estos depósitos aluviales se extienden desde el centro hasta el noreste del Sistema Acuífero La Mojana.

Al interpretar el comportamiento de los drenajes, se observa un foco de baja densidad de drenaje en el lineamiento del San Jorge direccionado hacia el suroeste, pasando por los municipios de Ayapel, San Marcos, Caimito, San Benito Abad y Magangué. Este foco se vuelve más notorio en la cartografía de frecuencia de drenaje, al igual que el lineamiento de Sucre que se muestra en el sur del área de estudio. Se halla una evidente coincidencia espacial entre zonas con altos valores de densidad de lineamiento y frecuencia de lineamientos, con zonas que presentan un alto valor de densidad de drenaje y frecuencia de drenaje.

Figura 2-5. Mapas de distribución espacial de los criterios utilizados en la metodología ADMC basada en SIG: DD y FD.



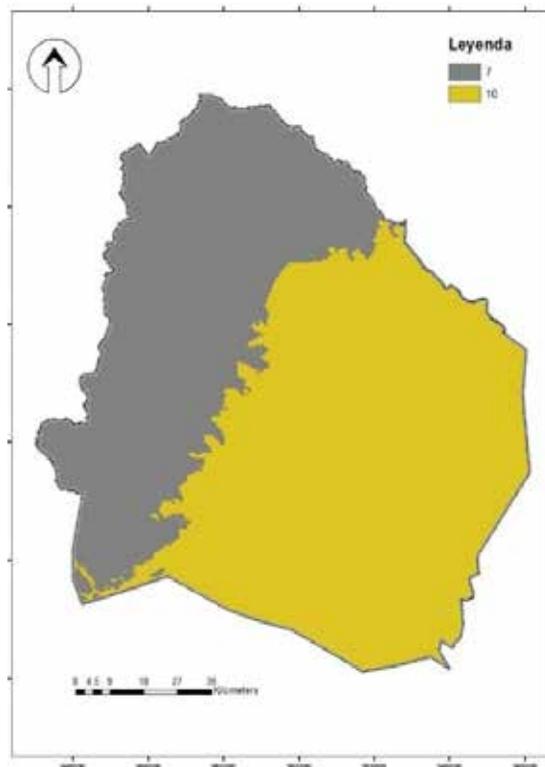
La variable LT mostró solamente dos tipos de comportamiento. Se define por sus características y condiciones en torno a la deformación del paisaje, reclasificando las categorías en dos grupos.

En el primer grupo se encuentran los depósitos paludales, el cinturón de avulsión, los cuerpos de agua y los depósitos aluviales, representados con un color gris, como lo muestra la **Figura 2-6**. A este primer grupo se le asignó una valoración de diez —la más alta—, y se encontraron zonas con alta probabilidad de deformación neotectónica debido a la presencia de materiales poco consolidados.

En el segundo grupo se encuentran las formaciones Ciénaga de Oro, El Carmen, Cerrito, Sincelejo y Betulia, representadas con un color amarillo, como lo muestra la **Figura 2-6**, definido en una valoración de siete. Para la interpretación del comportamiento neotectónico de este grupo se tiene en cuenta que, comparativamente, tiene una menor probabilidad de deformación debido a que se tiene un material semiconsolidado.

Figura 2-6, Mapas de distribución espacial de los criterios utilizados en la metodología ADMC basada en SIG: LT.

Litología -LT-



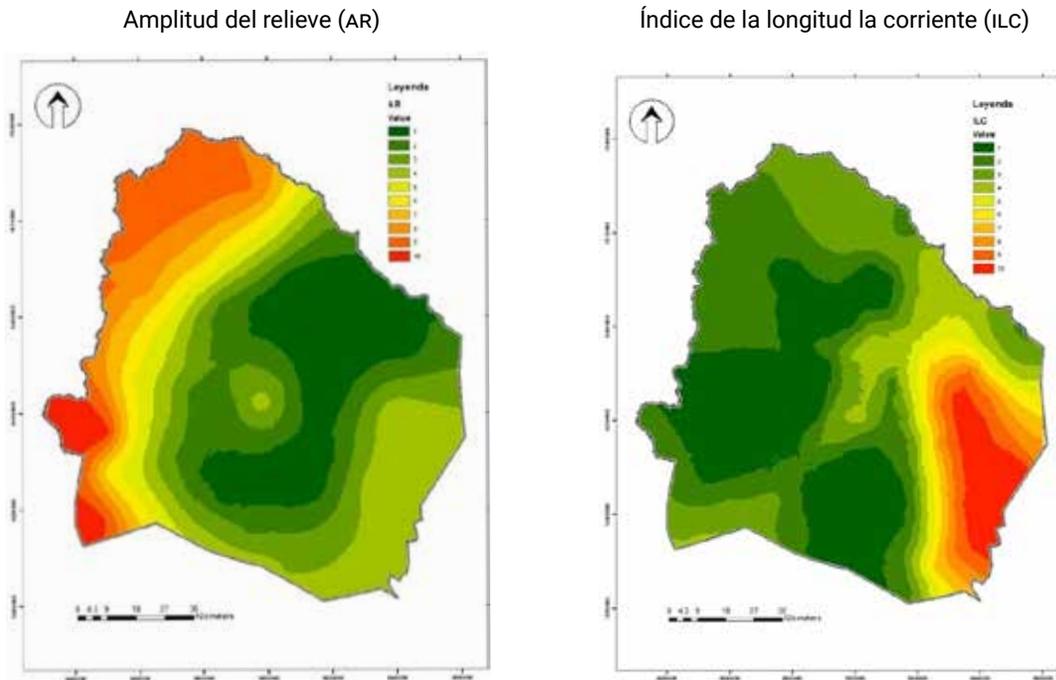
Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361, a partir de Atlas geológico de Colombia 2015, escala 1:500,000. Servicio Geológico Colombiano, 26 planchas. Bogotá.

La AR presenta un comportamiento variado en el área; por un lado, los valores más altos están localizados hacia el norte y oeste de la zona de estudio donde se encuentran los paisajes montañosos de la Serranía de San Jacinto —Montes de María— y las formaciones Ciénaga de Oro y El Carmen. Por otro lado, se encuentran zonas con una categoría que varía de baja a muy baja hacia el sur y el este del Sistema de Acuífero La Mojana. En esta zona también se ubica el cinturón de avulsión, los depósitos aluviales y los cuerpos de agua —geofomas o estructuras características de zonas de baja pendiente— (**Figura 2-7**).

Mientras que, en la cartografía representativa del índice de longitud de la corriente, se identifican valores altos hacia el sureste del área de estudio, donde se encuentra también el sistema de fallas de Loba direccionado hacia el noreste. Estos lineamientos definen cursos individuales de corrientes; de otro lado,

se identifica también la visible influencia de la falla del San Jorge con valores moderados, direccionados desde el sureste hacia el noreste, evidenciando el control rectilíneo de la llanura aluvial del San Jorge (Figura 2-7).

Figura 2-7. Mapas de distribución espacial de los criterios utilizados en la metodología ADMC basada en SIG: AR y ILC



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

Proceso de jerarquía analítica

Inicialmente fueron realizadas las comparaciones por pares para cada uno de los factores establecidos por Wind y Saaty (1980), sumando los valores de cada columna (38) (Tabla 2-1).

Tabla 2-1. Asignación de pesos para los factores en la escala de 1 a 5

	DL	FL	IHT	P	LT	DD	FD	AR	ILC
DL	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	3,00	3,00	4,00	5,00
FL	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	3,00	3,00	4,00	5,00
IHT	0,50	0,50	1,00	2,00	2,00	3,00	3,00	4,00	5,00
P	0,50	0,50	0,50	1,00	2,00	3,00	3,00	4,00	5,00
LT	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	2,00	2,00	3,00	4,00
DD	0,50	0,33	0,33	0,33	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00
FD	0,50	0,33	0,33	0,33	0,50	0,50	1,00	3,00	4,00
AR	0,33	0,25	0,25	0,25	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00
ILC	1,00	0,20	0,20	0,20	0,25	0,25	0,25	1,00	1,00
Sumatoria	5,83	4,62	7,12	8,62	10,58	16,08	17,58	27,00	34,00

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

Posteriormente, se normalizaron los factores presentes en la Tabla 2-1, dividiendo el nivel de importancia otorgado por los evaluadores entre la sumatoria de cada columna. Como se muestra en la Tabla 2-2, este

valor corresponde al peso que se le asigna a cada factor, considerando que, al ser estandarizado, la suma de los promedios debe ser igual a uno.

Tabla 2-2. Normalización y promedio de los pesos de los factores

	DL	FL	IHT	P	LT	DD	FD	AR	ILC	Sumatoria
DL	0,17	0,22	0,28	0,23	0,19	0,19	0,17	0,15	0,15	1,74
FL	0,17	0,22	0,28	0,23	0,19	0,19	0,17	0,15	0,15	1,74
IHT	0,09	0,11	0,14	0,23	0,19	0,19	0,17	0,15	0,15	1,41
P	0,09	0,11	0,07	0,12	0,19	0,19	0,17	0,15	0,15	1,22
LT	0,09	0,11	0,07	0,06	0,09	0,12	0,11	0,11	0,12	0,88
DD	0,09	0,07	0,05	0,04	0,05	0,06	0,11	0,11	0,12	0,70
FD	0,09	0,07	0,05	0,04	0,05	0,03	0,06	0,11	0,12	0,61
AR	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03	0,31
ILC	0,17	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,04	0,03	0,39
Sumatoria	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	9,00

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

Tabla 2-3. Pesos de las variables para evaluar la neotectónica en el Sistema Acuífero La Mojana

Variables	Peso	%
DL	0,194	19,4
FL	0,194	19,4
IHT	0,156	15,6
P	0,136	13,6
LT	0,098	9,8
DD	0,077	7,7
FD	0,067	6,7
AR	0,035	3,5
ILC	0,043	4,3
Sumatoria	1,000	100,00

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

Para la interpretación de los pesos obtenidos a partir del criterio de los expertos en el proceso de jerarquía analítica, que representa el grado de incidencia o peso de cada variable sobre la ocurrencia de la deformación del paisaje, destacan las variables densidad de lineamiento y frecuencia de lineamientos con un peso de 19,4 % cada una; luego, el índice de humedad topográfica, la pendiente y la litología con 15,6 %, 13,6 % y 9,8 %, respectivamente; siguiendo, 7,7 % para densidad de drenaje y 6,7 % para frecuencia de drenaje, y por último, las variables con menor peso para los evaluadores fueron la amplitud del relieve y el índice de longitud de la corriente con 3,5 % y 4,3 %, respectivamente (**Tabla 2 - 3**).

En la etapa final, los juicios de los pares o expertos se consideran coherentes siempre que la ratio de consistencia (RC) sea menor a 0,1. Tolerados si $0,1 < RC < 0,2$ y rechazados si $RC > 0,2$ (41). Para esta investigación, el RC tuvo un valor de 0,015, por lo que dichos juicios fueron aceptados como consistentes.

Estandarización de las variables

La **Tabla 2 - 4** muestra la reclasificación por ruptura natural de Jenks, de las variables utilizadas para la determinación del potencial de deformación neotectónico del paisaje en el Sistema Acuífero La Mojana.

Cada variable toma valores de uno a diez, donde uno representa las condiciones que no favorecen y diez las condiciones que más favorecen al fenómeno.

Tabla 2-4. Tabla de reclasificación de los factores

Variable	Rango de valores		Reclasificación	Variable	Rango de valores		Reclasificación
DL	0,00	7,01	1	LT	GRUPO 1		10
	7,01	17,17	2		GRUPO 2		7
	17,17	25,23	3	DD	0,04	0,31	10
	25,23	32,59	4		0,31	0,55	9
	32,59	39,60	5		0,55	0,80	8
	39,60	46,26	6		0,80	1,05	7
	46,26	53,27	7		1,05	1,28	6
	53,27	61,33	8		1,28	1,54	5
	61,33	71,14	9		1,54	1,78	4
	71,14	89,36	10		1,78	1,95	3
FL	0,00	388,13	1		1,95	2,10	2
	388,13	921,80	2		2,10	2,44	1
	921,80	1455,47	3	FD	0,00	9,69	10
	1455,47	1989,14	4		9,69	25,45	9
	1989,14	2547,07	5		25,45	38,78	8
	2547,07	3105,00	6		38,78	50,90	7
	3105,00	3687,19	7		50,90	61,80	6
	3687,19	4317,90	8		61,80	72,10	5
	4317,90	5118,41	9		72,10	83,01	4
	5118,41	6185,75	10		83,01	95,13	3
IHT	3,42	6,57	10		95,13	112,70	2
	6,57	7,59	9		112,70	154,50	1
	7,59	8,96	8	AR	13,40	43,69	1
	8,96	10,49	7		43,69	71,66	2
	10,49	11,85	6		71,66	100,78	3
	11,85	13,13	5		100,78	129,91	4
	13,13	14,57	4		129,91	161,37	5
	14,57	16,45	3		161,37	192,83	6
	16,45	19,17	2		192,83	221,96	7
	19,17	25,13	1		221,96	247,59	8
P	0,00	0,71	1		247,59	277,88	9
	0,71	1,94	2		277,88	310,50	10
	1,94	3,36	3	ILC	42,41	97,60	1
	3,36	4,77	4		97,60	135,82	2
	4,77	6,36	5		135,82	171,90	3
	6,36	8,48	6		171,90	220,73	4
	8,48	11,66	7		220,73	286,54	5
	11,66	16,08	8		286,54	354,47	6
	16,08	22,97	9		354,47	418,15	7
	22,97	45,05	10		418,15	475,47	8
			475,47		526,42	9	
			526,42		583,73	10	

Combinación lineal ponderada

Para calcular el INDP se tuvieron en cuenta los pesos obtenidos en el proceso de jerarquía analítica plasados en la **Tabla 2 - 3** y la estandarización de los factores establecidos en la **Tabla 2 - 4**; se empleó la siguiente formula:

$$IDPN = (DL * 0,194) + (FL * 0,194)(IHT * 0,156) + (P * 0,136) + (LT * 0,098) + (DD * 0,077) \\ + (FD * 0,067) + (AR * 0,035) + (ILC * 0,043)$$

Ecuación 9

Esta fórmula se trabajó a través de herramientas propias del software ArcGIS. El resultado fue el potencial de deformación del paisaje neotectónico en el Sistema Acuífero La Mojana.

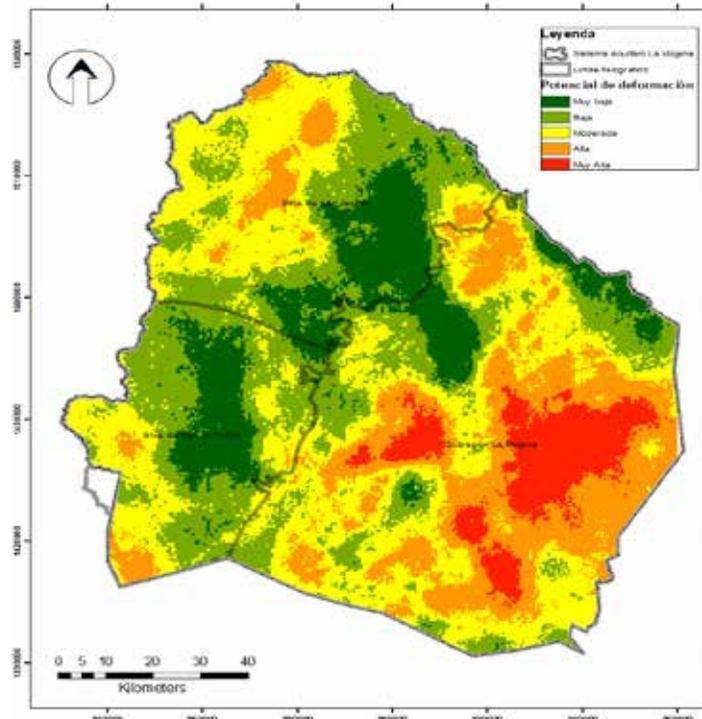
Potencial de deformación del paisaje neotectónico en el Sistema Acuífero La Mojana

A través de la combinación lineal ponderada se obtuvo como resultado un mapa final de la posible deformación el paisaje (**Figura 2-8**), el cual se reclasificó distribuyendo las rupturas naturales de Jenks en cinco clases, de muy baja a muy alta.

Se dividió el área de estudio teniendo en cuenta los límites fisiográficos. Hacia 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 (**Figura 2-8**).

Las subregiones de San Jacinto y San Jerónimo muestran lugares de interés hacia el norte de la primera y, al suroccidente hacia el municipio de Ciénaga de Oro, con valoraciones de moderada a alta. Gran parte del área se encuentra dominada por una valoración de baja a muy baja, distribuidas en las zonas céntricas, dirigiéndose hacia el nororiente y hacia el occidente del área de estudio.

Figura 2.8. Potencial de deformación del paisaje neotectónico en el Sistema Acuífero La Mojana



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

Los resultados arrojan un mayor potencial de deformación hacia la subregión de La Mojana, dominada por valoraciones de moderado a alto hacia el centro oriente, específicamente en los cuerpos de agua, y hacia el oriente, donde se concentran focos de gran magnitud en el cinturón de avulsión con valoraciones de alta a muy alta INDP; hacia el suroccidente del área de estudio se encontró una valoración de bajo a muy bajo.

Los resultados obtenidos en la evaluación del potencial de deformación neotectónico del paisaje apuntan hacia la subregión de La Mojana, en esta zona se concentran los mayores focos con alto potencial de deformación neotectónica; así mismo, las zonas demarcadas con un alto valor coinciden con un elevado índice de longitud de la corriente, donde se destaca una relación proporcional. Esto se observa en el sistema de fallas de Sucre, en el cual se encuentra un mayor nivel de saturación del suelo con respecto a la topografía indicada por el ITHL.

Sumado a esto, las zonas categorizadas con un bajo INDP, ubicadas hacia el norte y el oeste, presentan un valor de índice de longitud de la corriente de moderado a bajo. No obstante, no todas las zonas en las que se encuentran cuerpos de agua, corresponden a un alto potencial de deformación; en la zona central del área de estudio se identifican cuerpos de agua que mantienen una categoría de alta a muy alta.

La influencia de la pendiente en estas zonas también es relevante, ya que en municipios donde se encuentran colinas medias a bajas, como Ciénaga de Oro, la serranía de San Jacinto —Montes de María— y por último, hacia el sur, la serranía de San Jerónimo, coinciden con un índice de deformación moderada y algunos focos en alto. Esto indica la influencia de zonas con altas pendientes en posibles deformaciones neotectónicas hacia el norte de la subregión San Jacinto y oeste en la subregión de San Jerónimo.

Las zonas representadas por una categoría de deformación neotectónica baja a muy baja, exponen la influencia generada por los abanicos y los depósitos aluviales, esto, debido a la naturaleza poco consolidada del material, lo que contrasta con lo encontrado hacia el cinturón de avulsión, que se destaca por coincidir con zonas que poseen un mayor índice de deformación; esto se interpreta como la tendencia de ciertos tipos de litología a favorecer posibles eventos tectónicos activos. Finalmente, se observan valores de INDP bajo en las zonas caracterizadas con una densidad de drenaje y frecuencia de drenaje baja; estas zonas coinciden geográficamente con zonas de baja pendiente, ubicadas en la falda de las serranías de San Jerónimo y San Jacinto.

Conclusiones

El índice de deformación neotectónica del paisaje para el Sistema Acuífero La Mojana se obtuvo a partir de la distribución espacial de nueve variables de carácter morfométrico, morfotectónico y geológico, integradas mediante un análisis de decisión multicriterio; para la obtención se utilizaron procesos de jerarquía analítica y una combinación lineal ponderada, implementada en un sistema de información geográfica. Los resultados más relevantes se exponen a continuación:

Las categorías alta y muy alta del INDP coinciden con las áreas donde se intersecan los lineamientos estructurales, lo que se constituye en la condición de mayor incidencia en la deformación neotectónica del SALM.

Las roturas de los diques marginales del río Cauca, que dan lugar a los sistemas avulsivos, a través de los cuales se producen las extensas inundaciones de la subregión de La Mojana, coinciden con áreas con muy alto INDP. Se interpreta como la influencia de la deformación neotectónica del paisaje en la formación de estos sistemas en el SALM. Esta concordancia debe considerarse durante el diseño de las acciones que buscan prevenir las inundaciones recurrentes y altamente perjudiciales.

Los INDP muy altos, observados parcialmente en los complejos cenagosos de Las Flores, La Hormiga – La Villa y Ayapel, parecen explicar adecuadamente la condición de estos tres complejos como sumideros de los sedimentos y los contaminantes transportados por los sistemas avulsivos, identificados mediante análisis multiespectrales y multitemporales (véase el capítulo Análisis multitemporal del comportamiento de las áreas húmedas y las plumas de sedimentos de la subregión La Mojana entre los años 1982-2022), así como la subsidencia diferencial en la subregión de La Mojana reportada por Martínez (1981), van der Hammen (1986), Plazas *et al.* (1988), Smith (1986) y Herrera *et al.* (2001) (5–9).

El comportamiento como sedimentadores naturales de los complejos cenagosos mencionados, se interpreta en esta investigación como evidencia de una deformación rígida por bloques microtectónicos que generan embalses secuenciales. Esta conclusión es concordante con los microbloques delimitados por fallas reportados por Herrera *et al.*, (2001) al norte de la subregión de La Mojana (9).

El bajo INDP asociado con los abanicos aluviales del flanco oriental de las serranías de San Jerónimo y San Jacinto, se considera producto del ocultamiento de las evidencias de deformación por parte de estos depósitos recientes.

Se encontró una gran coincidencia entre las zonas con alto potencial de recarga hidrogeológica (véase capítulo Identificación de las zonas potenciales de recarga hidrogeológica mediante procesos de análisis jerárquicos) y las áreas con alto a muy alto INDP; lo anterior sugiere que la recarga del SALM puede verse favorecida por las deformaciones neotectónicas.

El índice de deformación neotectónica del paisaje es una herramienta útil para el conocimiento y la planificación adecuada del territorio. A través de los resultados obtenidos en este capítulo, se ha alcanzado un mayor grado de comprensión de los procesos que dominan el SALM, lo que, sin duda, contribuirá a promover acciones encaminadas a la buena 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. Burbank DW, Anderson RS. Tectonic Geomorphology, Second Edition. Environ Eng Geosci. 2013;19(2):198-200.
2. INGEOMINAS. Informe No. 1-3, Investigaciones neotectónicas en el centro occidente colombiano [Internet]. 2002 [citado 2023 oct 10]. Disponible en: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B7/21003002515005/documento/pdf/2105150051103000.pdf>
3. Humboldt A, Bondpland A. Personal narrative of travels to the equinoctial regions of America during the years 1799-1804. Vol. 3. 1851.
4. Reclus E. The Earth and its inhabitants. South America. Vol. 1. The Andes regions [Internet]. 1894 [citado 2023 oct 10]. Disponible en: <https://archive.org/details/earthitsinhabita941recl/page/n8/mode/1up?view=theater>
5. Martínez A. Subsistencia y geomorfología de la depresión inundable del río Magdalena. 1981:319-28.
6. Van Der Hammen T. Fluctuaciones holocénicas del nivel de inundaciones en la cuenca del bajo Magdalena, Cauca-San Jorge (Colombia). 1986.
7. Smith DG. Anastomosing river deposits, sedimentation rates and basin subsidence, Magdalena River, northwestern Colombia, South America. Sediment Geol. 1986;46(3-4):177-96.
8. Plazas C, Van Der Hammen T, Falchetti A, Botero P. Cambios ambientales y desarrollo cultural en el bajo río San Jorge. 1988.
9. Herrera L, Sarmiento G, Romero F, Botero P, Berrío J. Evolución ambiental de la depresión momposina (Colombia) desde el Pleistoceno Tardío a los paisajes actuales. Geol Colomb. 2001;(26).

10. Doornkamp JC. Geomorphological approaches to the study of neotectonics. *J Geol Soc.* 1986;143(2):335-42.
11. Martínez Gallego J, Goy JL, Zazo C. Un modelo de mapa neotectónico en la región Nor-oriental de la provincia de Valencia (España). *Estud Geol.* 1987;43(1-2):57-65.
12. Audemard M. Paleoseismology in Venezuela: Objectives, methods, applications, limitations, and perspectives. *Tectonophysics.* 2005;408(1-4):29-61.
13. Valkanou K, Karymbalis E, Papanastassiou D, Soldati M, Chalkias C, Gaki-Papanastassiou K. Assessment of neotectonic landscape deformation in Evia Island, Greece, using GIS-based multi-criteria analysis. *Int J Geoinform.* 2021;10(3):118.
14. Argyriou AV, Teeuw RM, Rust D, Sarris A. GIS multi-criteria decision analysis for assessment and mapping of neotectonic landscape deformation: A case study from Crete. *Geomorphology.* 2016;253:262-74.
15. Agrawal N, Gupta L, Dixit J. Geospatial assessment of active tectonics using SRTM DEM-based morphometric approach for Meghalaya, India. *All Earth.* 2022;34(1):39-54.
16. Ramkumar M, Santosh M, Rahaman SMA, Balasundareshwaran A, Balasubramani K, Mathew MJ, *et al.* Tectono-morphological evolution of the Cauvery, Vaigai, and Thamirabarani River basins: Implications on timing, stratigraphic markers, relative roles of intrinsic and extrinsic factors, and transience of Southern Indian landscape. *Geol J.* 2019;54(5):2870-911.
17. IDEAM. Condiciones hidrometeorológicas actuales de La Mojana [Internet]. 2019 [citado 2023 oct 10]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/10182/79335997/comunicado+la+mojana/886010a7-3088-4b79-a9a0-564ead67f8e8>
18. Al-Attar ZT, Othman AA, Al-Hakari SHS, Obaid AK, Salar SG, Liesenberg V. A neotectonic statistical assessment through watershed geomorphic analysis: A case study in the Greater Zab River Basin, Turkey–Iraq. *Environ Earth Sci.* 2022;81(13):355.
19. Strahler AN. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Trans Am Geophys Union.* 1957;38(6):913-20.
20. Han Z, Wu L, Ran Y, Ye Y. The concealed active tectonics and their characteristics as revealed by drainage density in the North China plain. *J Asian Earth Sci.* 2003;21(9):989-98.
21. Jianjun H, Mukang H, Ollier CD. A morphometric method to determine neotectonic activity of the Weihe basin in northwestern China. *Episodes.* 1997;20(2):95-9.
22. Devi RKM, Bhakuni SS, Bora PK. Tectonic implication of drainage set-up in the Sub-Himalaya: A case study of Papumpare district, Arunachal Himalaya, India. *Geomorphology.* 2011;127(1-2):14-31.
23. Horton R. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. 1945;56:275-370.
24. Parveen R, Kumar U, Singh VK. Geomorphometric characterization of Upper South Koel Basin, Jharkhand: A remote sensing & GIS approach. *J Water Resource and Protection (JWARP).* 2012;4(12):1042-50.
25. Troiani F, Galve JP, Piacentini D, Della Seta M, Guerrero J. Spatial analysis of stream length-gradient (SL) index for detecting hillslope processes: A case of the Gállego River headwaters (Central Pyrenees, Spain). *Geomorphology.* 2014;214:183-97.
26. Pei T, Qin CZ, Zhu AX, Yang L, Luo M, Li B, *et al.* Mapping soil organic matter using the topographic wetness index: A comparative study based on different flow-direction algorithms and kriging methods. *Ecological Indicators.* 2010;10(3):610-9.

27. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa, Escala 1:100,000 [Internet]. 2013 [citado 2023 oct 10]. Disponible en: https://recordcenter.sgc.gov.co/B22/AmeMM031_Campo_de_la_Cruz/Documento/Pdf/Anexo_B.pdf
28. Hadley R, Schumm S. Sediment sources and drainage basin characteristics in upper Cheyenne River Basin. 1961;1531-B(1531-B):198.
29. Ciccacci S, De Rita D, Freddy P. Geomorfologia quantitativa e morfotettonica dell'area di Morlupo-Castelnuovo di Porto nei Monti Sabatini (Lazio). *Supplementi di Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*. 1998;1:197-206.
30. Glock WS. Available relief as a factor of control in the profile of a land form. *J Geol*. 1932;40(1):74-83.
31. Mesa LM. Morphometric analysis of a subtropical Andean basin (Tucumán, Argentina). *Environ Geol*. 2006;50(8):1235-42.
32. Hack J. Stream-profile analysis and stream-gradient index. *J Res US Geol Surv*. 1973;1(4):421-9.
33. Seeber L, Gornitz V. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. *Tectonophysics*. 1983;92(4):335-67.
34. Marinós P, Hoek E. GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. En: *ISRM-IS-2000-035; 2000*.
35. Gómez J, Montes N, Nivia A, Diederix H. *Mapa geológico de Colombia 2015*. Escala 1:1,000,000. Servicio Geológico Colombiano (SGC); 2015.
36. Ramli MF, Yusof N, Yusoff MK, Juahir H, Shafri HZM. Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: A review. *Bull Eng Geol Environ*. 2010;69(2):215-33.
37. Taesiri V, Pourkermani M, Sorbi A, Almasian M, Arian M. Morphotectonics of Alborz Province (Iran): A case study using GIS method. *Geotecton*. 2020;54(5):691-704.
38. Wind Y, Saaty TL. Marketing applications of the Analytic Hierarchy Process. *Manag Sci*. 1980;26(7):641-58.
39. Chalkias C. *Geographical analysis with the use of geoinformatics*. 2020 [citado 2023 oct 10]. Disponible en: <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/4546>
40. Ayalew L, Yamagishi H, Ugawa N. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*. 2004;1(1):73-81.
41. Chu P, Liu JKH. Note on consistency ratio. *Math Comput Model*. 2002;35(9-10):1077-80.

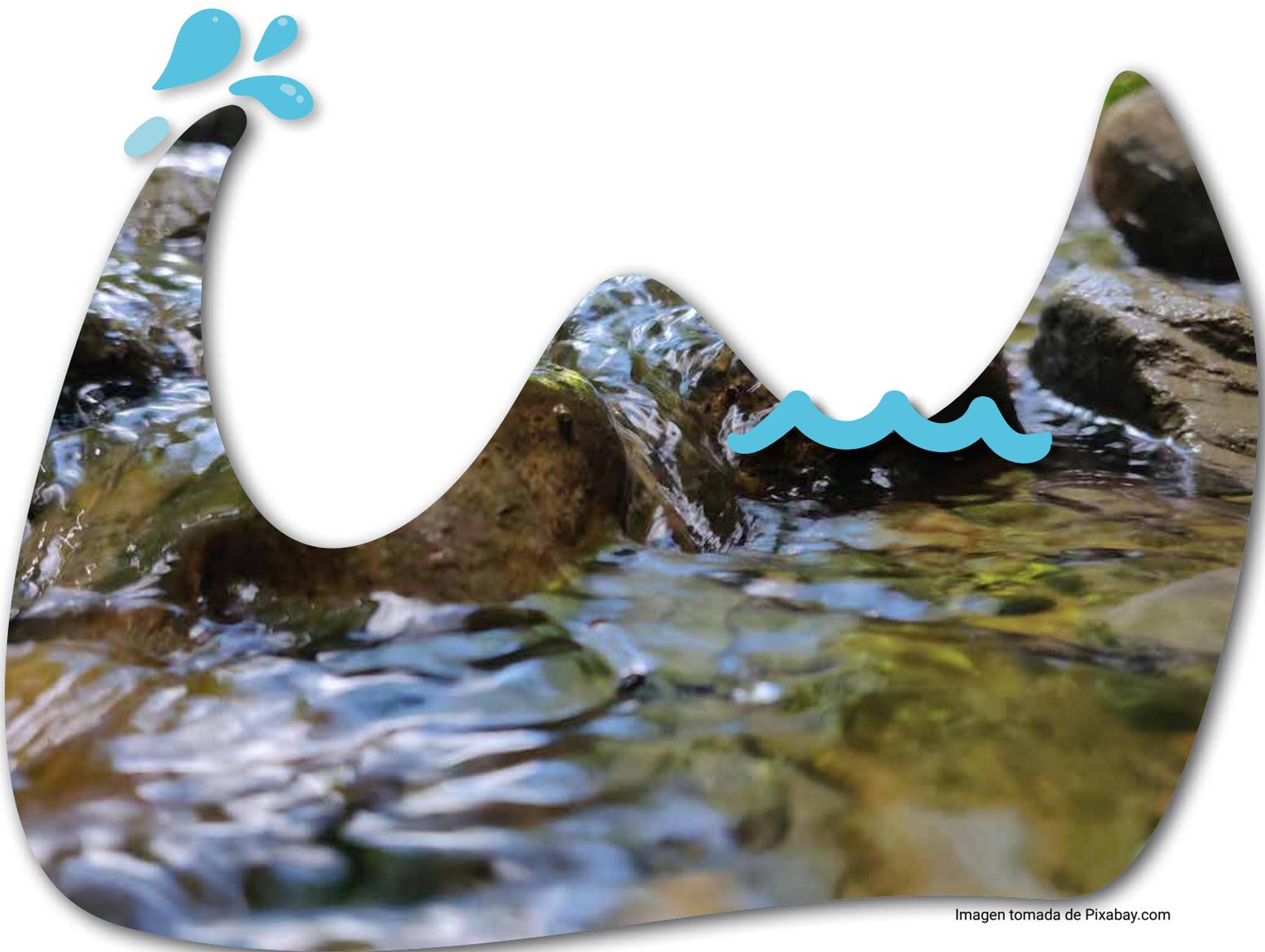


Imagen tomada de Pixabay.com

Capítulo 3

Identificación de zonas potenciales de recarga hidrogeológica mediante procesos de análisis jerárquico en el sistema acuífero La Mojana **Identification of Potential Hydrogeological Recharge Areas Through Hierarchical Analysis Processes in La Mojana Aquifer System**

Herrera-Arango, J.¹, Pérez-Peñate, A. K.¹, Rosso-Pinto, M. J.¹,
Marrugo-Negrete, J. L.¹, Paternina-Uribe, 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: jairo.herrera@geologist.com

Resumen

El conocimiento de los recursos hidrogeológicos en Colombia se considera muy bajo, pues solo algunos acuíferos cuentan con información mínima suficiente para una gestión adecuada. Esto pone en riesgo la seguridad hídrica de las poblaciones que se abastecen del recurso, como es el caso del Sistema Acuífero La Mojana (SALM), que surte la demanda hídrica de por lo menos doscientos mil habitantes solo en la jurisdicción de Corpomojana. Esta condición resalta la necesidad de investigar las variables y los factores que determinan los diferentes fenómenos que rigen el agua subterránea. El objetivo de este capítulo es determinar las zonas potenciales de recarga en el SALM, bajo condiciones de información escasa debido a la gran extensión del acuífero, el reducido número de registros de pozos y pruebas de bombeo y, especialmente, a la escala de la información cartográfica disponible. Se analiza la recarga potencial como la respuesta hidrogeológica a diferentes características regionales como la topografía, que influye sobre la hidrología y la distribución de los suelos; la litología, que controla la infiltración, los lineamientos estructurales que favorecen la permeabilidad secundaria y la geomorfología, que configura áreas que facilitan la percolación; así como el uso de descriptores hidrológicos como el Número de Curva e índices topográficos que contribuyen a esclarecer las respuestas hidrológicas del territorio. El método propuesto se fundamenta en el uso de sensores remotos y criterios de decisión espacializados, cuya evaluación y valoración se hace mediante un proceso de análisis jerárquico o AHP, por sus siglas en inglés. Los resultados obtenidos proporcionan una comprensión más completa de la distribución del agua subterránea en la subregión de La Mojana y ofrecen un mapa hidrogeológico prospectivo como soporte técnico para una gestión más eficiente; adicionalmente, sirven como herramientas para el análisis zonificado de la susceptibilidad a la contaminación del acuífero.

Palabras clave: análisis jerárquico, criterios de decisión, recarga potencial, recurso hidrogeológico, zonas potenciales de recarga.

Introducción

El 12 % de la demanda hídrica en Colombia es abastecida mediante aguas subterráneas (1); sin embargo, el estado del conocimiento de los recursos hidrogeológicos se considera muy bajo, pues de los 61 sistemas acuíferos identificados en el país, solo diecinueve (30,8 %) cuentan con la información mínima suficiente para una gestión adecuada (2).

El caso del Sistema Acuífero La Mojana, definido por IDEAM (2015) (1), es de especial interés pues la comprensión del agua subterránea y las zonas de recarga permanecen en muy bajos niveles (3,4), aunque la demanda hídrica de los más de doscientos mil habitantes que, según DANE (5), habitan en el área de la jurisdicción de la Corporación de Desarrollo Sostenible para el San Jorge y La Mojana (Corpomojana) es abastecida con recursos hidrogeológicos.

El sistema acuífero La Mojana cuenta con una extensión de 12.672 km², distribuidos en 32 municipios pertenecientes a los departamentos de Antioquia (0,3 %), Bolívar (13,3 %), Córdoba (26,4 %) y Sucre (60 %). Por su parte, la subregión de La Mojana, con una extensión de 9.097 km², está compuesta por 22 municipios de los cuales siete integran la jurisdicción de Corpomojana.

Sobre las limitaciones en el conocimiento para la gestión de los acuíferos, IDEAM (2019) (2) resalta la necesidad de potenciar la investigación de las variables y los factores que determinan los diferentes fenómenos que rigen el recurso hidrogeológico; en particular, revela la importancia de determinar las zonas potenciales de recarga de los acuíferos regionales.

La recarga hidrogeológica es la fracción de agua superficial que alimenta el acuífero mediante su infiltración a través de la zona no saturada hacia el nivel freático. Por esta razón, no solo está en función de la precipitación sino también de múltiples características del territorio, que incluyen las geomorfológicas como la pendiente, los lineamientos estructurales, la rugosidad y la curvatura del terreno, entre otros; las propiedades

del suelo, incluidas las clases texturales y la profundidad, la cobertura vegetal y la capacidad de almacenamiento hídrico y, finalmente, las propiedades hidrodinámicas de las formaciones geológicas (6,7).

De esta forma, la recarga potencial es la respuesta hidrogeológica a diferentes características regionales como la topografía, que influye sobre la hidrología y la distribución de los suelos; a la litología, que controla la infiltración, los lineamientos estructurales que favorecen la permeabilidad secundaria y la geomorfología, que configura áreas que facilitan la percolación, entre otros.

A la información regionalizada mencionada, se suma el uso de descriptores hidrológicos como el Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos e índices topográficos como el índice topográfico de humedad de laderas, los cuales ayudan a esclarecer las respuestas hidrológicas del territorio y, de esta forma, a identificar las áreas que muestran mayor susceptibilidad a la recarga de las aguas subterráneas.

La investigación de las zonas potenciales de recarga de acuíferos regionales, basada en sensores remotos y datos espacializados, es un método rápido, preciso y de bajo costo que se está implementando en áreas con poca información, especialmente en Asia y África (8,9) y que cuenta con ejemplos en Colombia (10-12).

En la evaluación y la valoración de diversos insumos cartográficos se utiliza el análisis multicriterio que, a partir de juicios informados, ofrece alternativas de integración ponderada. Existen diferentes métodos de análisis multicriterio aplicados a la delimitación de las zonas potenciales de recarga, como la teoría de la utilidad de múltiples atributos (13), la teoría de conjuntos difusos (14,15), el factor de influencia múltiple (16,17), el análisis envolvente de datos (18), Electre (19), Topsis (20); (21) y Promethee (22); sin embargo, la técnica más utilizada para describir las zonas potenciales de recarga hidrogeológica es el proceso de análisis jerárquico o AHP, por sus siglas en inglés, debido a su capacidad de integración de datos regionalizados (9,23-28).

El proceso de análisis jerárquico es una teoría sobre valoraciones y juicios técnicos, que combina lo científico y lo racional con lo intangible para sintetizar la comprensión de un fenómeno. Este proceso permite llevar un fenómeno multidimensional o multicriterio a una escala de prioridades conocidas mediante el uso de sumas ponderadas (29).

Una de las mayores bondades de la delimitación de las zonas potenciales de recarga hidrogeológica a partir de la integración de datos regionalizados con procesos de análisis jerárquicos, es la comprensión de las características que controlan los acuíferos regionales, sus procesos dominantes, sus restricciones y las áreas más susceptibles a la contaminación, entre otros. De esta forma, estas técnicas ofrecen alternativas para la toma de decisiones más precisas y rápidas, lo que contribuye a la gestión del recurso hidrogeológico (30).

El objetivo de este trabajo fue determinar las zonas potenciales de recarga de agua subterránea en el Sistema Acuífero La Mojana, bajo condiciones de información escasa debido a la gran extensión del acuífero, el reducido número de registros de pozos y pruebas de bombeo y, especialmente, a la escala de la información cartográfica disponible.

Los resultados obtenidos proporcionan una comprensión más completa de la distribución potencial del agua subterránea en la subregión de La Mojana y ofrecen un mapa hidrogeológico prospectivo que brindará soporte técnico a una gestión más eficiente del recurso hídrico; adicionalmente, sirven como herramientas para el análisis zonificado de la susceptibilidad a la contaminación del acuífero.

Para el estudio se utilizaron diez criterios de decisión: litología, densidad de lineamientos, pendiente, geomorfología, densidad de drenaje, precipitación, clase textural y profundidad del suelo, cobertura vegetal y transmisividad, a los que se sumaron cuatro índices topográficos: rugosidad y curvatura del terreno, índice

PARÁMETRO	Gradiente de la pendiente	Litología	Densidad de drenaje	Cobertura y uso del suelo	Densidad de lineamientos	Textura del suelo	Precipitación	Geomorfología	Transmisividad	ITHL	Profundidad del suelo	Curvatura del perfil	Curvatura del plano	IPT	Rugosidad	Número de Curva
Arulbajali <i>et al.</i> , 2019	4	3	-	2	3	3	5	1	-	5	-	6	6	6	6	-
Ahmed y Al-Manmi, 2019	3	1	6	4	2	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kumar <i>et al.</i> , 2018	2	1	3	1	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Eko y Hardiman, 2018	4	2	5	1	6	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yeh <i>et al.</i> , 2016	3	1	3	4	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jasrotia <i>et al.</i> , 2016	3	-	4	2	-	6	-	1	5	-	-	-	-	-	-	-
Badamasi <i>et al.</i> , 2016	3	1	2	4	1	3	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-
Mohmoud <i>et al.</i> , 2014	3	-	-	4	-	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Suganti <i>et al.</i> , 2013	-	2	4	5	4	3	4	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Kaliraj y Chandrasekar, 2013	8	7	9	5	1	9	3	2	4	-	6	-	-	-	-	-
Hammouri <i>et al.</i> , 2012	1	2	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

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

Partiendo de la comprensión de las respuestas hidrológicas y geomorfológicas, que a escala de parcela representan cada uno de los índices topográficos, resulta posible usarlos en reemplazo de otras coberturas con mayores grados de complejidad en su elaboración y clasificación; de esta forma, la integración de los índices de humedad de laderas, posición topográfica, rugosidad y curvatura del terreno, pueden sustituir apropiadamente los mapas de unidades geomorfológicas, profundidad y clases texturales del suelo y transmisividad.

Litología

El Sistema Acuífero La Mojana cuenta con sedimentos que abarcan desde el Oligoceno hasta el Reciente con fuertes afectaciones tectónicas derivadas de la interacción de las placas Caribe y Suramérica (39-44).

Al ser la litología un indicador importante de las características hidrogeológicas del acuífero y de su sistema de recarga (45,46), se extrajeron las formaciones geológicas del Atlas Geológico de Colombia (47) y se les asignaron rangos de injerencia en el potencial de recarga según las descripciones reportadas en los diferentes estudios locales y regionales, en especial sobre las características de los afloramientos de cada unidad. Los mayores valores se otorgaron a los sedimentos no consolidados de las formaciones Sincelejo y Betulia, mientras que los más bajos fueron destinados a la Formación El Carmen y a las rocas cristalinas.

Formación Ciénaga de Oro: se trata de una secuencia de areniscas finas a conglomeráticas, limolitas, lutitas ligeramente calcáreas a carbonosas y lentes de carbón, depositada sobre el basamento del Valle Inferior del Magdalena, en ambientes que varían de marino somero en la base, a deltaicos en el resto de la columna (40,41,48-50).

Formación El Carmen: también conocida como Formación Porquera; se compone de lodolitas, shales calcáreos y algo de yeso; debido a su carácter limolítico a arcilloso se considera de muy baja permeabilidad y capacidad de infiltración (51,52). Su parte basal se depositó en ambiente marino con profundidades entre 200 m y 600 m, mientras que el segmento superior es consistente con llanuras deltaicas (49,53,54).

Formación Cerrito: también conocida como Tubará o Porquera Superior; se compone de areniscas finas a gruesas, areniscas conglomeráticas y conglomerados, con intercalaciones de lutitas fosilíferas y mantos de carbón hacia el techo (54). Se depositó en ambientes de abanicos submarinos, plataforma, borde de talud y deltaico (41,42,55). Es un acuífero regional de gran importancia en el Sistema Acuífero Bajo Cauca Antioqueño, localizado al sur del SALM.

Formación Sincelejo: es una potente unidad de areniscas de grano fino a conglomeráticas, con estratificación cruzada y variaciones locales a facies lodosas, depositada en ambientes someros de muy baja energía. Las capas de arenitas y arcillolitas están poco consolidadas, lo que indica procesos débiles de enterramiento, litificación y diagénesis (49,50,52,53,55,56). El segmento superior corresponde al acuífero de Morroa, compuesto por gravas y arcillolitas.

Formación Betulia: también llamada El Descanso y Caucasia; está compuesta por sedimentos fluviolacustres, principalmente arcillas arenáceas y limos, con cambios frecuentes de facies (51,52,57,58). La presencia de zonas arcillosas y otras arenosas, ha llevado a proponer su división en miembro superior e inferior (59-61) o sugerir que se trata de dos formaciones diferentes (62); sin embargo, Clavijo y Barrera (2001) consideran que son cambios frecuentes de facies típicos, con depositación en ambientes fluviales de muy baja energía (55).

Depósitos aluviales cuaternarios: se trata de terrazas compuestas por limos areno-arcillosos y arenas con fragmentos de roca; abanicos aluviales con depósitos mixtos que capturan la escorrentía favoreciendo la infiltración y llanuras de inundación formadas por limos, arenas y gravas pobremente consolidados (62-66).

Geomorfología

Desde el punto de vista geomorfológico, el área presenta siete unidades, así:

Cono aluvial del río Cauca – Cinturón de avulsión: descrito por Martínez en 1981 como una acumulación de 100 km de largo, 75 km de ancho, que ocupa el 90 % del área de la planicie inundable de La Mojana. Presenta tres pendientes principales: N-S, SW-NE y SE-NW (67). Su parte distal termina en las depresiones cenagosas del Magdalena y del San Jorge.

El cinturón de avulsión formado sobre el cono aluvial del río Cauca, cuya área se estima en 3.457,3 km², produce secuencias de arcillas, limos, arenas finas y cintas arenosas de configuración sinuosa, con cambios frecuentes de facies. En general, este tipo de depósitos se ha reconocido por favorecer la infiltración en áreas arcillosas (68,69).

Abanicos aluviales menores: sobre la margen izquierda del río San Jorge se presentan diferentes abanicos aluviales, entre los que resalta el abanico de Santiago (70). Este es un depósito de gran tamaño que afecta el cauce del río San Jorge y del caño Grande de Santiago a lo largo de 17 km entre las ciénagas La Villa y Santiago. Estos abanicos constituyen áreas de almacenamiento hídrico temporal que facilitan la infiltración de una porción de la escorrentía atrapada.

Paludales: se localizan principalmente en el sector septentrional de La Mojana en la zona de descarga de los caños Mojana y Panceagüita, también se observan a lo largo de la llanura de inundación del río San Jorge. Se trata de planos de inundación inclinados hacia las ciénagas, razón por la cual están principalmente compuestos por limos y arenas finas con abundante materia orgánica. Se consideran de baja capacidad de infiltración debido a la granulometría de los materiales que los componen (63).

Llanuras inundación: corresponden con los depósitos de los arroyos que drenan las formaciones Sincelejo y Betulia. Estas llanuras muestran pendientes muy bajas y granulometría mixta producto de sedimentación detrítica, por lo que ofrecen muy buenas condiciones para favorecer la recarga hídrica.

Laderas levemente inclinadas con colinas residuales: están compuestas por sedimentos poco consolidados con pendientes bajas a muy bajas y una red de drenaje dendrítica de alta densidad que favorecen los procesos de infiltración.

Colinas medias: corresponde a la cabecera del arroyo Santiago, en el municipio de Ciénaga de Oro, donde se presentan colinas medias con una red de drenaje dendrítica de baja densidad.

Colinas bajas: se presenta como un paisaje de lomerío en una franja con dirección norte – sur, localizada hacia el extremo occidental del sistema acuífero; consiste en un área de colinas alargadas con una densidad de drenaje moderada a densa. Esta zona se considera de moderada capacidad de infiltración.

Terrazas aluviales: constituidos por lentes de gravas intercalados con arenas conglomeráticas, limos y arcillas, que se consideran zonas con baja capacidad de infiltración (61,63).

Cuerpos de agua: se trata de todos los elementos del complejo cenagoso de La Mojana, cuya interacción ciénaga – río permite concluir sobre una capacidad de infiltración moderada.

Gradiente de la pendiente

Además de influir sobre la distribución y el almacenamiento hídrico, la pendiente controla la relación entre la escorrentía y la infiltración de la precipitación en el acuífero, de esta forma, las áreas con pendientes menores muestran bajos gradientes hidráulicos que favorecen la infiltración. Por el contrario, en áreas con fuertes pendientes el flujo tendrá mayor energía y no contarán con el tiempo suficiente para que ocurra la infiltración (71–74).

El modelo de elevación digital del Sistema Acuífero La Mojana fue extraído del SRTM (75) para generar el mapa de pendientes que, posteriormente, fue reclasificado a partir de los gradientes de la pendiente, presentados por FAO (76) en la **Tabla 3-2**.

Tabla 3-2. Gradiente de la pendiente

Gradiente de la pendiente	Pendiente (%)
Plano	<0,2
Nivel	0,2 – 0,5
Cercano a nivel	0,5 – 1,0
Muy ligeramente inclinado	1,0 – 2,0
Ligeramente inclinado	2,0 – 4,0
Inclinado	4,0 – 10,0
Fuertemente inclinado	10,0 – 15,0
Moderadamente escarpado	15,0 – 30,0
Escarpado	30,0 – 60,0
Muy escarpado	>60,0

Fuente: FAO (2009) (76).

En la mayor parte del Sistema Acuífero La Mojana, el 63,6 % presenta pendientes inferiores al 5 %; mientras que el 93,1 % del área muestra pendientes menores al 10 %.

Textura del suelo

Las características hidráulicas de las diferentes clases texturales son factores esenciales en la identificación de las zonas potenciales de recarga hidrogeológica (37,77,78), pues la capacidad de retención hídrica y la permeabilidad del suelo son parámetros propios de cada clase (74). Las clases compuestas por partículas gruesa, como los suelos arenosos, promueven la transmisividad y los valores altos de infiltración; en tanto

que aquellas conformadas por partículas muy finas, como los suelos arcillosos densos, inducen a valores muy bajos de infiltración (34,74,79-81).

El mapa de textura del suelo del Sistema Acuífero La Mojana se preparó a partir de los mapas de suelos y zonificación de tierras de los departamentos de Bolívar (82), Córdoba (83), Magdalena (84) y Sucre (85). Estos mapas fueron reclasificados en cuatro clases texturales, según la capacidad de respuesta a los impulsos hidrológicos (76).

Profundidad del suelo

La profundidad de suelo es un factor importante en términos de volumen de infiltración y tiempo requerido para alcanzar el nivel freático: los suelos más gruesos mostrarán una mayor capacidad de infiltración, mientras que los suelos delgados junto con las rocas desnudas favorecen la escorrentía superficial (34,86,87).

Para la elaboración del mapa de profundidades del suelo, se consideró de potencial muy alto aquellos suelos reportados como muy profundos, y de muy bajo potencial aquellos indicados como muy superficiales en los mapas departamentales de suelos mencionados antes.

Densidad de drenaje

La densidad de drenaje, definida como la longitud total de canales por unidad de área de la cuenca (88), describe el espaciamiento y la distribución de las corrientes, o visto de otra forma, representa la cantidad de canales requeridos para drenar una cuenca (89-91). Este parámetro está controlado por la transmisividad del terreno, a mayor valor menor densidad de drenaje y viceversa (92).

La densidad de drenaje se derivó del modelo de elevación digital de la NASA (75). Los valores más bajos se asocian con baja escorrentía y tasa de infiltración comparativamente mayor, mientras que los valores altos corresponden a zonas de mayor escorrentía y, por lo tanto, menor tasa de infiltración.

Densidad de lineamientos

Los lineamientos se asocian con patrones lineales derivados de actividad tectónica, como drenajes con tramos rectos, crestas topográficas y alineación de bordes de ciénagas, entre otros. A partir del modelo de elevación digital del SRTM de la NASA (75) se trazaron los lineamientos y posteriormente se determinó su densidad. En el Sistema Acuífero La Mojana resaltan los valores altos, mayores a 50 m/km², correspondientes a las áreas de intersección de las zonas de fallas de San Jorge, Sucre y Loba, consideradas como áreas con muy alto potencial de recarga hidrogeológica.

Transmisividad

Este parámetro, producto de la conductividad hidráulica promedio y el espesor saturado del acuífero, es altamente variable en condiciones de flujo no confiado (81). Para la elaboración del mapa de transmisividad se utilizó la información reportada para las diferentes unidades hidrogeológicas que componen el Sistema Acuífero La Mojana (62,64-66).

Uso de la tierra

Las categorías de uso y cobertura de la tierra se reclasificaron a partir del mapa de coberturas de la tierra, elaborado por IDEAM mediante la metodología Corine Land Cover (93). Se consideran de bajo potencial las áreas urbanizadas, mineras y desnudas; a diferencia de las zonas agrícolas heterogéneas y los bosques de bajo inundable que se toman como de alto potencial (73,94).

Número de Curva

El modelo empírico de Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos califica la capacidad del terreno para generar escorrentía superficial en función de la permeabilidad del suelo, el uso de la tierra y la humedad antecedente, que permiten evaluar tres condiciones: seca -NC_I, normal -NC_{II} y húmeda -NC_{III}. Este último fue el utilizado para el análisis de las zonas potenciales de recarga debido a que representa la condición de suelo saturado. Los valores bajos representan mayor capacidad de infiltración y, por lo tanto, reciben la calificación más alta (38,95,96).

Para la preparación de este mapa se utilizó el método presentado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (95), la información sobre cobertura vegetal ofrecida por IDEAM (93) y los mapas departamentales de suelos elaborados por IGAC (82-85).

Índice topográfico de humedad de laderas (ITHL)

Este índice revela la función de la topografía en los procesos hidrológicos, entre ellos el potencial de captura de humedad del terreno a partir del gradiente de la pendiente y la acumulación del flujo, cuyas representaciones están altamente correlacionadas con la profundidad y la textura del suelo (97-100). Cuanto mayor es el valor del índice, mayor la humedad de la parcela y, por lo tanto, mayor su potencial de recarga (34,101,102). La ecuación 1, presentada por Beven y Kirkby, permite obtener el ITHL a partir del modelo de elevación digital utilizando la razón entre los mapas de flujo acumulado y pendientes en radianes (97).

$$ITHL = Ln \left(\frac{\text{Flujo Acum}}{\text{Pendiente_Rads}} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Índice de posición topográfica

Este índice es un algoritmo ampliamente utilizado en la medición y la clasificación de accidentes topográficos, pues sus resultados se correlacionan con los diferentes elementos geomorfológicos (37,103,104). Los valores obtenidos para el Sistema Acuífero La Mojana se distribuyen así: muy bajos para las zonas de paludales, bajos para las planicies inundables, moderado para las laderas inclinadas, alto para las zonas de colinas y muy alto para las crestas. El mapa se elaboró a partir del modelo de elevación digital SRTM con la fórmula propuesta por Jenness (Ecuación 2) que considera la elevación del punto evaluado (C_o), la elevación media del vecindario (\hat{C}) y la desviación estándar de la elevación del vecindario (σ) (103).

$$IPT = \frac{C_o - \hat{C}}{\sigma} \quad \text{Ecuación 2}$$

Índice de rugosidad del terreno

El índice de rugosidad del terreno se calcula como el cambio medio de elevación entre una celda central y sus vecinos definidos por el usuario (105). En este índice, la celda central se usa como referencia en lugar del valor promedio de las celdas dentro de la ventana móvil definida, lo que enfatiza la rugosidad. Por esta razón, es muy efectivo para resaltar las características del terreno, especialmente en un análisis a pequeña escala (106).

Este índice expresa la ondulación de la topografía, a mayor rugosidad, mayor ondulación y viceversa. La topografía ondulada es característica de regiones montañosas donde la meteorización y los procesos

geomórficos modifican continuamente el paisaje (37,105,107,108). En términos de recarga, serán las áreas con índice de rugosidad más bajo las que se clasifiquen con mayor potencial (35). El mapa de rugosidad fue elaborado a partir del modelo de elevación digital de la NASA (75).

Mapas de curvatura

La curvatura topográfica muestra dos componentes: 1) la curvatura del perfil, que es paralela a la dirección de la máxima pendiente y refleja áreas de desaceleración y acumulación del flujo a través de sus valores cercanos a cero y negativos; y 2) la curvatura del plano, perpendicular a la dirección de máxima pendiente, que indica zonas de convergencia de flujo a través de los valores negativos (35,36,109). Los mapas de curvatura se derivaron del modelo de elevación digital.

Los rangos asignados a los criterios evaluados se presentan en la **Tabla 3-3**. Los mapas generados para los parámetros analizados se muestran en la **Figura 3-1**.

Tabla 3-3. Rangos asignados a los criterios evaluados

Litología	Rango asignado	Área ocupada (%)	Geomorfología	Rango asignado	Área ocupada (%)
Fm El Carmen	0,1	0,3 %	Cuerpo de agua	2,5	2,7 %
Rocas cristalinas y metamórficas	0,1	0,2 %	Paludales	2,5	31,4 %
Fm Ciénaga de Oro	2	0,7 %	Colinas medias	5	9,0 %
Paludales	4	26,1 %	Laderas onduladas y colinas residuales	5	0,7 %
Cinturón de avulsión	6	25,3 %	Terrazas aluviales	5	9,1 %
Depósitos aluviales	6	8,4 %	Colinas bajas	7,5	27,5 %
Abanicos aluviales	8	2,7 %	Llanuras de inundación	7,5	8,2 %
Fm Cerrito	8	2,6 %	Abanicos aluviales	10	10,3 %
Fm Betulia	8	27,5 %	Cinturón de avulsión	10	1,0 %
Fm Sincelejo	10	6,1 %			

Gradientes de la pendiente	Rango asignado	Área ocupada (%)	Textura	Rango asignado	Área ocupada (%)
Plano (<0,2 %)	10	9,0 %	Arcillosa	2,5	22,5 %
Nivel (0,2 %-0,5 %)	9	0,1 %	Franco arcillosas	5	32,4 %
Cercano a nivel (0,5 %-1,0 %)	8	3,5 %	Franco limosas	7,5	22,2 %
Muy ligeramente inclinado (1,0 %-2,0 %)	7	11,0 %	Arenosas – franco arenosas	10	22,9 %
Ligeramente inclinado (2,0 %-4,0 %)	6	26,7 %	Profundidad del suelo	Rango asignado	Área ocupada (%)
Inclinado (4,0 %-10,0 %)	5	42,8 %	Muy superficial	2,5	37,3 %
Fuertemente inclinado (10,0 %-15,0 %)	2	5,4 %	Superficial	5	24,0 %
Moderadamente escarpado (15,0 %-30,0 %)	1	1,3 %	Moderadamente profundo	7,5	36,6 %
Escarpado (30,0 %-60,0 %)	0,5	0,1 %	Muy profundo	10	2,1 %
Muy escarpado (>60,0 %)	0,1	0,1 %			

Capítulo 3 • Identificación de zonas potenciales de recarga hidrogeológica mediante procesos de análisis jerárquico en el sistema acuífero La Mojana

Densidad de drenaje	Rango asignado	Área ocupada (%)	Densidad de lineamientos	Rango asignado	Área ocupada (%)
<0,50 km/km ²	10	8,7 %	<8,0 km/km ²	2,5	39 %
0,51 – 1,0 km/km ²	8	7,0 %	8,1 – 20,0 km/km ²	5	32,5 %
1,01 – 1,5 km/km ²	6	26,5 %	20,1 – 30,0 km/km ²	7,5	16,1 %
1,51 – 1,90 km/km ²	4	41,9 %	>30,0 km/km ²	10	12,4 %
1,91 – 2,20 km/km ²	2	9,7 %			
>2,21 km/km ²	1	6,2 %			

Transmisividad	Rango asignado	Área ocupada (%)	Densidad de lineamientos	Rango asignado	Área ocupada (%)
<50,0 m ² /día	2,5	35,5 %	<8,0 km/km ²	2,5	39 %
50,1 – 100,0 m ² /día	5	36,9 %	8,1 – 20,0 km/km ²	5	32,5 %
>100,1 m ² /día	7,5	27,6 %	20,1 – 30,0 km/km ²	7,5	16,1 %
			>30,0 km/km ²	10	12,4 %

Número de Curva (NCIII)	Rango asignado	Área ocupada (%)	Cobertura y uso del suelo	Rango asignado	Área ocupada (%)
5,0 – 25,0	10	8,2 %	Zonas urbanizadas, mineras, quemadas	2,5	1,4 %
25,1 – 50,0	7,5	7,3 %	Bosques, herbazales	5	19,7 %
50,1 – 75,0	5	37,6 %	Agrícolas, pastos, transitorios	7,5	71,0 %
>75,0	2,5	46,9 %	Cuerpos de agua	10	7,9 %

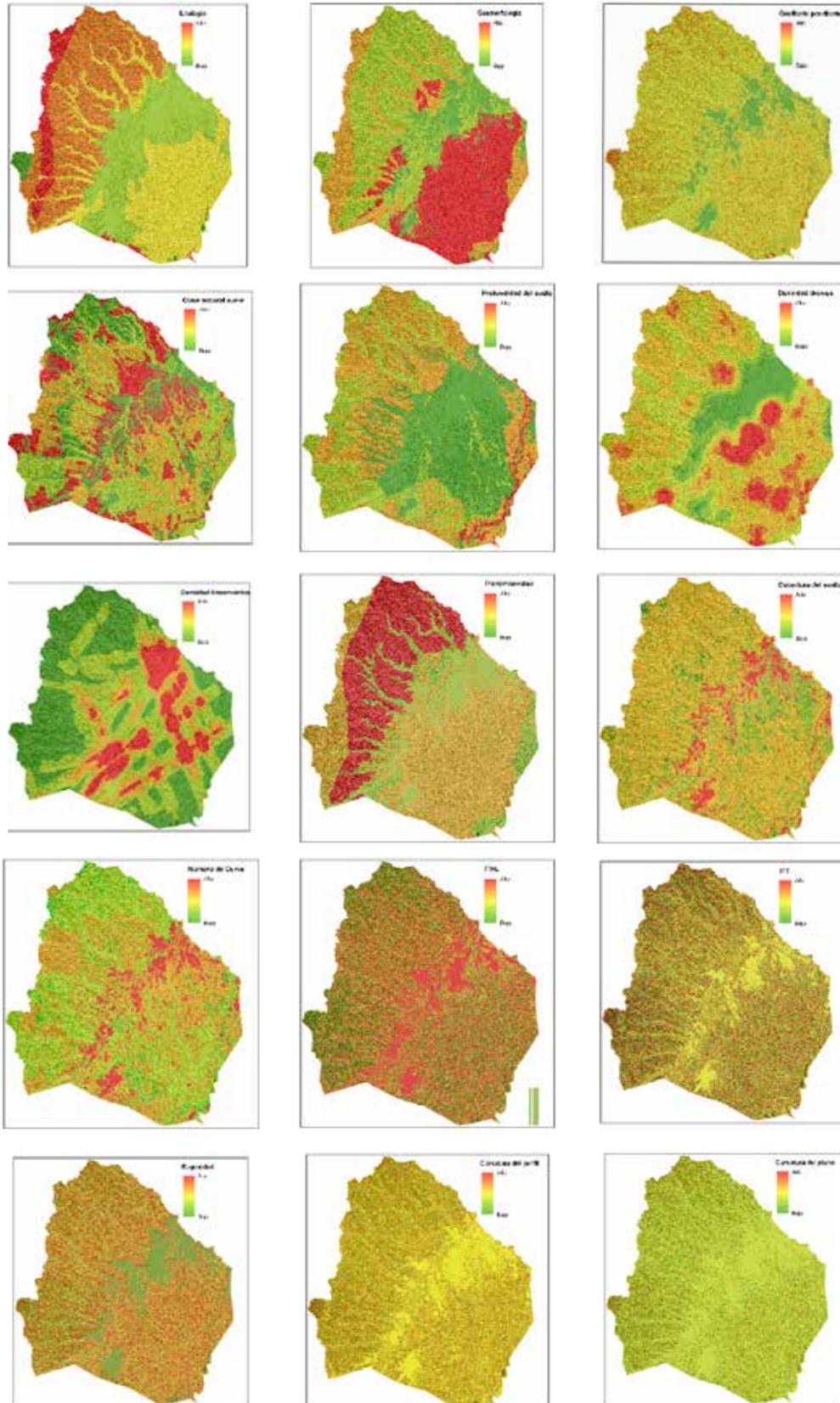
Índice de posición topográfica	Rango asignado	Área ocupada (%)	Índice topográfico de humedad de ladera	Rango asignado	Área ocupada (%)
<15,0	10	21,5 %	<5,50	2,5	24,2 %
15,1 – 45,0	8	43,7 %	5,50 – 6,20	5	25,2 %
45,1 – 75,0	6	12,3 %	6,21 – 7,70	7,5	25,7 %
75,1 – 150,0	4	18,0 %	>7,70	10	24,9 %
>150,0	2	4,5 %			

Curvatura del perfil	Rango asignado	Área ocupada (%)	Índice de rugosidad topográfica	Rango asignado	Área ocupada (%)
< -1,1	10	0,8 %	<0,23	10	5,4 %
-1,11 – -0,02	8	26,2 %	0,24 – 0,41	8	15,7 %
-0,02 – 0,02	6	39,0 %	0,42 – 0,52	6	35,2 %
0,02 – 1,1	4	33,1 %	0,53 – 0,64	4	32,0 %
>1,1	2	0,9 %	>0,64	2	11,7 %

Curvatura del plano	Rango asignado	Área ocupada (%)
< -0,6	10	17,1 %
-0,6 – -0,05	8	1,4 %
-0,05 – 0	6	64,3 %
0 – 0,1	4	1,6 %
>0,1	2	15,6 %

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

Figura 3-1. Mapas de los parámetros analizados



Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361 a partir de las fuentes citadas para cada criterio.

Análisis jerárquico

El proceso de análisis jerárquico, desarrollado por Saaty (1980), es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones complejas que se ejecuta en tres pasos (110): el primero es la creación de la matriz de comparación por parejas de factores influyentes sobre el fenómeno analizado (23). Esta matriz reduce la complejidad del análisis a un solo nivel obteniéndose el orden de jerarquía relativa para cada uno de los criterios juzgados (34,111). En este paso se califican los pares utilizando una escala de importancia relativa, donde uno indica igual relevancia y nueve la importancia absoluta de un elemento sobre el otro.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{...} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{33} & a_{...} & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{...} & a_{3n} \\ a_{...} & a_{...} & a_{...} & a_{...} & a_{...n} \\ a_{n1} & a_{...} & a_{...} & a_{...} & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Donde a^n muestra la n-ésima unidad indicadora y a^{nn} es el elemento de la matriz de evaluación.

El segundo paso consiste en determinar los pesos normalizados como se muestra en la Ecuación 3; donde W es el autovector y GM es la media geométrica de cada fila de la matriz.

$$W_n = \frac{MG}{\sum_{n-1} MG} \quad \left| \text{Ecuación 3} \right.$$

El último paso, es la comprobación de la consistencia (Ecuación 4) de los pesos normalizados asignados a los criterios mediante el cálculo del índice de consistencia que debe ser inferior a 0,01; en caso de no cumplirse esta condición será necesario reiniciar la comparación de los pares.

$$RC = \frac{IC}{ICA} \quad \left| \text{Ecuación 4} \right.$$

Donde RC es el radio de consistencia, IC es el índice de consistencia, calculado usando la ecuación 5, e ICA es el índice de consistencia aleatorio, que toma valores de 0,00 si el tamaño de la matriz es de 1 o 2, y toma valores de 0,52, 0,89, 1,11, 1,25, 1,35, 1,40, 1,45, 1,49 y 1,51 para un tamaño de matriz de 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11, respectivamente (110)

$$IC = \frac{(\lambda_{m\acute{a}x} - n)}{(n - 1)} \quad \left| \text{Ecuación 5} \right.$$

Se seleccionaron cuatro configuraciones diferentes de variables con el fin de identificar los impactos de estas en la identificación de las zonas potenciales de recarga hidrogeológica: grupo 1, compuesto por las ocho variables regionalizadas de uso más frecuente en la literatura especializada; grupo 2, conformado por la densidad de lineamientos, todos los índices topográficos y el hidrológico; grupo 3, integrado por los tres índices topográficos seleccionados y el descriptor hidrológico; y grupo 4, creado con los dieciséis parámetros analizados.

La escala de Saaty fue gestionada y validada mediante juicio de expertos y los cálculos del proceso de análisis jerárquico se ejecutaron en la aplicación AHP Online System –AHP-OS (112).

Resultados y discusión

El análisis de los criterios principales, utilizados en la literatura especializada con fines de identificación de las zonas potenciales de recarga hidrogeológica y presentados en la **Tabla 3-4.**, muestra que el 52 % de las investigaciones considera la litología como el factor de mayor influencia en la delimitación de zonas potenciales de recarga hidrogeológica, seguida por el gradiente de la pendiente, la densidad de lineamientos y la geomorfología, con 16 % cada uno.

Tabla 3-4. Frecuencia de uso de criterios en la literatura especializada

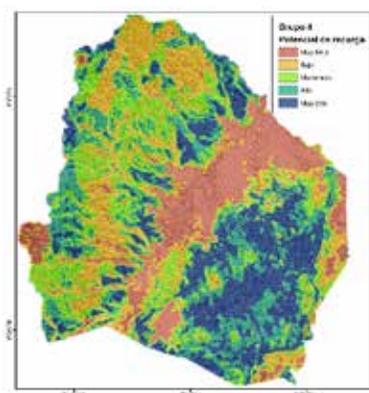
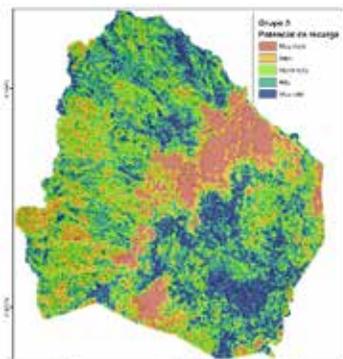
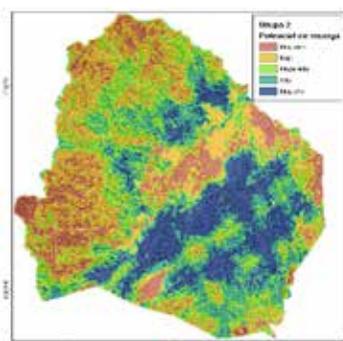
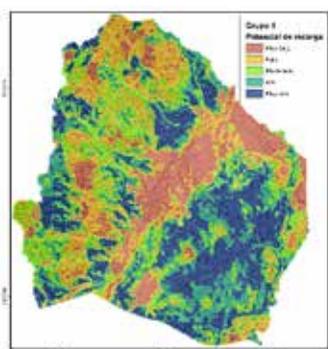
Criterio	Uso	Criterio			
		1°	2°	3°	4°
Gradiente de la pendiente	96,0 %	16,0 %	12,0 %	32,0 %	16,0 %
Litología	88,0 %	52,0 %	16,0 %	12,0 %	0,0 %
Densidad de drenaje	88,0 %	4,0 %	8,0 %	28,0 %	20,0 %
Cobertura y uso del suelo	84,0 %	8,0 %	24,0 %	0,0 %	28,0 %
Densidad de lineamientos	76,0 %	16,0 %	12,0 %	12,0 %	12,0 %
Textura del suelo	76,0 %	4,0 %	8,0 %	16,0 %	12,0 %
Precipitación	52,0 %	4,0 %	16,0 %	20,0 %	4,0 %
Geomorfología	52,0 %	16,0 %	20,0 %	8,0 %	4,0 %
Transmisividad	16,0 %	-	4,0 %	-	8,0 %
ITHL	16,0 %	-	4,0 %	4,0 %	-
Profundidad del suelo	12,0 %	-	-	-	4,0 %
Curvatura del perfil	12,0 %	-	4,0 %	-	-
Curvatura del plano	12,0 %	-	-	-	-
IPT	8,0 %	-	-	-	-
Rugosidad	8,0 %	-	-	-	-
Número de Curva	4,0 %	-	-	4,0 %	-

Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361 a partir de autores indicados en la **Tabla 3-1.**

El análisis de los cuatro modelos de zonificación potencial de recarga hidrogeológica (**Tabla 3-5**), mostró patrones consistentes y diferencias significativas derivadas de los insumos utilizados, así:

1. Consistencia entre modelos: Los grupos 1 y 3 mostraron las mayores similitudes en resultados. El grupo 1, basado en ocho variables comúnmente utilizadas en la literatura, y el grupo 3, compuesto por tres índices topográficos y el Número de Curva, proporcionaron las zonificaciones más coherentes.

Tabla 3-5. Resultados de la ponderación de parámetros



Parámetros	Ponderación
Densidad de lineamientos	21,7 %
Gradiente de la pendiente	15,7 %
Litología	12,8 %
Cobertura y uso del suelo	11,6 %
Textura del suelo	9,4 %
Geomorfología	8,4 %
Profundidad del suelo	7,5 %
Densidad de drenaje	7,5 %
Precipitación	5,5 %

Parámetros	Ponderación
Densidad de lineamientos	19,6 %
ITHL	18,3 %
Rugosidad	17,9 %
Densidad de drenaje	12,6 %
IPT	11,7 %
Curvatura del perfil	10,3 %
Curvatura del plano	9,6 %

Parámetros	Ponderación
Número de Curva	34,0 %
ITHL	28,1 %
Rugosidad	23,9 %
Densidad de drenaje	14,0 %

Parámetros	Ponderación
Densidad de lineamientos	13,2 %
ITHL	10,4 %
Gradiente de la pendiente	9,2 %
Geomorfología	7,9 %
IPT	6,7 %
Número de curva	6,6 %
Uso y cobertura del suelo	6,4 %
Litología	5,8 %
Textura del suelo	5,3 %
Transmisividad	5,1 %
Rugosidad	4,9 %
Profundidad del suelo	4,5 %
Precipitación	3,5 %
Densidad de drenaje	3,5 %
Curvatura del plano	3,5 %
Curvatura del perfil	3,5 %

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

2. Importancia de la geomorfología: los índices topográficos, que reflejan el comportamiento hidrológico superficial, destacaron la importancia de las zonas de falla y el cinturón de avulsión para la captura hídrica y la recarga hidrogeológica.
3. Zonas con alto potencial de recarga: el cono aluvial del río Cauca emergió como un área relevante y resaltando las evidencias geomorfológicas de la actividad tectónica, en particular de las fallas de Sucre, San Jorge y Loba; así como las características propias de los cinturones de avulsión, como múltiples canales aluviales y áreas de almacenamiento hídrico.
4. Abanicos aluviales occidentales: los cuatro modelos resaltaron la importancia de los abanicos aluviales al oeste de la llanura de inundación del río San Jorge, con el abanico de Santiago que se destaca por su tamaño y potencial de recarga.
5. Influencia de las zonas de falla: la relevancia de estas estructuras geológicas se resaltó en los cuatro modelos, incluso en el grupo 3, donde los índices topográficos capturaron su impacto de forma indirecta.
6. Efecto de la proximidad a los canales aluviales: los grupos 2 y 3, basados en índices topográficos, enfatizaron la cercanía a los canales aluviales como un factor favorable para la recarga. Sin embargo, en los grupos 1 y 4, la inclusión de variables regionalizadas con escalas 1:100.000 pareció moderar esta influencia.
7. Utilidad de la información obtenida de modelos de elevación digital: el grupo 2, obtenido a partir de seis índices topográficos y la densidad de lineamientos, muestra con más detalle las diferentes categorías de potencial hidrogeológico respecto a otros tres grupos. Por su parte, el grupo 3 sobrestima la recarga de las serranías de San Jacinto y San Jerónimo.

En cuanto a la distribución porcentual de áreas con potencial de recarga, existe una notable variación en la distribución de las categorías de zona potencial de recarga hidrogeológica entre los cuatro grupos, que se explica por los diferentes enfoques y variables utilizadas, como se muestra en la siguiente **Tabla 3-6**.

Tabla 3-6. Porcentaje de área clasificada según el potencial de recarga hidrogeológica

ZPRH	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Muy baja	16,5	7,3	9,2	16,5
Baja	21,4	11,4	13,1	18,9
Moderada	19,8	22,2	38,4	21,1
Alta	20,5	26,9	33,9	22,3
Muy alta	21,8	32,2	5,3	21,1

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

Los grupos 1 y 4 presentan distribuciones más uniformes con porcentajes que oscilan entre 16,5 % y 22,3 %, lo cual parece reflejar el carácter regional de la información utilizada. Adicionalmente, estos grupos coinciden en la valoración del potencial como muy bajo, con 16,5 %.

Por su parte, el grupo 2 muestra una tendencia hacia un mayor potencial de recarga, con un 59,1 % del área, en las categorías de alta a muy alta potencialidad. Mientras que el grupo 3 presenta los mayores porcentajes en la clasificación moderada con 38,4 % y aunque también señala valores altos para alto potencial, es el más conservador sobre la categoría de muy alto potencial, con tan solo 5,3 %.

Al comparar el grupo 2 con los grupos 1 y 4, se observan diferencias significativas en las áreas de mayor y potencial de recarga, donde el grupo 2 es el más optimista en su clasificación para ambas comparaciones. El grupo 2 parece mostrar mayor sensibilidad a factores que favorecen la recarga, en tanto que los grupos 1 y 4 distribuyen los porcentajes con más uniformidad entre todas las categorías.

La comparación entre los grupos 1 y 3 sugiere que, aunque ambos identifican un potencial de recarga favorable, difieren significativamente en la clasificación de las áreas con potencial muy alto y moderado.

Los grupos 1 y 4 son altamente concordantes en sus clasificaciones y parecen reflejar las características de las variables regionalizadas y disponibles a escalas pequeñas de 1:100.000.

Los grupos 2 y 3 son más favorables a la recarga que los anteriores; sin embargo, difieren en la distribución del potencial de recarga, donde el grupo 2 es el más optimista en la clasificación muy alto potencial. Por su parte, el grupo 3 se concentra más en las categorías moderado y alto.

En resumen, los grupos 2 y 4 presentan las diferencias más significativas al evaluar el potencial de recarga hidrogeológica. El grupo 2 es más optimista al reflejar una mayor sensibilidad a los factores que favorecen la recarga, identificando una mayor proporción de áreas con alto y muy alto potencial. Por el contrario, el grupo 4 ofrece una perspectiva conservadora, distribuyendo las áreas más uniformemente entre todas las categorías de potencial.

Un resultado importante para la gestión del recurso hidrogeológico en zonas con información escasa es la consistencia de los resultados obtenidos a partir de los índices topográficos derivados de modelos de elevación digital, frente al uso de las ocho variables regionalizadas más usadas en la literatura especializada y que presentan altas incertidumbres debido a las escalas de la información georreferenciada y las metodologías de captura de datos.

Conclusiones

Los resultados obtenidos con los ocho parámetros más utilizados en la literatura son altamente coincidentes con los logrados utilizando el Número de Curva, el índice de humedad de laderas, la rugosidad y la densidad de drenaje (Grupo 3). Esta combinación se ofrece como una muy buena alternativa para el análisis de sistemas acuíferos con poca información.

El peso de las variables regionalizadas, representadas por grandes polígonos, incrementan las áreas consideradas como de muy bajo potencial de recarga en la zona de paludales y en la llanura de inundación del río San Jorge; por el contrario, cuando el grupo analizado es dominado por los índices topográficos, el potencial aumenta notablemente en estas regiones.

El número de curva muestra un mejor desempeño en la identificación de zonas potenciales de recarga al combinarse con índices topográficos, en particular con el índice topográfico de humedad de ladera y con la rugosidad. Cuando participa en otras combinaciones que incluyen otras variables regionalizadas tiende a reducir la capacidad de recarga de áreas con alto potencial, como los afloramientos de la Formación Sincelejo y los abanicos aluviales.

Debido a los pocos datos utilizados para asignar la transmisividad a las unidades litológicas, este parámetro ofrece muy bajo grado de certeza en los modelos, razón por la cual no se consideró apropiado continuar utilizándolo.

El grupo que incluye los dieciséis parámetros no arrojó los mejores resultados debido a que las variables regionalizadas, como la textura del suelo, la profundidad del suelo y la litología, tienden a opacarse entre sí.

Contrario a lo observado en otros sistemas acuíferos, la precipitación no ocupó un lugar destacable entre los parámetros evaluados debido a la homogeneidad de su distribución. Su inclusión tendió a reducir el potencial de recarga de áreas de reconocida importancia regional como los afloramientos de la Formación Sincelejo.

El uso de índices topográficos derivados de los modelos de elevación digital se ofrece como una herramienta rápida y confiable que facilita la comprensión y la evaluación de las zonas potenciales de recarga con niveles de certeza aceptables, en especial en sistemas acuíferos donde la información existente sea escasa o existan dudas sobre su calidad.

El análisis requerido de los principales parámetros que intervienen en los procesos de infiltración y percolación, como parte de la implementación de la metodología de delimitación de las áreas potenciales de recarga de aguas subterráneas, proporciona una mejor comprensión del sistema acuífero y de los fenómenos hidrogeológicos asociados.

Por lo anterior, tanto la ejecución de la metodología para la evaluación de zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas, como los resultados que ofrece, resultan de gran importancia para la planificación y 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. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Estudio Nacional del Agua, 2014. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); 2015. p. 496.
2. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Estudio Nacional del Agua 2018 [Internet]. Bogotá D.C.; 2019. p. 452. Disponible en: <https://cta.org.co/biblionet/estudio-nacional-del-agua-2018/>
3. Instituto Regional del Agua - Iragua. Plan de ordenamiento del recurso hídrico de la cuenca baja del río San Jorge. Inédito. Montería: Corpomojana y Universidad de Córdoba; 2017.
4. Instituto Regional del Agua - Iragua. Estudio regional del agua de la cuenca baja del río San Jorge, jurisdicción de Corpomojana. Inédito. Montería: Corpomojana y Universidad de Córdoba; 2018.
5. Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. Proyecciones de población a nivel municipal. Período 2018 – 2035 [Internet]. 2020. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/censo2018/proyecciones-de-poblacion/Municipal/anexo-proyecciones-poblacion-Municipal_Sexo_2018-2035.xlsx
6. Vries JJ, Simmers I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeol J.* 2002 Feb;10(1):5-17.
7. Lanini S, Hevin G, Le Cointe P, Pinson S, Thieblemont R, Caballero Y. Present and future potential groundwater recharge at European scale. *Bur Rescherches Géologiques Minières - BRGM* [Internet]. 2021. Disponible en: http://www.indecis.eu/docs/Deliverables/Deliverable_6.4_AnnexC.pdf
8. Solomon S, Quiel F. Groundwater study using remote sensing and geographic information systems (GIS) in the central highlands of Eritrea. *Hydrogeol J.* 2006 Oct 4;14(6):1029-41.
9. Allafta H, Opp C, Patra S. Identification of Groundwater Potential Zones Using Remote Sensing and GIS Techniques: A Case Study of the Shatt Al-Arab Basin. *Remote Sens.* 2020 Dec 31;13(1):112.
10. Escobar J, Betancur T, García E, Martínez C, Palacio P. Análisis jerárquico ponderado aplicado a la identificación de recarga y flujos regionales en acuíferos. 2017;13(24):37-48.
11. Betancur T, Duque JC, Martínez C, García DA, Villegas PP, Paredes V. Delimitación de las potenciales zonas de recarga: caso de estudio: acuífero multicapa del eje bananero del Urabá Antioqueño-Colombia. *Rev Politécnica.* 2020 Dec;16(32):41-55.

12. Salazar D. Estimation of groundwater recharge potential using MIF techniques in the Tatacoa desert, Huila, Colombia. Univ EAFIT [Internet]. 2022. Disponible en: <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/31475>
13. Keeney RL, Wood EF. An illustrative example of the use of multiattribute utility theory for water resource planning. *Water Resour Res.* 1977 Aug;13(4):705-12.
14. Mallick J, Khan RA, Ahmed M, Alqadhi SD, Alsubih M, Falqi I, et al. Modeling Groundwater Potential Zone in a Semi-Arid Region of Aseer Using Fuzzy-AHP and Geoinformation Techniques. *Water.* 2019 Dec 16;11(12):2656.
15. Rajasekhar M, Raju G, Sreenivasulu Y, Raju R. Delineation of groundwater potential zones in semi-arid region of Jilledubanderu river basin, Anantapur District, Andhra Pradesh, India using fuzzy logic, AHP and integrated fuzzy-AHP approaches. *HydroResearch.* 2019 Dec;2:97-108.
16. Etikala B, Golla V, Li P, Renati S. Deciphering groundwater potential zones using MIF technique and GIS: A study from Tirupati area, Chittoor District, Andhra Pradesh, India. *HydroResearch.* 2019 Jun;1:1-7.
17. Raju R, Raju G, Rajasekhar M. Identification of groundwater potential zones in Mandavi River basin, Andhra Pradesh, India using remote sensing, GIS and MIF techniques. *HydroResearch.* 2019 Dec;2:1-11.
18. Lilienfeld A, Asmild M. Estimation of excess water use in irrigated agriculture: A Data Envelopment Analysis approach. *Agric Water Manag.* 2007 Dec;94(1-3):73-82.
19. Alamanos A, Mylopoulos N, Loukas A, Gaitanaros D. An Integrated Multicriteria Analysis Tool for Evaluating Water Resource Management Strategies. *Water.* 2018 Dec 7;10(12):1795.
20. Roozbahani A, Ebrahimi E, Banihabib ME. A Framework for Ground Water Management Based on Bayesian Network and MCDM Techniques. *Water Resour Manag.* 2018 Dec;32(15):4985-5005.
21. Arabameri A, Rezaei K, Cerda A, Lombardo L, Rodrigo-Comino J. GIS-based groundwater potential mapping in Shahrud plain, Iran. A comparison among statistical (bivariate and multivariate), data mining and MCDM approaches. *Sci Total Environ.* 2019 Mar;658:160-77.
22. Sapkota M, Arora M, Malano H, Sharma A, Moglia M. Integrated Evaluation of Hybrid Water Supply Systems Using a PROMETHEE–GAIA Approach. *Water.* 2018 May 8;10(5):610.
23. Saaty T. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *Interfaces.* 1994;24(6):19-43.
24. Jhariya DC, Kumar T, Gobinath M, Diwan P, Kishore N. Assessment of groundwater potential zone using remote sensing, GIS and multi criteria decision analysis techniques. *J Geol Soc India.* 2016 Oct;88(4):481-92.
25. Souissi D, Msaddek MH, Zouhri L, Chenini I, El May M, Dlala M. Mapping groundwater recharge potential zones in arid region using GIS and Landsat approaches, southeast Tunisia. *Hydrol Sci J.* 2018 Jan 25;63(2):251-68.
26. Andualet TG, Demeke GG. Groundwater potential assessment using GIS and remote sensing: A case study of Guna tana landscape, upper blue Nile Basin, Ethiopia. *J Hydrol Reg Stud.* 2019 Aug;24:100610.
27. Fenta AA, Kifle A, Gebreyohannes T, Hailu G. Spatial analysis of groundwater potential using remote sensing and GIS-based multi-criteria evaluation in Raya Valley, northern Ethiopia. *Hydrogeol J.* 2015 Feb;23(1):195-206.
28. Aykut T. Determination of groundwater potential zones using Geographical Information Systems (GIS) and Analytic Hierarchy Process (AHP) between Edirne-Kalkansogut (northwestern Turkey). *Groundw Sustain Dev.* 2021 Feb;12:100545.
29. Moreno J. El proceso analítico Jerárquico (AHP). En: Caballero R, Fernández GM, editores. Toma de decisiones con criterios múltiples. Madrid: Revista de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA; 2002.
30. Georgakakos KP, Graham NE. Potential Benefits of Seasonal Inflow Prediction Uncertainty for Reservoir Release Decisions. *J Appl Meteorol Climatol.* 1 de mayo de 2008;47(5):1297-321.

31. Minár J, Evans IS. Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology*. marzo de 2008;95(3-4):236-59.
32. Castro M, Peralta N, Domenech M, Costa J. Relación cuantitativa entre atributos topográficos y rendimiento. Reporte técnico. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – INTA; 2012.
33. Roa-Lobo J, Kamp U. Uso del índice topográfico de humedad (ITH) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, Trujillo-Venezuela. *Rev Geográfica Venez*. 2012;53(1):109-26.
34. Yıldırım Ü. Identification of Groundwater Potential Zones Using GIS and Multi-Criteria Decision-Making Techniques: A Case Study Upper Coruh River Basin (NE Turkey). *ISPRS Int J Geo-Inf*. 8 de junio de 2021;10(6):396.
35. Yifru BA, Mitiku DB, Tolera MB, Chang SW, Chung IM. Groundwater Potential Mapping Using SWAT and GIS-Based Multi-Criteria Decision Analysis. *KSCE J Civ Eng*. agosto de 2020;24(8):2546-59.
36. Razavi S, Sadeghi A, Choi SM. Groundwater Potential Mapping Using an Integrated Ensemble of Three Bivariate Statistical Models with Random Forest and Logistic Model Tree Models. *Water*. 31 de julio de 2019;11(8):1596.
37. Arulbalaji P, Padmalal D, Sreelash K. GIS and AHP Techniques Based Delineation of Groundwater Potential Zones: a case study from Southern Western Ghats, India. *Sci Rep*. 14 de febrero de 2019;9(1):2082.
38. Dinagarapandi P, Kothandaraman S, Kuppusamy M. Delineation of potential groundwater zones based on multicriteria decision making technique. *J Groundw Sci Eng*. 2019;8(2):55-69.
39. Duque Caro H. Geotectónica y evolución de la región noroccidental colombiana. Informe No. 1750. *Boletín geológico, Ingeominas*. 1978;23(3):3-33.
40. Reyes-Santos J, Mantilla M, González J. Regiones Tectono-Sedimentarias del Valle Inferior del Magdalena, Colombia. En: 7th Simposio Bolivariano - Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas [Internet]. Caracas, Venezuela, European Association of Geoscientists & Engineers; 2000. p. 310-33. Disponible en: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609-pdb.118.021esp>
41. Reyes-Harker A, Montenegro B, Gómez P. Tectonoestratigrafía y evolución geológica del Valle Inferior del Magdalena. *Bol Geol*. 2004;26(42):19-38.
42. Graterol V. Levantamiento aerogravimétrico y aeromagnético. Programa Adquisición Procesamiento e Interpretación de datos de Aeromagnetogravimetría en el Litoral Caribe - Contrato No: 073. Cuencas de Sinú, San Jacinto, Plato y San Jorge. Agencia Nacional de Hidrocarburos; 2006.
43. Arminio J, Vega R, García E, Yoris F, Lugo J, Bertorelli G. Petroleum Geology and Exploration of the La Creciente gas field Lower Magdalena Basin, Colombia. En: Cartagena de Indias; 2009.
44. Mora JA, Oncken O, Le Breton E, Ibañez-Mejía M, Veloza G, Mora A, *et al*. Formation and evolution of the Lower Magdalena Valley Basin and San Jacinto fold belt of northwestern Colombia: Insights from Upper Cretaceous to recent tectono-stratigraphy. En: *The Geology of Colombia* [Internet]. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 37. 2020. p. 21-66. (Gómez J, Mateus-Zabala D. Paleogene – Neogene; vol. 3). Disponible en: <https://www2.sgc.gov.co/LibroGeologiaColombia/Paginas/v3ch2.aspx>
45. Ganapuram S, Kumar GTV, Krishna IVM, Kahya E, Demirel MC. Mapping of groundwater potential zones in the Musi basin using remote sensing data and GIS. *Adv Eng Softw*. julio de 2009;40(7):506-18.
46. Gupta M, Srivastava PK. Integrating GIS and remote sensing for identification of groundwater potential zones in the hilly terrain of Pavagarh, Gujarat, India. *Water Int*. 13 de abril de 2010;35(2):233-45.
47. Nivia J, Montes N, Diederix H, Gómez J. Atlas geológico de Colombia 2015 [Internet]. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá; 2015. Disponible en: https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/agg_500K2015.aspx

48. Duque Caro H. Guidebook to the Geology of the Monteria Area [Internet]. Bogotá (Colombia): Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists; 1973. 34 p. (Annual Field trip). Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=j8FOAQAIAAJ>
49. Guzmán G, Gómez L, Serrano B. Geología de los cinturones del Sinú, San Jacinto y borde oriental del Valle Inferior del Magdalena, Caribe Colombiano. Escala 1:300.000 [Internet]. 2004. Disponible en: <https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=48402>
50. Bermúdez HD, Alvarán M, Grajales JA, Restrepo LC, Rosero JS, Guzmán C, et al. Estratigrafía y evolución geológica de la secuencia sedimentaria del Cinturón Plegado de San Jacinto. En Paipa - Boyacá: Universidad de Caldas y Agencia Nacional de Hidrocarburos; 2009. Disponible en: <http://rgdoi.net/10.13140/2.1.5072.7367>
51. De Porta J. Lexique stratigraphique international. Vol. 5, Amérique Latine : Fasc. 4b, Colombie : 2. Tertiaire et quaternaire [Internet]. Vol. V. Paris: Centre National de la Recherche Scientifique; 1974. 409 p. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=1Yu3jgEACAAJ>
52. Rodríguez G, Zapata G, Bermúdez J. Cartografía geológica de la Plancha 62 –La Ye, departamento de Córdoba y Sucre. Servicio Geológico Colombiano; 2013.
53. Dueñas J H, Duque C H. Geología del cuadrángulo F-8, Planeta Rica. Bol Geológico. 1 de enero de 1981;24(1):1-36.
54. Flinch JF. Structural Evolution of the Sinu-Lower Magdalena Area (Northern Colombia). En: The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation and Plate Tectonics [Internet]. American Association of Petroleum Geologists; 2003. p. 776-96. Disponible en: <https://pubs.geoscienceworld.org/books/book/1286/chapter/107142145>
55. Clavijo J, Barrera R. Geología de las planchas 44 –Sincelejo y 52 –Sahagún. Escala 1:100.000. Memoria explicativa. Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS actual Servicio Geológico Colombiano; 2001.
56. Duque-Caro H. Neogene stratigraphy, paleoceanography and paleobiogeography in northwest South America and the evolution of the Panama seaway. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol. abril de 1990;77(3-4):203-34.
57. Kassem T, Cáceres C, Cuacalón I. Geología del Cuadrángulo E-8 (Sincelejo). Informe inédito. Servicio Geológico Nacional; 1967.
58. González H. Mapa geológico del Departamento de Antioquia; geología, recursos minerales y amenazas potenciales. Escala 1:400.000. Memoria explicativa [Internet]. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear - INGEOMINAS; 2001 p. 241. (Memoria explicativa). Disponible en: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010040024267/documento/pdf/0101242671101000.pdf>
59. Huguett A, Cañas H, Barrera R, Daconte R. Hidrogeología en el corregimiento de Santiago Apostol y el municipio de Caimito, departamento de Sucre. Convenio bilateral entre los gobiernos de Colombia y Holanda. Proyecto Abastecimiento de agua potable en algunas poblaciones de los departamentos de Atlántico, Bolívar, Córdoba y Sucre. [Internet]. Cartagena: INGEOMINAS; 1988. Disponible en: https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=11974&shelfbrowse_itemnumber=11878
60. Barrera R. Teledetección geológica de la Plancha 62 Colomboy (Córdoba). Informe inédito [Internet]. Instituto de Investigación en geociencias, Minería y Química -Ingeominas; 1995. Disponible en: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010020357/documento/pdf/0101203571101000.pdf>
61. Instituto Colombiano de Geología y Minería - Ingeominas. Mapa hidrogeológico de Córdoba, escala 1:250.000. Proyecto de exploración y evaluación de aguas subterráneas (RS1_03) [Internet]. Ingeominas; 2004. Disponible en: <https://recordcenter.sgc.gov.co/B3/12006025002784/documento/pdf/0101027841101000.pdf>

62. Vargas M. Memoria técnica del mapa de aguas subterráneas del departamento de Sucre en escala 1:250.000: exploración y evaluación de aguas subterráneas RS1_02. Bogotá: INGEOMINAS –actual Servicio Geológico Colombiano; 2002.
63. González H, Londoño A. Mapa geológico del departamento de Córdoba: geología, recursos minerales y amenazas naturales. Escala 1: 250.000 [Internet]. INGEOMINAS –actual Servicio Geológico Colombiano; 2001 p. 150. Disponible en: https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=47810&shelfbrowse_itemnumber=78557
64. Moreno M, Tabares L, Quiroz O. Informe técnico final. Mapa hidrogeológico de Córdoba, escala 1:250.000. Proyecto Exploración y evaluación regional de las aguas subterráneas. Bogotá: INGEOMINAS –actual Servicio Geológico Colombiano; 2002.
65. Moreno M. Modelo hidrogeológico conceptual del departamento de Córdoba –Informe preliminar. Mapa hidrogeológico de Córdoba, escala 1:250.000. Exploración y evaluación de aguas subterráneas RS1_02. Bogotá: INGEOMINAS –actual Servicio Geológico Colombiano; 2002.
66. Tabares L. Mapa hidrogeológico de Córdoba, escala 1:250.000. Consideraciones técnicas para el manejo del agua subterránea en el departamento de Córdoba. Bogotá: INGEOMINAS –actual Servicio Geológico Colombiano; 2003.
67. Martínez A. Subsistencia y geomorfología de la depresión inundable del río Magdalena. Rev CIAF. 1981;6(1-3):319-28.
68. Aslan A, Autin WJ, Blum MD. Causes of river avulsion: Insights from the Late Holocene avulsion history of the Mississippi River, U.S.A. J Sediment Res. 1 de julio de 2005;75(4):650-64.
69. Stouthamer E, Cohen KM, Gouw MJP. Avulsion and its implications for fluvial-deltaic architecture: Insights from the Holocene Rhine–Meuse Delta. En: From River to Rock Record: The preservation of fluvial sediments and their subsequent interpretation [Internet]. Society for Sedimentary Geology -SEPM (Special Publication 97); 2011. p. 215-32. Disponible en: <https://pubs.geoscienceworld.org/books/book/1194/chapter/10588902>
70. Ochoa A, García G, Martínez E, Leixon A, Paula R, Oviedo J. Geología de la plancha 53 - Magangué a escala 1:100.000 departamentos de Bolívar y Sucre / Servicio Geológico Colombiano (sgc). Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Colombiano (sgc); 2016. 60 p.
71. Abdalla F, Moubark K, Abdelkareem M. Groundwater potential mapping using GIS, linear weighted combination techniques and geochemical processes identification, west of the Qena area, Upper Egypt. J Taibah Univ Sci. 1 de enero de 2020;14(1):1350-62.
72. Ghofur MN, Udin W, Mansor HE, Khan MM. Mapping of groundwater potential zones in a crystalline terrain using remote sensing, GIS techniques and field observations: A case study in parts of Tanah Merah, Kelantan, Malaysia. IOP Conf Ser Earth Environ Sci. 1 de agosto de 2020;549(1):012026.
73. Elubid BA, Huang T, Peng DP, Ahmed EH, Babiker MM. Delineation of groundwater potential zones using integrated remote sensing, GIS and multi-criteria decision making (MCDM). DESALINATION WATER Treat. 2020;192:248-58.
74. Kaewdum N, Chotpantararat S. Mapping potential zones for groundwater recharge using a GIS technique in the lower Khwae Hanuman sub-basin area, Prachin Buri Province, Thailand. Front Earth Sci. 21 de septiembre de 2021;9:717313.
75. OpenTopography. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global Version 3.0 Product release. 2013; Disponible en: <https://opentopography.org/meta/OT.042013.4326.1>
76. Food and Agriculture Organization - FAO. Guía para la descripción de suelos. Cuarta edición [Internet]. Roma; 2009. Disponible en: <https://www.fao.org/3/a0541s/a0541s.pdf>

77. Ahmed TH, Al-Manmi DAM. Delineation of groundwater productivity zones with the integration of GIS and remote sensing methods, Bazian Basin, Sulaymaniyah, Kurdistan Region, Iraq. *J Basrah Res Sci.* 2019;45(2):289-309.
78. Maity PK, Shit PK. Spatial appraisals of groundwater recharge potential zone identification using remote sensing and GIS. En: Bhunia GS, editor. *Groundwater and Society* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2021. p. 407-27. Disponible en: https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-64136-8_19
79. Magesh N, Chandrasekar N, Soundranayagam J. Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geosci Front.* marzo de 2012;3(2):189-96.
80. Fashae OA, Tijani MN, Talabi AO, Adedeji OI. Delineation of groundwater potential zones in the crystalline basement terrain of SW-Nigeria: an integrated GIS and remote sensing approach. *Appl Water Sci.* marzo de 2014;4(1):19-38.
81. Jasrotia AS, Kumar A, Singh R. Integrated remote sensing and GIS approach for delineation of groundwater potential zones using aquifer parameters in Devak and Rui watershed of Jammu and Kashmir, India. *Arab J Geosci.* abril de 2016;9(4): 304.
82. Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Bolívar. Escala 1:100.000. Bogotá; 2004.
83. Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. Mapa digital de suelos del departamento de Córdoba. República de Colombia. Escala 1:100.000. Bogotá; 2009.
84. Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento del Magdalena. Escala 1:100.000. Bogotá; 2009.
85. Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Sucre. Escala 1:100.000. Bogotá; 1998.
86. Lentswe GB, Molwalefhe L. Delineation of potential groundwater recharge zones using analytic hierarchy process-guided GIS in the semi-arid Motloutse watershed, eastern Botswana. *J Hydrol Reg Stud.* abril de 2020;28:100674.
87. Ahmad I, Dar MA, Andualem TG, Teka AH. GIS-based multi-criteria evaluation of groundwater potential of the Beshilo River basin, Ethiopia. *J Afr Earth Sci.* abril de 2020;164:103747.
88. Horton R. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Prog Phys Geogr Earth Environ.* 1945;56:275-370.
89. Gallagher A, editor. Drainage basins. En: *Aquatic habitat assessment: common methods.* Bain M, Stevenson N, editores. Bethesda, Md: American Fisheries Society; 1999. p. 25-34.
90. Glennon A, Groves C. An examination of perennial stream drainage patterns within the Mammoth Cave watershed, Kentucky. *J Cave Karst Stud.* 2002;64:82-91.
91. Dragičević N, Karleuša B, Ožanić N. Improvement of drainage density parameter estimation within erosion potential method. En: *EWaS3 2018* [Internet]. MDPI; 2018. p. 11-620. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2504-3900/2/11/620>
92. Charlston C. Drainage Density and Streamflow: Physiographic and Hydraulic Studies of Rivers. *U S Geol Surv -USGS.* 1963;(422C):1-8.
93. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Mapa de coberturas de la tierra, metodología Corine Land Cover. Escala 1:100.000. Período 2018. 2021.
94. Doke A. Delineation of the Groundwater Potential Using Remote Sensing and GIS: A Case Study of Ulhas Basin, Maharashtra, India. *Arch Photogramm Cartogr Remote Sens.* 1 de diciembre de 2019;31(1):49-64.

95. Cronshey R. Urban hydrology for small watersheds. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division; 1986.
96. Mahmoud S, Alazba A, Amin M. Identification of Potential Sites for Groundwater Recharge Using a GIS-Based Decision Support System in Jazan Region-Saudi Arabia. *Water Resour Manag.* agosto de 2014;28(10):3319-40.
97. Beven KJ, Kirkby MJ. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrol Sci Bull.* marzo de 1979;24(1):43-69.
98. Gessler P, Moore I, McKenzie N, Ryan P. Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. En: *Journal in southeastern Australia, in GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues.* M. Goodchild *et al.* GIS World Books; 1995.
99. Moore I, Gessler P, Nielsen G, Petersen G. Terrain attributes: estimation methods and scale effects. En: *Jakeman A, Beck M, McAleer M, editores. Modelling Change in Environmental Systems.* Wiley. Londres: John Wiley and Sons Ltd; 1993. p. 189-214.
100. Li X, McCarty GW, Karlen DL, Cambardella CA. Topographic metric predictions of soil redistribution and organic carbon in Iowa cropland fields. *CATENA.* enero de 2018;160:222-32.
101. Sørensen R, Zinko U, Seibert J. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrol Earth Syst Sci.* 15 de febrero de 2006;10(1):101-12.
102. Achu AL, Thomas J, Reghunath R. Multi-criteria decision analysis for delineation of groundwater potential zones in a tropical river basin using remote sensing, GIS and analytical hierarchy process (AHP). *Groundw Sustain Dev.* abril de 2020;10:100365.
103. Jenness J. Topographic Position Index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.2 [Internet]. 2006. Disponible en: <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>
104. Weiss A. Topographic position and landforms analysis. En *The Nature Conservancy*; 2001. Disponible en: http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf
105. Riley SJ, DeGloria SD, Elliot R. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermt J Sci.* 1999;5(1-4):23-7.
106. Brožová N, Baggio T, D'Agostino V, Bühler Y, Bebi P. Multiscale analysis of surface roughness for the improvement of natural hazard modelling. *Nat Hazards Earth Syst Sci.* 22 de noviembre de 2021;21(11):3539-62.
107. Mukherjee S, Mukherjee S, Garg RD, Bhardwaj A, Raju PLN. Evaluation of topographic index in relation to terrain roughness and DEM grid spacing. *J Earth Syst Sci.* junio de 2013;122(3):869-86.
108. Nair HC, Padmalal D, Joseph A, Vinod PG. Delineation of Groundwater Potential Zones in River Basins Using Geospatial Tools—an Example from Southern Western Ghats, Kerala, India. *J Geovisualization Spat Anal.* diciembre de 2017;1(1-2):5.
109. White J. Convex-concave landslopes: a geometrical study. *Ohio J Sci.* 1966;66(6):592.
110. Saaty TL. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation.* Nueva York: McGrawHill; 1980.
111. Saaty RW. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Math Model.* 1987;9(3-5):161-76.
112. Goepel KD. Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *Int J Anal Hierarchy Process.* 6 de diciembre de 2018;10(3):469-87.

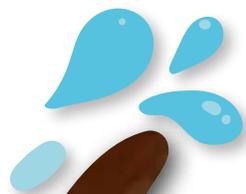


Imagen tomada de Pixabay.com

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-Uribe, 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

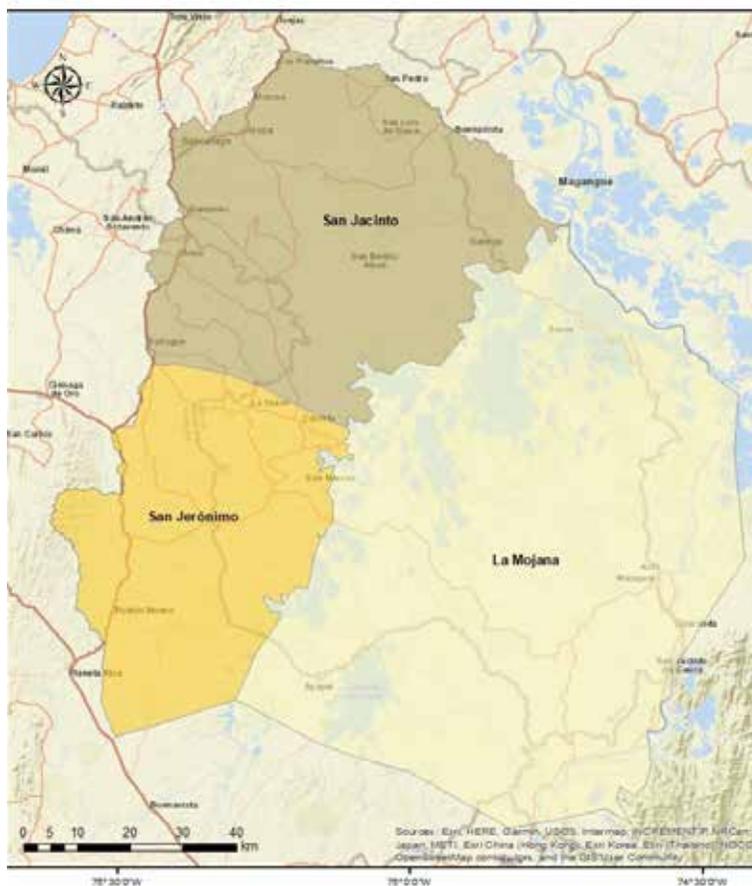
El área de investigación (**Figura 4-1**) se enmarca entre los departamentos de Sucre, Córdoba Antioquia, Sur de Bolívar y Magdalena, al norte de Colombia, con un área total de 12.672 km². El SALM se dividió teniendo en cuenta los límites fisiográficos, en el suroriente la subregión de la serranía de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



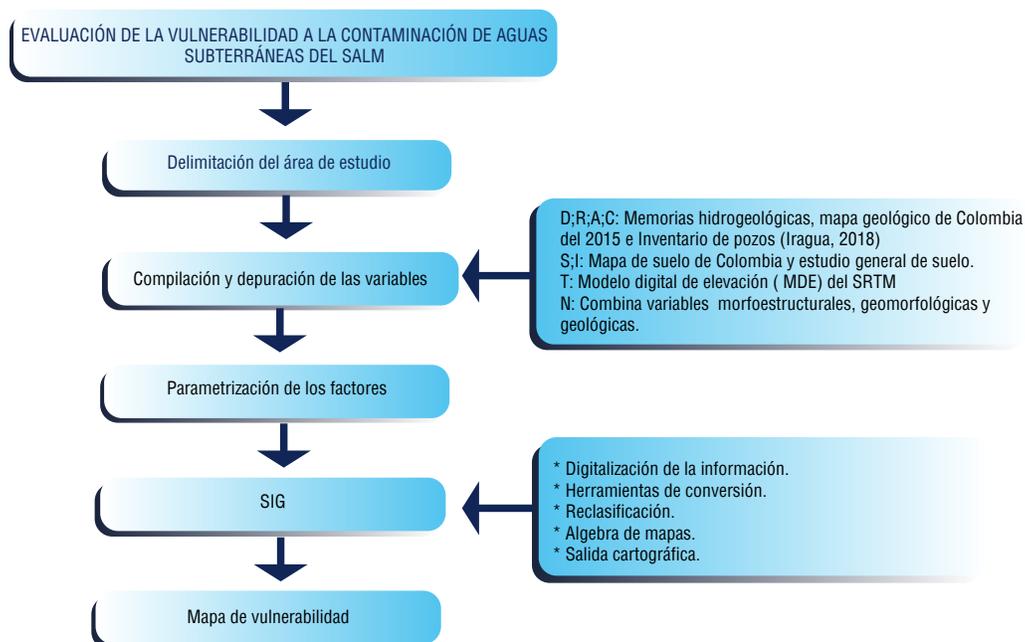
Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

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.

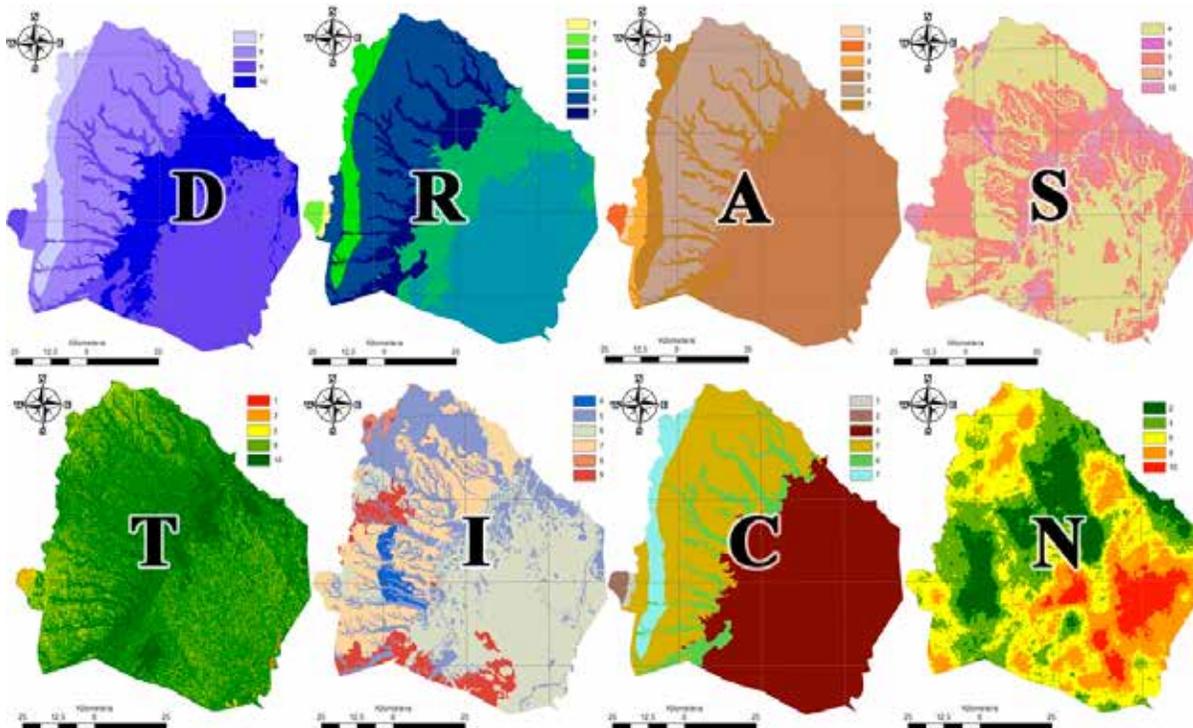
La reclasificación de los factores se obtuvo a partir del mapa hidrogeológico, donde se establece una profundidad promedio por unidad geológica (Tabla 4-1). Como resultado de la reclasificación, se determinó

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**).

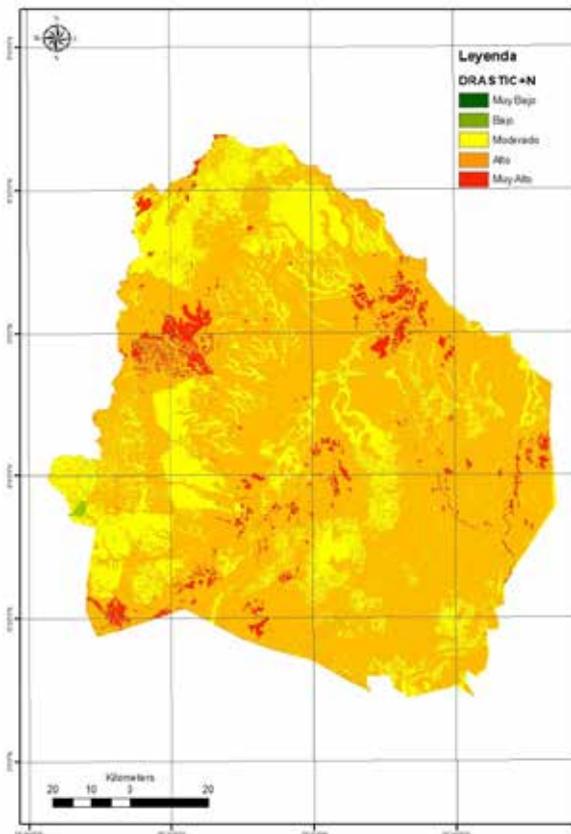
El análisis del potencial de deformación neotectónica del paisaje se centra en gran medida en la subregión de La Mojana, donde se concentran los focos más significativos de alto potencial de deformación. Esta correlación se observa en la extensión de sistemas de fallas de Sucre, que coincide con una 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

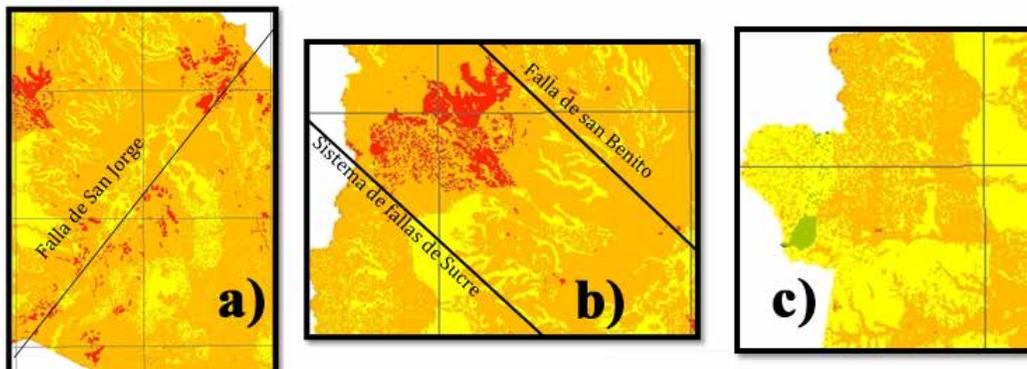


Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

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 Subterranea - 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).



Imagen tomada de Pixabay.com

Capítulo 5

Hidrocarburos aromáticos policíclicos en agua subterránea y superficial de la región de La Mojana sucreña

Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in the groundwater and freshwater of La Mojana region, Sucre

Enamorado-Montes, G.¹; Alean-Flórez, J.^{1*}; Burgos-Núñez, S.¹; Durante-Yáñez, E. V.^{1,2}; Urango-Cárdenas, I.¹; Ospino-Contreras, J.^{1,3}; Marrugo-Negrete, J.¹; Paternina-Urbe, R.^{1,4}; Navarro-Frómeta, A.⁵

¹ Grupo de investigación en Agua, Química Aplicada y Ambiental, Departamento de Química, Universidad de Córdoba, Sede Montería, Córdoba, Colombia.

² Programa de Ingeniería Ambiental, Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad de Córdoba, Sede Montería, Córdoba, Colombia.

³ Programa de Geografía, Departamento de Geografía, Universidad de Córdoba, Sede Montería, Córdoba, Colombia.

⁴ Programa de Regencia y Farmacia, Departamento de Regencia y Farmacia, Universidad de Córdoba, Sede Montería, Córdoba, Colombia.

⁵ Universidad Tecnológica Izúcar de Matamoros, México.

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

Resumen

En el presente estudio se analizó la concentración de 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en agua superficial y subterránea en la subregión de La Mojana Sucreña, en el periodo 2022-2023. Algunos índices moleculares se emplearon para estimar el origen de la contaminación y el transporte de los HAPs. Las concentraciones de los 16 HAPs fueron más bajas en el agua superficial (promedio de 133 ng/L) que para el agua subterránea (promedio de 234,3 ng/L); para cada tipo de agua se observaron variaciones dependiendo de la época de muestreo, la media general de la sumatoria de HAPs fue 209 ± 27 ng/L. El agua del Arroyo Canoas presentó la concentración más elevada (promedio de $335,77 \pm 305,68$ ng/L), seguido de la ciénaga La Chana (promedio de $294,93 \pm 257,7$ ng/L) y de la ciénaga Galindo (promedio de 223,2 ng/L); por su parte, para el agua subterránea, el pozo de comunidad de El Pando mostró los niveles más elevados de Sumatoria de HAPs (promedio de $932,5 \pm 755,2$ ng/L), seguido del pozo de la comunidad de Gavaldá (promedio de $529,3 \pm 317,4$ ng/L) y del pozo de la comunidad de La Concordia (promedio de $370,4 \pm 201,9$ ng/L). Se encontró un predominio considerable de HAPs de bajo peso molecular, donde el naftaleno y fenantreno fueron los compuestos dominantes. En cuanto a la época de muestreo, se encontró que puede afectar significativamente el perfil de los HAPs en el agua superficial y subterránea, modificando las posibles fuentes y el predominio de uno o varios de compuestos; se observó que, para la época de lluvia, existe mayor frecuencia de HAPs de alto peso molecular en el agua superficial. En cuanto a la posible fuente de los HAPs en el agua de la región de La Mojana, la relación HAPs ligeros/HAPs pesados < 1 para 25 pozos sugirió, como una posible fuente común, la combustión, lo que es confirmado con los valores entre 0,4 y 0,6 para los índices de fluoranteno/ fluoranteno + pireno y benzo[a]antraceno/ benzo[a]antraceno + criseno estimados en la mayoría de los sitios de monitoreo. La región de La Mojana se caracteriza por su economía basada en la agricultura, la ganadería y la pesca, sin el desarrollo de industrias ni de actividades de explotación de hidrocarburos; sin embargo, sobre todo para el agua subterránea, las concentraciones de HAPs son más altas que las del agua subterránea de otras regiones donde no existen actividades asociadas al uso de hidrocarburos ni grandes industrias.

Palabras clave: geoquímica orgánica, petroquímica, hidrogeoquímica, HAPs, pireno, benzo[a]pireno, acuífero.

Introducción

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) son compuestos orgánicos conformados por dos o más anillos aromáticos fusionados de átomos de carbono e hidrógeno; se consideran contaminantes ubicuos que se forman durante la combustión incompleta o pirólisis de material orgánico (1). Se encuentran distribuidos en todos los contenedores ambientales y sus niveles pueden ir desde trazas hasta partes por millón, cerca de sus fuentes (2). El carbón y el petróleo crudo contienen HAPs en concentraciones considerables debido a la formación diagenética en los combustibles fósiles; de esta manera, también los podemos encontrar en productos de carbón y petróleo mineral (coque, betún, alquitrán de hulla, variedad de combustibles y aceites) (3).

Según el número de anillos, los HAPs se clasifican en HAPs de peso molecular ligero (que tienen dos o tres anillos aromáticos) y HAPs de alto peso molecular (que tienen cuatro o más anillos aromáticos) (4). Los HAPs se caracterizan por su baja solubilidad en agua, baja presión de vapor y altos puntos de fusión y ebullición. Mientras mayor es su peso molecular tienden a disminuir la solubilidad en agua y aumentar la lipofili- cidad (5).

Las fuentes de HAPs se clasifican según su origen de producción en pirogénicas, petrogénicas y biogénicas. Los HAPs pirogénicos se forman mediante la combustión incompleta involuntaria de materiales orgánicos a altas temperaturas con baja o nula presencia de oxígeno; por su parte, los HAPs petrogénicos se asocian al petróleo y sus subproductos, y finalmente, los HAPs biogénicos son sintetizados por microorganismos, fito- plancton, algas y plantas en un proceso de transformación biológica muy lenta de materiales orgánicos (6,7).

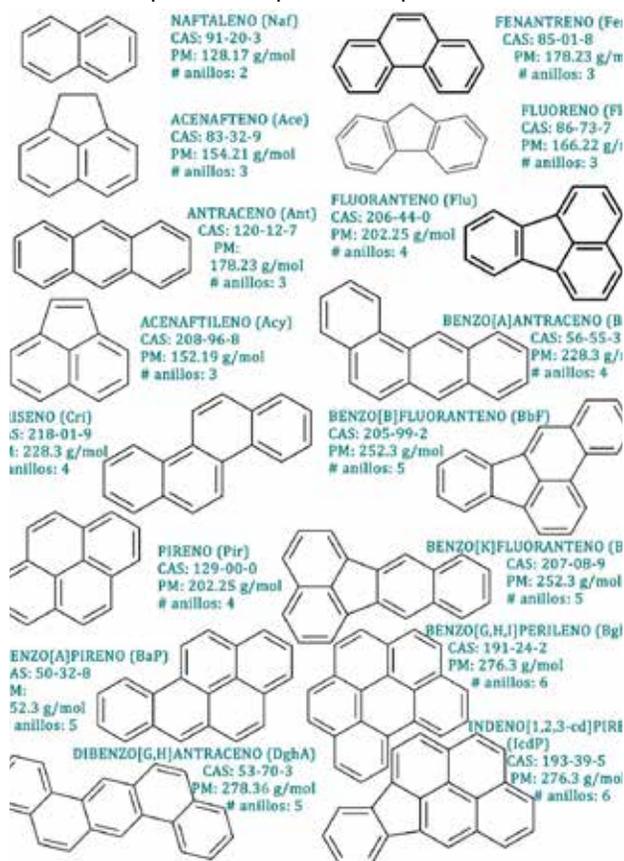
Las fuentes pirogénicas están dominadas por HAPs de alto peso molecular y las fuentes petrogénicas consisten principalmente en HAPs de bajo peso molecular.

No se sabe con certeza cuántos HAPs existen, algunos autores mencionan que cerca de 200 (8), otros especulan con 400 (9), mientras que las cifras más alarmantes dicen que son más de 10.000 (10). Dybing *et al.* (11) reportan que solo en el aire se han logrado identificar 500 HAPs. No es una sorpresa que existan tantas discrepancias al respecto, las agencias más importantes como la Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (ECHA, por sus siglas en inglés), el Programa Internacional sobre Seguridad Química (IPCS, por sus siglas en inglés) y la IARC en sus revisiones y conceptos sobre HAPs, abarcan a un grupo limitado de HAPs que incluye solo hasta los sustituidos con alquilo, dejando por fuera los derivados de HAPs sustituidos con grupos funcionales distintos de los alquilos (12,13).

Un listado de 16 HAPs fue priorizado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) en la década de los setenta, entre los cuales se destacan sustancias de dos a seis anillos aromáticos (**Figura 4-1**). Esta lista respondía a la disponibilidad de métodos analíticos, a la ocurrencia y a la toxicidad de los compuestos; desde entonces ha sido ampliamente aceptada para representar la familia de contaminantes de los hidrocarburos aromáticos (14,15).

En Europa también se ha priorizado un listado de 15 +1 HAPs, su elección proviene de la ocurrencia en alimentos y de sus comprobadas características genotóxicas y carcinogénicas. Ocho de estos compuestos son comunes con los de la **Figura 4-1**. priorizados por la EPA, entre ellos: benzo[a]pireno, benzo[a]antraceno, benzo[b]fluoranteno, dibenzo[a,h]antraceno, benzo[ghi]perileno, criseno, benzo[k]fluoranteno, indeno[1,2,3-cd]pireno; adicionalmente, se incluyen en esta lista: benzo[j]fluoranteno, ciclopenta[cd]pireneo, dibenzo[a,e]pireno, dibenzo[a,h]pireno, dibenzo[a,i]pireno, and 5-metilcriseno y benzo[c]fluroeno (16).

Figura 5-1. Hidrocarburos aromáticos policíclicos priorizados por la EPA, monitoreados en el presente estudio



Nueve de los HAPs priorizados por la EPA y trece de los HAPs priorizados por la Unión Europea, se encuentran en la lista de sustancias cancerígenas de la Agencia Internacional de Investigación sobre Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés), la cual incluye un total de 15 HAPs seleccionados a partir de una evaluación de 60 sustancias de esta familia de contaminantes (2,17).

Para el caso de Colombia, la resolución 2115 de 2007 estableció un valor máximo admisible de 10 µg/L para la sumatoria de HAPs en el agua para consumo humano, indicando que en aquellos casos donde se sobrepase este umbral deberán ser identificados los HAPs; sin embargo, no se aclara cuáles de los HAPs individuales deben ser incorporados en la suma (18). Este criterio adoptado en la normatividad colombiana difiere de lo mencionado en las guías para agua de consumo humano de la Organización Mundial de la Salud, donde solo existe un umbral de 0,7 µg/L para el benzo[a]pireno (19).

Tabla 5-1. Hidrocarburos aromáticos policíclicos incluidos en el listado de sustancias carcinogénicas de la IARC

Carcinogénico para humanos	Probable carcinogénico para humanos	Posible carcinogénico para humanos
Grupo 1	Grupo 2A	Grupo 2B
Benzo[a]pireno**	Ciclopentano[c,d]pireno* Dibenzo[a,h]antraceno** Dibenzo[a,l]pireno	Benzo[j]aceantrileno Benzo[a]antraceno** Benzo[b]fluoranteno** Benzo[j]fluoranteno* Benzo[k]fluoranteno** Benzo[c]fenantreno criseno** Dibenzo[a,h]pireno* Dibenzo[a,i]pireno* Indeno[1,2,3-cd]pireno** 5-metilcriseno* Naftaleno***

* Solo aparece en la lista de HAPs de la UE

** Aparece en la lista de HAPs de la UE y de la EPA

*** Solo aparece en la lista de HAPs de la EPA

Muchos HAPs son mutagénicos, cancerígenos, teratogénicos e inmunotóxicos para los organismos vivos, incluidos microorganismos, animales y humanos (4), tienen efectos ecotóxicos en la vida acuática y las aves (20,21), pueden provocar mutaciones en los cromosomas, afectar los procesos de fusión y unión, y potencialmente inducir rupturas cromosómicas (22,23).

Los HAPs puede ingresar al agua subterránea de múltiples maneras; pueden ser transferidos desde el suelo y contaminar todo el acuífero (24), también pueden provenir de las aguas residuales, de la recarga de aguas superficiales, de la disposición de los residuos sólidos, de la escorrentía y percolación superficial, de la subsidencia atmosférica y de los derrames de petróleo (25).

El agua subterránea puede contener variadas concentraciones de HAPs. En China, por ejemplo, se encontraron niveles entre 0 y 29,06 µg/L en las ciudades de Shijiazhuang, Lanzhou, Golmud y Du'an, las condiciones hidrogeológicas influyeron sobre las concentraciones de HAPs entre ellas, una mayor profundidad del agua subterránea, zona vadosa más gruesa y coeficiente de permeabilidad más pequeño conllevaron a menores concentraciones (26). Los depósitos aluviales-diluviales cuaternarios del río Hutuo en el norte de China están compuestos de grava arenosa, limo fino, franco arenoso y arcilla, donde el agua subterránea se encuentra en los poros de los estratos de roca cuaternaria suelta, las concentraciones de HAPs fueron menores a 92,06 ng/L con aportes predominantes de HAPs de bajo peso molecular (27).

Otro caso se identifica en un estudio realizado en el norte de Nigeria (Moro, Edun-Abon, Yakoyo e Ipetu-mod), donde las concentraciones en el agua subterránea estuvieron entre el límite de detección y 118.960 ng/L y fueron mayores en época de lluvia en comparación con la época de menos lluvia; adicionalmente, se caracterizaron por la presencia de HAPs de bajo peso molecular sin HAPs de alto peso molecular detectados en ninguna de las muestras (28).

Por su parte, en una investigación realizada en Italia, se evaluaron 1.168 muestras de agua subterránea en la planicie de Campania, con concentraciones entre 0,65 y 34,1 ng/L, probablemente resultado de la quema de combustible y los biocombustibles (29).

La región de La Mojana, ubicada en el norte de Colombia, representa un gran delta interior del Bajo Cauca en forma de cono, compuesto por sedimentos aluvio-lacustres provenientes de aportes de la cordillera de los Andes desde finales del Cuaternario (30). En el departamento de Sucre, esta subregión está conformada por los municipios de Majagual, Guaranda, Sucre, San Marcos, Caimito, San Benito Abad y La Unión, todos ellos dependen del agua subterránea para abastecer a las comunidades de las zonas urbana y rural. La cobertura de agua potable para el área rural es baja, entre el 8 y el 35 % (Plan de Desarrollo de Sucre 2021-2023), y aunque algunas de las comunidades rurales cuentan con una infraestructura mínima de microacueductos, otras deben abastecerse de pozos artesanales o cuerpos de agua superficial.

De acuerdo con lo discutido en los párrafos anteriores, los HAPs se constituyen una potencial amenaza para la calidad del agua subterránea, por ende, es necesario llevar a cabo el mencionado estudio. El presente trabajo representa la primera investigación en Colombia donde se evalúan los HAPs en el agua de un sistema acuífero de Colombia. A la fecha, la mayoría de los estudios se enfocaron en la presencia de estos contaminantes en los sedimentos marinos (31-33), de ríos (34) y de ecosistemas como ciénagas y lagos (35); en algunas ocasiones, estos estudios fueron realizados por las cercanías del área de estudio con refinерías. Otras investigaciones se han centrado en la matriz aire, para la cual la ocurrencia de los HAPs ha sido evidenciada tanto en las grandes áreas metropolitanas de Medellín, Bogotá y Cali, como en otras ciudades de Colombia (36-40).

Materiales y métodos

Área de estudio

La región de La Mojana se encuentra en la zona caribe colombiana, hace parte del terreno conocido en la literatura geológica como San Jorge – Plato; geomorfológicamente, la región hace parte de un delta interior (41), de forma triangular, atravesado por una serie de caños que desembocan en diferentes cuerpos de agua, entre los que se encuentra la ciénaga de Ayapel, el río San Jorge y el Brazo de Loba. El pulso de precipitación sigue un patrón monomodal con valores altos de precipitación entre los meses de abril y noviembre. Las dos estaciones con caudales mínimos se presentan en los períodos enero-marzo y julio-septiembre, el primero más acentuado que el segundo. Durante las grandes crecientes, el cauce del río Cauca resulta ser insuficiente para transportar todo el caudal, por lo cual el río busca sitios preferenciales para evacuar excesos; estos sitios son denominados “rompederos” (42).

De acuerdo con Ingeominas (43), el Sistema Acuífero La Mojana hace parte del área hidrográfica Magdalena – Cauca. Está constituido por acuíferos de extensión regional y abarca áreas de los departamentos de Córdoba, Sucre y Bolívar. Se conforma del acuífero La Mojana, depósitos aluviales Río San Jorge, acuífero Sincelejo, acuífero Betulia, y acuífero Cerrito.

El presente estudio comprende principalmente el acuífero La Mojana, que corresponde a depósitos aluviales. Este acuífero es de tipo semiconfinado a confinado, con agua subterránea de tipo bicarbonatada sódica y cálcica. El agua está débilmente mineralizada, con sólidos disueltos totales menores a 500 mg/L (44).

Una parte de la región es atravesada por el Oleoducto Caño Limón Coveñas, el cual tiene como destino el complejo petrolero del golfo de Morrosquillo en el municipio de Coveñas, Sucre. A este punto, también llegan otros oleoductos y es el principal puerto de exportación de petróleo de Colombia (**Figura 5-1**).

Frecuencia y sitios de monitoreo

Se recolectaron muestras de agua en 50 pozos de agua subterránea, 18 ciénagas y caños del departamento de Sucre en la subregión de La Mojana. El monitoreo en agua subterránea incluyó cuatro campañas de muestreo en marzo (período de transición) y agosto (período de más lluvia) de 2022, y en febrero (período de menos lluvia y junio de 2023 (período de transición), en tanto que, el monitoreo en agua superficial se realizó durante tres campañas de muestreo, en las mismas fechas del monitoreo en agua subterránea excepto en junio de 2023.

Con relación a los sitios de monitoreo de agua subterránea, 3 pozos correspondieron a pozos de acueductos municipales, 45 a microacueductos rurales y 2 pozos son artesanales en zonas rurales. El agua de los pozos se destina para el consumo humano. La cantidad de pozos por municipio es: 21 en Majagual, 2 en Guaranda, 3 en Sucre y 6 en San Marcos, Caimito, San Benito y La Unión, respectivamente (**Figura 5-2**). En cuanto a las ciénagas, 4 de ellas pertenecen al municipio de Caimito, 3 a San Marcos, 6 a San Benito y 5 a Sucre. Adicionalmente, las muestras de agua se recolectaron en los caños: Carate (San Marcos), Pansegüita (Sucre), Guacamayo (San Benito) y Arroyo Canoas (Caimito).

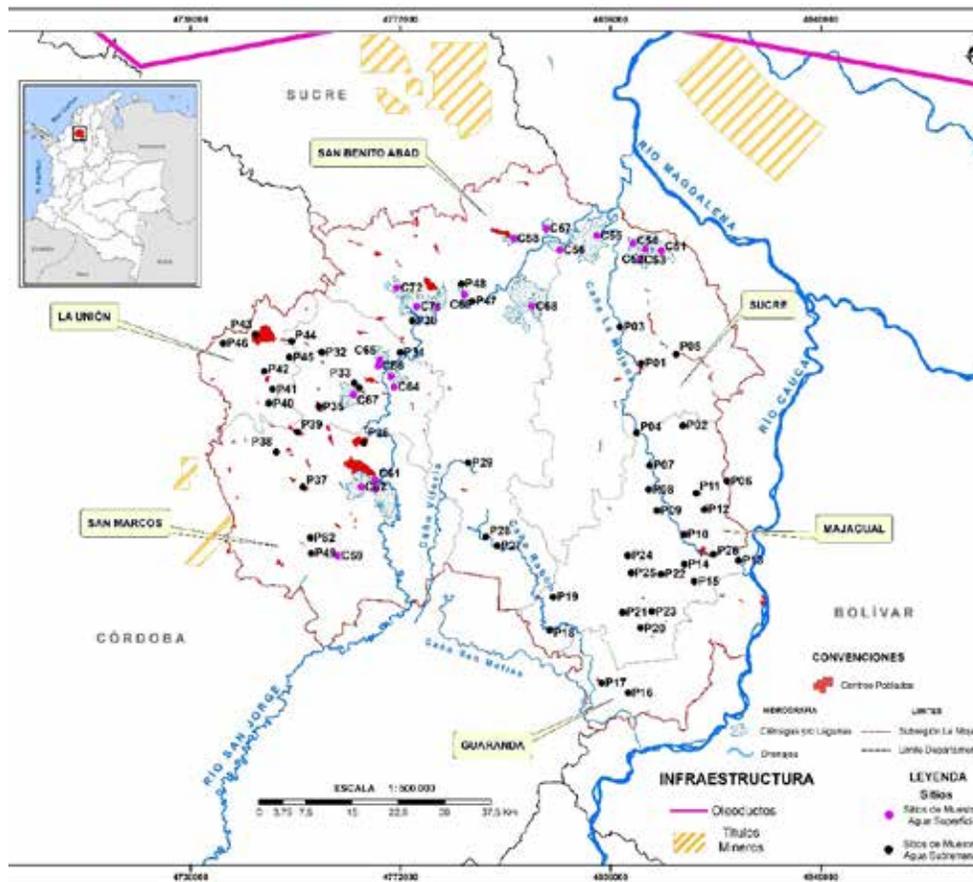
Recolección de muestras de agua

Las muestras de agua fueron recolectadas y preservadas siguiendo procedimientos del método estándar para el análisis de agua y aguas residuales (45) y los protocolos de monitoreo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (46). Un litro de agua se depositó en recipientes de vidrio ámbar de 1L, las botellas se llenaron sin dejar cámara de aire, antes de ser tapadas se dispuso un sello con papel aluminio. Las muestras se refrigeraron en cavas de icopor, refrigeradas a menos de 6°C y transportadas al Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental de Universidad de Córdoba. Las muestras se mantuvieron a 4°C hasta su extracción dentro de los siguientes 14 días posteriores a su recolección; los extractos se mantuvieron a 4°C y se protegieron de la luz hasta su análisis dentro de los 60 días posteriores a su recolección.

Extracción y Análisis de HAPs en agua

Se realizó extracción en fase sólida empleando cartuchos C18 (Hypersep C18 500mg Thermo Scientific), de acuerdo con el método EPA 3535A (47). Los cartuchos se acondicionaron con 3 mL de hexano, 3 mL de metanol, 3 mL de una mezcla 1:1 de metanol:agua; 500 mL de la muestra de agua fueron cargados en los cartuchos a un flujo de 3 mL/min, se eluyó con 3 mL de hexano, 3 mL de diclorometano:hexano en relación 1:1 y 3 mL de hexano:diclorometano en relación 1:4. Los extractos fueron concentrados con un rotovaporador hasta aproximadamente 1 mL, luego se pasaron por corriente de nitrógeno hasta llevarlos a aproximadamente 0,5 mL, se agregaron 10 µL de estándar interno, y se llevó el vial hasta 1 mL.

Figura 5-2. Sitios de monitoreo del estudio. P01 hasta P50 indican pozos de agua subterránea, C51 hasta C72 son los puntos de muestreo en agua superficial



Los HAPs fueron analizados en un cromatógrafo de gases TRACE 1310 (Thermo Scientific) acoplado a un espectrómetro de masas ISQ Single Quadrupole MS (Thermo Scientific) con un automuestreador AI 1310 (Thermo Scientific) siguiendo el método EPA 8270 (48). Se empleó una columna Zebron ZB-5ms (longitud = 30 m, diámetro interno = 0,25 mm, espesor = 0,25 μm), el modo de inyección fue splitless. La temperatura inicial fue de 60 $^{\circ}\text{C}$ (5 minutos), aumentó a 150 $^{\circ}\text{C}$ (10 $^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$), luego hasta 280 $^{\circ}\text{C}$ (4 $^{\circ}\text{C}/\text{minutos}$) donde se mantuvo durante 4 minutos, la temperatura final fue de 290 $^{\circ}\text{C}$ (2 $^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$), la cual se mantuvo por 2 minutos. El gas utilizado fue He como una pureza de 99,999 %. El método de ionización por impacto electrónico (70 eV), las temperaturas de la línea de transferencia y de la fuente de iones de 250 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Se empleó un programa de monitoreo de iones selectivos para las relaciones m/z 128 (naftaleno), 152 (acenafileno, acenafteno), 166 (fluoreno), 178 (fenantreno, antraceno), 202 (fluoranteno, pireno), 228 (benzo[a] antraceno, criseno), 252 (benzo[b]fluoranteno, benzo[k]fluoranteno, benzo[a]pireno), 276 (indeno[1,2,3-cd] pireno, benzo[g,h,i]perileno), 278 (dibenzo[a,h]antraceno) y 111+175 (clorfenson).

La cuantificación se realizó mediante curvas de calibrado con 5 puntos desde 10 hasta 600 $\mu\text{g}/\text{L}$ empleando el método del estándar interno (Clorfenson). Las curvas de calibrado se prepararon a partir del estándar CRM48905 TCL PAH MIX 2000 $\mu\text{g}/\text{mL}$ de Merck. Para el control de calidad analítico se realizaron blancos de procedimiento, blancos analíticos, duplicados de muestras, recobrados y estándares de control. En todos los casos, los blancos no reportaron la presencia de HAPs. Los duplicados de muestras y recobrados estuvieron entre 70 y 120 %, los estándares de control entre 85 y 110 %. Las curvas de calibrado presentaron un r superior a 0,995.

Índices moleculares de HAPs

Para determinar las posibles fuentes de HAPs, se utilizaron las proporciones de los índices moleculares de HAPs. Las proporciones de isómeros más comunes son Flu/(Flu + Pyr), Ant/(Phe + Ant), BaA/(BaA + Chr), Ind/(Ind + BghiP), Fen/Ant, Flu/Pyr y BaP/BghiP. Si la relación Flu/(Flu + Pyr) es $< 0,4$, el origen es petrogénico; entre 0,4 y 0,5 el origen es una mezcla de fuentes petrógenas y pirógenas, mientras que si es superior a 0,5 el origen es pirógeno. Si Ant/(Phe + Ant) es $< 0,1$, el origen es petrogénico, si es $> 0,1$, el origen es pirógeno. Si la relación Ind/Ind + BghiP es $< 0,5$, el origen es pirógeno mientras que valores mayores a 0,5, las fuentes son de origen petrogénico (49).

La relación entre HAPs de bajo peso molecular y HAPs de alto peso molecular se empleó para diferenciar las fuentes pirogénica y petrogénica de los HAPs, valores < 1 indican contaminación pirogénica y valores > 1 indican contaminación petrogénica (50).

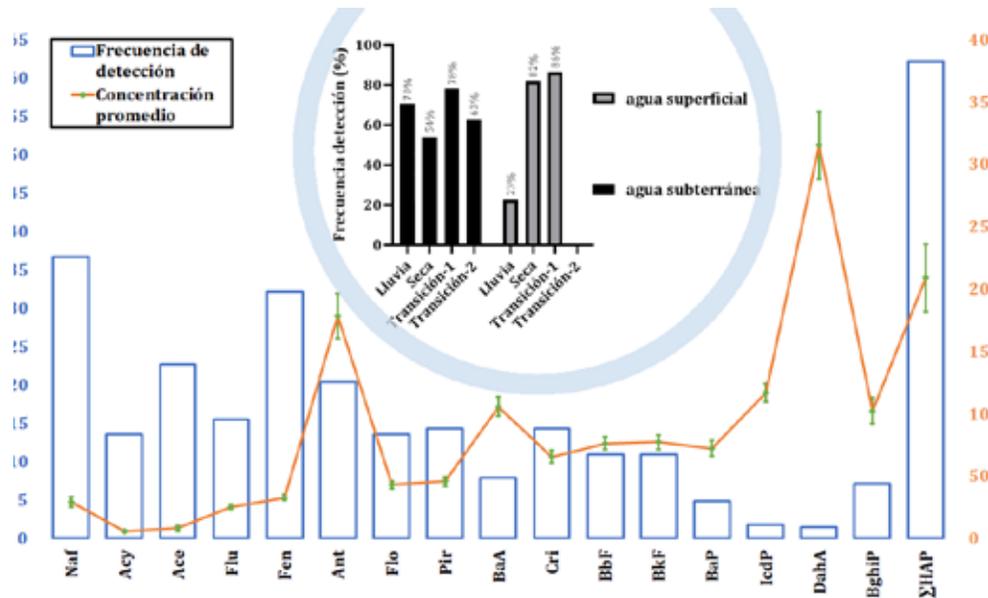
Análisis estadístico y tratamiento de datos

Todos los resultados se presentan como la media \pm la desviación estándar. Teniendo en cuenta la gran cantidad de datos, se observaron concentraciones menores al límite de detección del método ($< \text{LDM}$) o no detectado (ND), en los casos en donde se presentaron estos valores se optó por no realizar ningún tipo de reemplazo o de técnica de predicción de datos, por lo anterior, en todos los casos la media representa el valor de los datos donde se observaron concentraciones de diferentes de ND o mayores al LDM. Las comparaciones entre muestreos se realizaron a un nivel de confianza del 95 %, se consideraron diferencias significativas con el p valor fue inferior a 0,05, el estadístico empleado fue Kruskal-Wallis. Los análisis estadísticos se realizaron con el software R versión 4.3.1.

Resultados y discusión

La **Figura 6-3** presenta el promedio de las concentraciones de cada HAPs y de la sumatoria de HAPs en el agua de la región de La Mojana. Se encontró con mayor frecuencia naftaleno (Naf), fenantreno (Fen), acenafileno (Acy) y antraceno (Ant) con porcentajes de 37, 32, 23 y 20 %, en tanto que, los HAPs menos frecuentes fueron indeno[1,2,3-cd]pireno (IcdP) y dibenzo[a,h]antraceno (DahA) con porcentajes de 2 %. En 164 de las 264 muestras analizadas (62 %) fue detectado al menos uno de los 16 HAPs monitoreados; teniendo en cuenta el tipo de agua monitoreada y la época de muestreo, se encontró que en el agua subterránea existe al menos un HAPs en el 54 – 78 % de las muestras analizadas. Sin embargo, en época de lluvia, para el agua superficial se observó una disminución significativa de aparición de HAPs con tan solo 23 % (debido a la presencia de BaP en las ciénagas Jegua, Estillero, Galindo, Aguas Claras y El Playón); no obstante, para los otros dos periodos estudiados, las frecuencias de detección fueron incluso mayores que las frecuencias de detección del agua subterránea con valores entre 82-86 % (**Figura 5-3**).

Figura 5-3. Concentración promedio y frecuencia de detección de HAPs en el agua de la región de La Mojana



Naf: naftaleno. Acy: acenaftileno. Ace: acenafteno. Flu: fluoranteno. Fen: fenantreno. Ant: antraceno. Flo: fluoreno. Pir: pireno. Benzo[a]antraceno. Cri: criseno. BbF: benzo[b]fluoranteno. BkF: benzo[k]fluoranteno. BaP: benzo[a]pireno. IcdP: indeno[1,2,3-cd]pireno. DahA: dibenzo[a,h]antraceno. BghiP: benzo[g,h,i]perileno. ΣHAPs: sumatoria de HAPs.

Aunque DahA fue poco detectado, su concentración media fue la más alta con $315,4 \pm 26,9$ ng/L ($n=4$), siendo incluso mayor que el promedio de ΣHAPs con 209 ± 27 ng/L ($n=164$). El Ant, uno de los cuatros HAPs más frecuentes, presentó un promedio de $178,5 \pm 18,2$ ng/L ($n=54$), seis veces más elevado que Naf, el HAPs más frecuente, con una media de $29,2 \pm 4$ ng/L ($n=97$). El resto de los HAPs registró concentraciones promedio entre 6,1 y 117,1 ng/L.

La concentración de la ΣHAPs osciló entre 0,30 y 3188,7 ng/L ($n=164$, $209,9 \pm 27$ ng/L); ninguna de las muestras analizadas superó el valor máximo admisible de 10 ug/L (18) para la ΣHAPs establecido en la normatividad colombiana para agua de consumo humano. Asimismo, la concentración de BaP en todas las muestras de agua fue menor que 0,7 ug/L —el umbral establecido por la OMS en las guías de para agua de consumo humano (19)—. De hecho, este HAPs fue el tercero menos detectado, únicamente fue hallado en 13 muestras con concentraciones entre 25,8 y 31,5 ng/L. Las concentraciones del presente estudio fueron superiores a las encontradas por Masih *et al.*, (51) en el agua subterránea de Gorakhpur, India, donde la concentración de ΣHAPs varió entre 10,24-43,85 ng/L y el riesgo cancerígeno se consideró insignificante. Igualmente, fueron más altos que los observados por Masih *et al.*, (52) en el agua subterránea de la región de Agra en la India, quienes hallaron una concentración media de 31,86 ng/L de ΣHAPs, oscilando entre 13,2 ng/L y 64,3 ng/L.

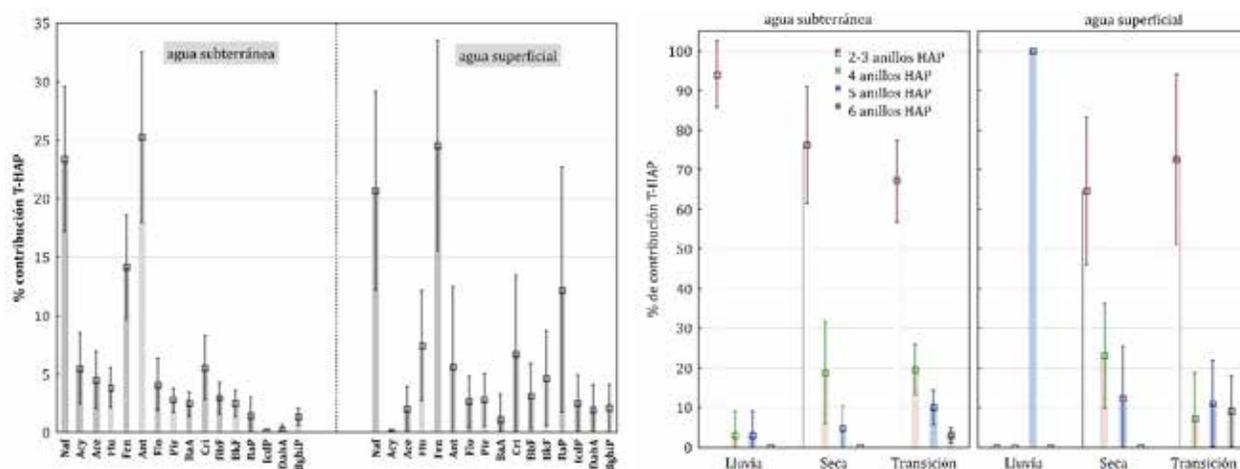
De forma similar, fueron mayores a la ΣHAPs encontrada en la región de Campania, Sur de Italia, para 1.167 muestras de agua subterránea, cuyo rango estuvo entre 0,65 y 34,1 ng/L, con una media de 6,77 ng/L (29). Pero, fueron inferiores a la ΣHAPs reportadas por Adekunle *et al.*, (28) para el agua subterránea del estado de Osun en el Norte de Nigeria, con concentraciones entre < al límite de detección y 118,96 ug/L; también fueron menores a la ΣHAPs halladas por Qiao *et al.*, (26) en las ciudades de Lanzhou, Shijiazhuang, Golmud y Du'an en China, quienes reportaron concentraciones entre 0–29,060 ng/L y un promedio de 594,8 ng/L, casi tres veces del presente estudio.

Naf, Fen y Ant son los que más contribuyen a ΣHAPs en el agua subterránea, mientras que en el agua superficial el que más contribuyen a la ΣHAPs es Fen, seguido de Naf y BaP (Figura 5-4a). Aunque en el agua subterránea los HAPs de 2-3 anillos son siempre los que más contribuyen a ΣHAPs para cada una de las épocas de

muestreo, en el agua superficial se encontró una tendencia diferente, donde los HAPs de 5 anillos aportan el 100 % de la Σ HAPs para época de lluvia; no obstante, en época seca y de transición se observó un comportamiento similar al del agua subterránea, donde los HAPs de 2-3 contribuyen más fuertemente a Σ HAPs (Figura 5-4b).

De lo anterior, se puede establecer que el agua superficial y subterránea de la región de La Mojana se encuentra dominada por los HAPs de bajo peso molecular; pese a que, en condiciones de más lluvia se altera la proporción de HAPs en el agua superficial, para la cual se tiene un dominio de los HAPs de alto peso molecular. En otros estudios sobre la presencia de HAPs en aguas subterráneas también se observó un predominio de los hidrocarburos de bajo peso molecular, como en Wang *et al.* (53), Wang *et al.* (27) y Qiao *et al.* (26). Incluso se ha notado ausencia total de HAPs de alto peso molecular, como en el estudio de Adekunle *et al.*, 2017 (28). Empero, no existe un comportamiento generalizado, puesto que en Liang *et al.* (24) y Montouri *et al.* (29) se observó una proporción más o menos homogénea entre los HAPs de bajo y alto peso molecular de 60-40 %, y en Masih *et al.* (52) los hidrocarburos que dominaron fueron los HAPs de 4 y 5 anillos.

Figura 5-4. a) Porcentaje de contribución individual de cada HAPs en la sumatoria de HAPs para agua superficial y subterránea. b) Porcentaje de contribución de HAPs de 2-3, 4, 5 y 6 anillos en la sumatoria de HAPs para las diferentes épocas de muestreo en el agua subterránea y superficial



En los estudios donde los HAPs de bajo peso molecular predominan en el agua subterránea, su presencia se explica por sus propiedades físicas y químicas; en general, a medida que aumentan el número de anillos de benceno y el peso molecular, disminuyen tanto la solubilidad como la volatilidad y se incrementa la hidrofobicidad. De esta manera, se espera que los HAPs que tengan más anillos sean absorbidos más fácilmente por el suelo; por lo tanto, es más probable que los HAPs de menor cantidad de anillos ingresen al agua subterránea (54). No obstante, de manera específica, la sorción de HAPs en suelos está determinada por la textura del suelo, las fracciones granulométricas, la cantidad de carbono y de limo siendo esta última significativa para la acumulación de HAPs (55); en los suelos de textura más pesada, como el franco arenoso y el franco limoso, se registró un alto contenido de hidrocarburos aromáticos de 4, 5 y 6 anillos (56,57). Los suelos de la región de La Mojana al recibir históricamente las aguas de los ríos Cauca y San Jorge, lo que provoca continuas inundaciones y la acumulación también de nuevos sedimentos finos (limos principalmente) sobre los suelos precedentes (58).

Como se muestra en la **Tabla 5-2**, la concentración de los HAPs presenta un comportamiento diferenciado de acuerdo con la época de muestreo. Por un lado, las concentraciones de Naf, Acy, BaA y BbF fueron semejantes en época seca y de transición; lo contrario se observó para Σ HAPs, Ace, Flu, Fen, Ant, Flo, Pir, Cri, BkF y BaP, de acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis. Por su parte, al comparar las concentraciones de cada

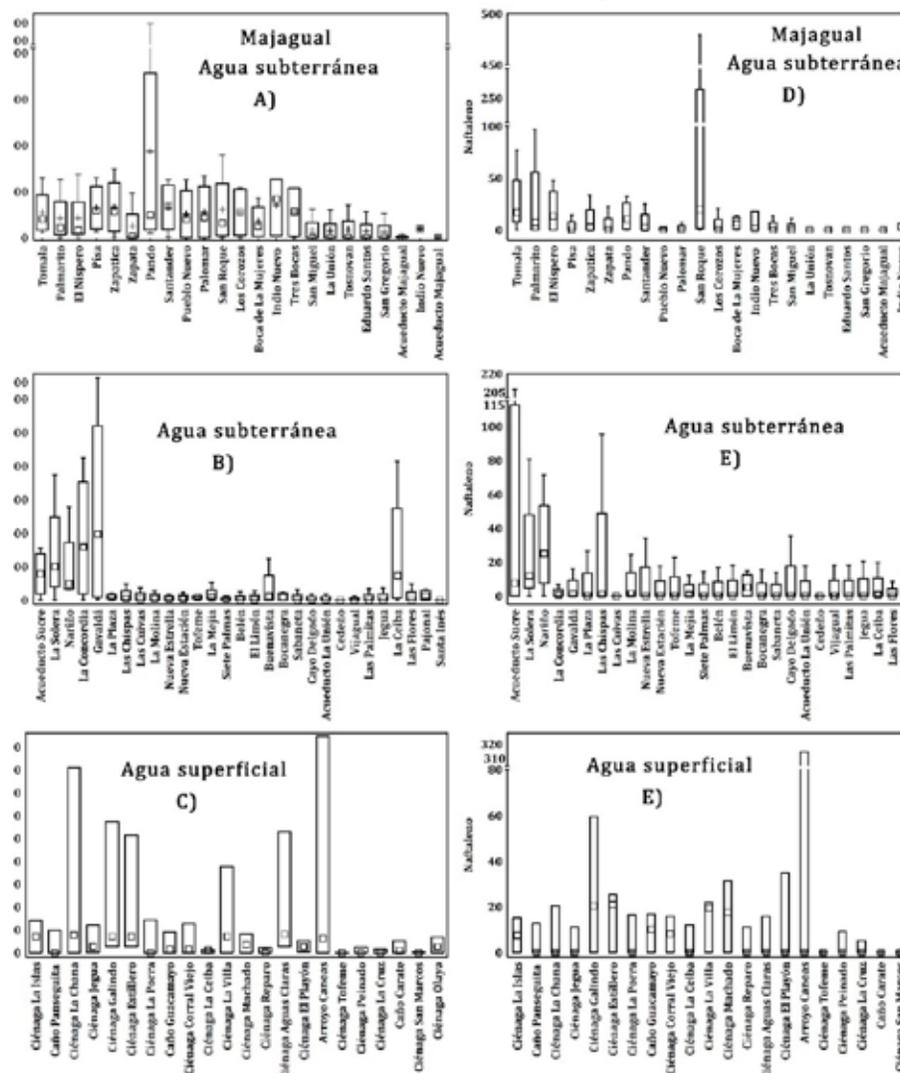
HAPs entre época seca y de lluvia, únicamente Naf presentó diferencias estadísticamente significativas; mientras que el comportamiento de las concentraciones de Naf fue similar al de ΣHAPs, Ace, Flu, Fen, Ant, Flo, cuando se realizó la comparación entre época de lluvia y de transición, lo que demostró diferencias significativas a un nivel $\alpha = 0,05$. Los hidrocarburos Indeno[1,2,3-cd]pireno, dibenzo[a,h]antraceno y benzo[g,h,i]perileno, no se muestran en la Tabla 5 - 2 debido a que se detectaron con poca frecuencia, lo que no permitió una comparación entre épocas de muestreo.

Las concentraciones de ΣHAPs fueron más elevadas para los pozos de El Pando ($932,5 \pm 755,2$ ng/L), Zapatica ($329,5 \pm 165$ ng/L), Santander ($327,8 \pm 144,4$ ng/L) y Pisa ($323,3 \pm 138,5$ ng/L) en Majagual (Figura 5 - 5A); Gavaldá ($529,3 \pm 317,4$ ng/L) y La Concordia ($370,4 \pm 201,9$ ng/L) en Guaranda (Figura 5 - 5B), mientras que para el naftaleno, las estaciones con mayores concentraciones fueron observadas en San Roque ($129,3$ ng/L) en Majagual (Figura 5-5D), Acueducto de Sucre ($56,38$ ng/L) y Nariño ($30,33$ ng/L) (Figura 5-5E).

Tabla 5-2. Estadístico H de Kruskal-Wallis para el comportamiento de los diferentes HAPs por época de muestreo. En la columna “Rango medio” letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

Analito	Época de muestreo	Valor H Kruskal-Wallis, p	n	Rango medio
ΣHAPs	Lluvia	H (2) = 27,80 p = 0,0000	39	63,78 a
	Seca		45	63,11 a
	Transición		80	102,53 b
Naf	Lluvia	H (2) = 11,06 p = 0,0040	31	62,82 a
	Seca		27	43,61 b
	Transición		39	41,74 b
Ace	Lluvia	H (2) = 20,80 p = 0,0000	10	22,45 a
	Seca		13	14,38 a
	Transición		37	38,34 b
Flu	Lluvia	H (2) = 17,39 p = 0,0002	6	14,17 a
	Seca		18	14,53 a
	Transición		17	30,26 b
Fen	Lluvia	H (2) = 19,32 p = 0,0001	15	53,83 a
	Seca		20	59,23 a
	Transición		50	33,26 b
Ant	Lluvia	H (2) = 39,16 p = 0,0000	3	25,67 a
	Seca		21	11,14 a
	Transición		30	39,13 b
Flo	Lluvia	H (2) = 9,08 p = 0,0107	1	2,00 a
	Seca		9	11,22 a
	Transición		26	21,65 b
Acy	Seca	H (1) = 0,50 p = 0,4783	4	22,00 a
	Transición		32	18,06 a
Pir	Seca	H (1) = 7,40 p = 0,0065	11	11,82 a
	Transición		27	22,63 b
BaA	Seca	H (1) = 0,0145 p = 0,9043	2	11,50 a
	Transición		19	10,95 a
Cri	Seca	H (1) = 6,33 p = 0,0119	12	12,83 a
	Transición		26	22,58 b
BbF	Seca	H (1) = 1,26 p = 0,2618	7	11,86 a
	Transición		22	16,00 a
BkF	Seca	H (1) = 14,31 p = 0,0002	7	4,43 a
	Transición		22	18,36 b
BaP	Lluvia	H (1) = 10,02 p = 0,0016	6	3,50 a
	Transición		7	10,00 b

Figura 5-5. Concentraciones de ΣHAPs y naftaleno en a), d) 21 pozos de majagual; b), e) 29 pozos de Guaranda, Sucre, San Marcos, San Benito, La Unión y Caimito y; c), f) ciénagas y caños de La Mojana



En cuanto al agua superficial, el arroyo Canoas presentó una concentración media de ΣHAPs de 335,77 ±305,68 ng/L, seguido de las ciénagas Chana, Galindo, Aguas Claras y Estillero, todas ellas con promedios superiores a 200 ng/L (Figura 5-5C). Para el caso del naftaleno se encontraron las mayores concentraciones en el arroyo Canoas con 105,5 ng/L, seguido de la ciénaga Galindo con 26,63 ng/L (Figura 5-5F). Los pozos de Santa Inés y Cedeño en San Marcos y Camito, y la Ciénaga Tofeme estuvieron libres de HAPs para todas las campañas de monitoreo; por su parte, y adicional a estos tres sitios, los pozos de La Unión, Tosnovan, Eduardo Santos, San Gregorio, Acueducto Majagual, Las Cuivas, así como el caño Carate y la ciénaga de San Marcos estuvieron libres de naftaleno para todas las campañas de monitoreo.

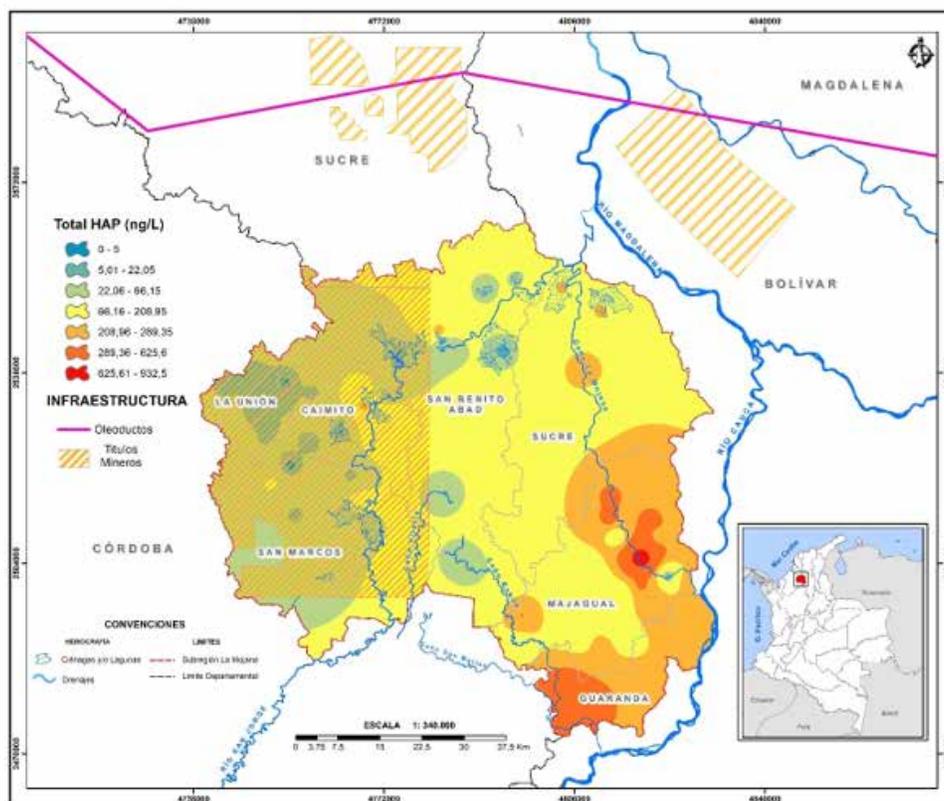
En la Figura 5-6 se presenta el mapa de distribución espacial del promedio de la sumatoria de HAPs en la región de La Mojana, a partir de los sitios de monitoreo con presencia de HAPs en al menos una campaña de muestreo. Los rangos se obtuvieron con base en la estadística descriptiva y el método de interpolación fue el idw (ponderación de distancia inversa).

En este sentido, se encontró que las concentraciones más elevadas de HAPs están asociadas a los municipios de Guaranda, Majagual y Sucre, sobre el cauce del Caño Mojana. En este cauce hay presencia de transporte fluvial en embarcaciones de motor durante periodos de lluvia, cuando la profundidad del cuerpo de agua lo permite; es el único medio de transporte entre los municipios de Majagual y Sucre. Asimismo, sobre esta zona existe la influencia del río Cauca que es una fuente de múltiples contaminantes.

Por otro lado, en la **Figura 5-6** también se evidencia que en el área de los municipios de San Marcos, Caimito y La Unión el rango predominante de HAPs está entre 22,06 y 66,15 ng/L, con algunas áreas, sobre todo en La Unión, con rangos inferiores. Sobre esta área existen concesiones para exploración y explotación de hidrocarburos, también hay áreas de producción de hidrocarburos en los límites del municipio de San Marcos y Pueblo Nuevo (departamento de Córdoba).

El mapa de la **Figura 5-6** también sugiere que, sobre gran parte del área del municipio de San Benito, las concentraciones de HAPs están en el rango de 66,16 a 208,95 ng/L; no obstante, para el área donde se ubican algunas ciénagas monitoreadas se observan rangos más bajos.

Figura 5-6. Distribución espacial del promedio de la Σ HAPs en las 72 estaciones de monitoreo en los municipios de Majagual, Guaranda, Sucre, San Marcos, San Benito, La Unión y Caimito de la región de La Mojana

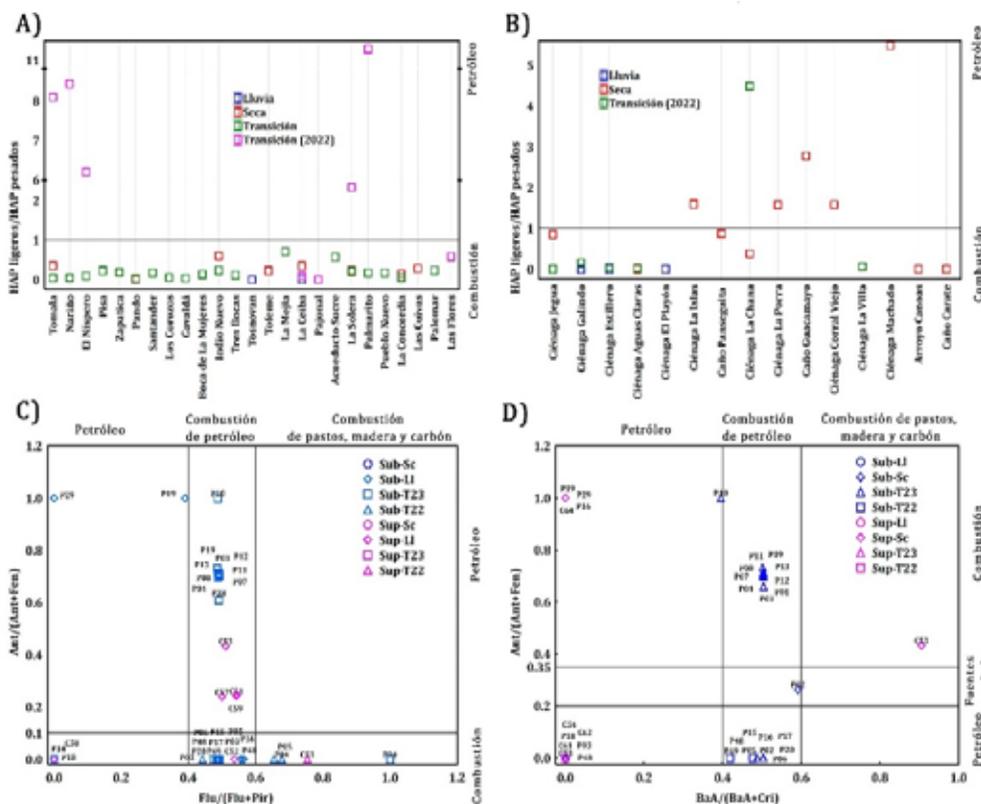


Mediante la relación HAPs ligeros/HAPs pesados, se encontró que en 25 pozos los HAPs son originados de la combustión pues presentaron valores < 1 ; esto ocurre para la época de muestreo de poca lluvia (seca), para la época de transición del año 2023 y para la época de muestreo de mayor lluvia (lluvia). De otro lado, en la época de transición del año 2022, los pozos de Tomala, El Níspero, La Solera y Palmarito en Majagual y Nariño en Sucre presentaron índices > 1 , lo que sugiere una posible fuente de HAPs del petróleo. Es importante señalar, que estas estaciones también presentaron índices < 1 para una o varias campañas de muestreo (**Figura 5-7B**).

En cuanto a las fuentes de HAPs en agua superficial, 10 estaciones de monitoreo exhibieron índices < 1 en diferentes épocas de muestreo (lluvia, seca y transición), algunas sitios como las ciénagas Jegua, Galindo y Estillero y el Caño Aguas claras el múltiples épocas, sugiriendo que, al igual que los observado para el agua subterránea las fuentes de HAPs que predominan en la región de La Mojana son por combustión. Aunque, para seis estaciones (Ciénagas Machado, Las Islas, La Porra, Corral Viejo y La Chana y el Caño Guacamayo) las fuentes de HAPs se asociaron al petróleo por sus índices >1 en la época menos lluvia (seca), a excepción de la ciénaga La Chana en época de transición año 2022; este sitio de monitoreo es el único que mostró un cambio de origen de fuente de HAPs de acuerdo con el índice HAPs ligero/HAPs pesado (**Figura 5-7B**).

En las **Figura 5-7C** y **Figura 5-7D** se atribuyen como posible fuente de los HAPs a la combustión del petróleo para la gran mayoría de las estaciones graficadas, tanto para agua superficial (C51-Ciénaga Las Islas, C52-Caño Panseguita, C53-Ciénaga La Chana, C57-Ciénaga la Porra, C59-Ciénaga Corral Viejo), como para agua subterránea (P02-Tomala P03-La Solera, P04-Palmarito, P06-Los Nísperos, P07-Pisa, P08-Zapatica, P11-Santander, P13-Palomar, P15-Los Corozos, P16-La Concordia, P17-Gavaldá, P19-Indio Nuevo, P20-Tres Bocas, 48-La Ceiba, P49-Las Flores), debido a sus índices de Flu/Flu+Pir y BaA/BaA+Cri entre 0,4 y 0,6. Pese a esto, otras fuentes de HAPs también podrían presentarse para el agua de La Mojana, como es el caso de la estación de Tomala, que tiene un índice entre 0,2 y 0,35, cuyo origen de HAPs se asocia a fuentes mezcladas; también los HAPs de estaciones como Palmarito, Nariño, P24-Eduardo Santos y Ciénaga La Chana podrían asociarse específicamente a la combustión de pastos, madera y carbón.

Figura 5-7. Índice molecular a) HAPs ligeros/HAPs pesados en el agua subterránea y b) superficial para cada campaña de monitoreo. c) antraceno/antraceno + fenantreno vs fluoranteno/fluoranteno + pireno y d) antraceno/antraceno + fenantreno vs benzo[a]antraceno/ benzo[a]antraceno + criseno en diferentes campañas de monitoreo. sup: superficial, sub: subterránea, ll: lluvia, sc: seca, t23: transición 2023, t23: transición 2022



En la región de La Mojana que comprende el departamento de Sucre no se desarrollan proyectos asociados a la explotación de hidrocarburos; y, aunque, el oleoducto Caño Limón Coveñas atraviesa una parte del departamento de Sucre, no contempla ninguno de los siete municipios estudiados. Con todo, en un país como Colombia, la presencia de oleoductos debe ser considerada una fuente potencial de contaminación por HAPs puesto que se reportan numerosos incidentes de derrames por eventos externos al uso y desgaste de la infraestructura que transporta el crudo (59). De igual manera, existen áreas de producción de gas cercanas al área de estudio específicamente hacia el sur, cerca del municipio de San Marcos, donde hay al menos 9 áreas de producción (Nelson, Nispero, Toronja, Palmer, Katana, Arianna, Cañahuete, Cañaflecha y Clarinete), hacia el norte del área de estudio se encuentran las zonas de producción de Saman, Magangué y La Creciente, y cuyo municipio más cercano es San Benito; finalmente, al noreste se encuentra el área de producción Cicuco-Boquete en la margen derecha del río Cauca, donde el municipio más cercano es Sucre (60). Estas áreas de producción de gas, además de estar cerca de los siete municipios estudiados, pertenecen a la misma cuenta sedimentaria y provincia hidrogeológica del Valle Inferior del Magdalena, lo que potencialmente podría permitirles compartir características geológicas, y a nivel del acuífero características semejantes en el agua subterránea (61).

Las actividades más importantes que se desarrollan en esta subregión son la pesca, la ganadería y la agricultura. Si bien en esta región, como parte de la preparación del terreno antes de la siembra, se acostumbra a realizar quemas controladas, las cuales podrían ser una fuente de HAPs; estas actividades son cada vez menos recurrentes pues se han reemplazado por el uso de agroquímicos.

Otra fuente importante de incorporación de HAPs al medio acuático es a través del transporte fluvial, pues en la región de La Mojana se emplean, con frecuencia, medios como los botes con motores fuera de borda para el transporte de pasajeros y carga. Estos medios de transporte son una fuente de HAPs de origen pirogénico, debido a la quema de combustibles fósiles empleados para la navegación.

Conclusiones

Las aguas subterráneas y superficiales de la región de La Mojana se caracterizan por la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) de bajo peso molecular, entre los que se destacan el naftaleno un HAPs de dos anillos aromáticos. La frecuencia de detección de este compuesto orgánico fue la más alta, en comparación con el resto de los HAPs estudiados, seguido del fenantreno, un HAPs de tres anillos aromáticos, aunque sus concentraciones medias fueron bajas, $29,2 \pm 4,02$ y $32,9 \pm 2,41$ ng/L.

Por su parte, la sumatoria de HAPs estuvo entre 0,30 y 3.188,7 ng/L, con una media de 209, indicando que ninguna de las muestras superó la normatividad colombiana para agua de consumo humano. La relación HAPs ligeros/HAPs pesados < 1 , evidenció un posible origen de HAPs de la combustión para la mayoría de las estaciones de monitoreo, con algunas estaciones con un posible origen del petróleo por sus índices > 1 . En cuanto al índice de Flu/Flu+Pir y BaA/BaA+Cri, entre 0,4 y 0,6, respectivamente, sugiere una posible fuente de HAPs en la combustión de petróleo para la mayoría de las estaciones de monitoreo, salvo algunas que presentaron un cambio en la fuente de HAPs para diferentes épocas de muestreo.

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. Jameson CW. Polycyclic aromatic hydrocarbons and associated occupational exposures. [Internet]. IARC Scientific Publications; 2019. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK570325/>
2. IARC. Some Non-heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Some Related Exposures [Internet]. 2010 [citado 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Some-Non-heterocyclic-Polycyclic-Aromatic-Hydrocarbons-And-Some-Related-Exposures-2010>
3. Kipling MD, Waldron HA. Polycyclic aromatic hydrocarbons in mineral oil, tar, and pitch, excluding petroleum pitch. *Prev Med.* 1 de junio de 1976;5(2):262-78.
4. Patel AB, Shaikh S, Jain KR, Desai C, Madamwar D. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Sources, Toxicity, and Remediation Approaches. *Front Microbiol* [Internet]. 2020 [citado 19 de septiembre de 2023];11. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2020.562813>
5. Okere U, Semple K. Biodegradation of PAHs in 'Pristine' Soils from Different Climatic Regions. *J Bioremediation Biodegrad* [Internet]. 2011 [citado 19 de septiembre de 2023]; Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Biodegradation-of-PAHs-in-%E2%80%98Pristine%E2%80%99-Soils-from-Okere-Semple/6e7c2c530d84871be5b8bd1f4f73ae8440f48ae3>
6. Abdel-Shafy HI, Mansour MSM. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egypt J Pet.* 1 de marzo de 2016;25(1):107-23.
7. Mojiri A, Zhou JL, Ohashi A, Ozaki N, Kindaichi T. Comprehensive review of polycyclic aromatic hydrocarbons in water sources, their effects and treatments. *Sci Total Environ.* 15 de diciembre de 2019;696:133971.
8. Domingo JL, Nadal M. Human dietary exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: A review of the scientific literature. *Food Chem Toxicol Int J Publ Br Ind Biol Res Assoc.* diciembre de 2015;86:144-53.
9. Pan LQ, Ren J, Liu J. Responses of antioxidant systems and LPO level to benzo(a)pyrene and benzo(k) fluoranthene in the haemolymph of the scallop *Chlamys ferrari*. *Environ Pollut.* 1 de junio de 2006;141(3):443-51.
10. ATSDR. Chemical and Physical Information. En: *Toxicological Profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)*. Atlanta, Georgia, USA; 1995. p. 209-21.
11. Dybing E, Schwarze PE, Nafstad P, Victorin K, Penning TM. Polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air and cancer. En: *Air Pollution and Cancer* [Internet]. 2013. Disponible en: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Scientific-Publications/Air-Pollution-And-Cancer-2013>
12. DECOS. BaP and PAH from coal-derived sources; Health-based calculated occupational cancer risk values of benzo[a]pyrene and unsubstituted non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons from coal-derived sources - Advisory report - The Health Council of the Netherlands [Internet]. Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport; 2006 [citado 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.healthcouncil.nl/documents/advisory-reports/2006/02/21/bap-and-pah-from-coal-derived-sources>
13. European Chemicals Agency. ECHA Scientific report for evaluation of limit values for polycyclic aromatic hydrocarbons at the workplace. Helsinki, Finland; 2022.
14. Keith LH. The Source of U.S. EPA's Sixteen PAH Priority Pollutants. *Polycycl Aromat Compd.* 15 de marzo de 2015;35(2-4):147-60.
15. Andersson JT, Achten C. Time to Say Goodbye to the 16 EPA PAHS? Toward an Up-to-Date Use of PACS for Environmental Purposes. *Polycycl Aromat Compd.* 15 de marzo de 2015;35(2-4):330-54.
16. Wenzl T, Simon R, Anklam E, Kleiner J. Analytical methods for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in food and the environment needed for new food legislation in the European Union. *TrAC Trends Anal Chem.* 1 de julio de 2006;25(7):716-25.

17. IARC. Some Traditional Herbal Medicines, Some Mycotoxins, Naphthalene and Styrene [Internet]. 2002 [citado 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Some-Traditional-Herbal-Medicines-Some-Mycotoxins-Naphthalene-And-Styrene-2002>
18. MAVDT, MPS. Resolución Número 2115. Sec. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano jun 22, 2007.
19. OMS. Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. 2011 [citado 19 de septiembre de 2023]; Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/44584>
20. Honda M, Suzuki N. Toxicities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons for Aquatic Animals. *Int J Environ Res Public Health*. febrero de 2020;17(4):1363.
21. Power A, White P, McHugh B, Berrow S, McKeown A, Crowley D, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in seabird eggs in Ireland. *Mar Pollut Bull*. 1 de septiembre de 2021;170:112636.
22. Malarkey DE, Hoenerhoff M, Maronpot RR. Carcinogenesis: Mechanisms and Manifestations. En: Haschek WM, Rousseaux CG, Wallig MA, editores. *Haschek and Rousseaux's Handbook of Toxicologic Pathology (Third Edition)* [Internet]. Boston: Academic Press; 2013 [citado 19 de septiembre de 2023]. p. 107-46. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124157590000054>
23. Choudhuri S, Patton GW, Chanderbhan RF, Mattia A, Klaassen CD. From Classical Toxicology to Tox21: Some Critical Conceptual and Technological Advances in the Molecular Understanding of the Toxic Response Beginning From the Last Quarter of the 20th Century. *Toxicol Sci*. 1 de enero de 2018;161(1):5-22.
24. Liang M, Liang H, Rao Z, Xu D. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater from rural areas in eastern China: Spatial distribution, source apportionment and health cancer risk assessment. *Chemosphere*. 1 de noviembre de 2020;259:127534.
25. Vela N, Martínez-Menchón M, Navarro G, Pérez-Lucas G, Navarro S. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from groundwater by heterogeneous photocatalysis under natural sunlight. *J Photochem Photobiol Chem*. 15 de marzo de 2012;232:32-40.
26. Qiao X, Zheng B, Li X, Zhao X, Dionysiou DD, Liu Y. Influencing factors and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater in China. *J Hazard Mater*. 15 de enero de 2021;402:123419.
27. Wang J, Zhao Y, Sun J, Zhang Y, Liu C. The distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in shallow groundwater from an alluvial-diluvial fan of the Hutuo River in North China. *Front Earth Sci*. 1 de marzo de 2019;13(1):33-42.
28. Adekunle AS, Oyekunle JAO, Ojo OS, Maxakato NW, Olutona GO, Obisesan OR. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbon levels of groundwater in Ife north local government area of Osun state, Nigeria. *Toxicol Rep*. 1 de enero de 2017;4:39-48.
29. Montuori P, De Rosa E, Cerino P, Pizzolante A, Nicodemo F, Gallo A, *et al.* Estimation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Groundwater from Campania Plain: Spatial Distribution, Source Attribution and Health Cancer Risk Evaluation. *Toxics*. mayo de 2023;11(5):435.
30. DNP. Estudios, análisis y recomendaciones para el ordenamiento ambiental y el desarrollo territorial de La Mojana - Anexo 3: geología, geomorfología y dinámica fluvial en La Mojana [Internet]. Bogotá D.C.; 2012 [citado 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://docplayer.es/28510542-Estudios-analisis-y-recomendaciones-para-el-ordenamiento-ambiental-y-el-desarrollo-territorial-de-la-mojana.html>

31. Caballero-Gallardo K, Olivero-Verbel J, Corada-Fernández C, Lara-Martín PA, Juan-García A. Emerging contaminants and priority substances in marine sediments from Cartagena Bay and the Grand Marsh of Santa Marta (Ramsar site), Colombia. *Environ Monit Assess*. 24 de agosto de 2021;193(9):596.
32. Angulo-Cuero J, Grassi MT, Dolatto RG, Palacio-Cortés AM, Rosero-Moreano M, Aristizábal BH. Impact of polycyclic aromatic hydrocarbons in mangroves from the Colombian pacific coast: Evaluation in sediments and bivalves. *Mar Pollut Bull*. 1 de noviembre de 2021;172:112828.
33. Burgos-Núñez S, Navarro-Frómata A, Marrugo-Negrete J, Enamorado-Montes G, Urango-Cárdenas I. Polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in the Cispata Bay, Colombia: A marine tropical ecosystem. *Mar Pollut Bull*. 15 de julio de 2017;120(1):379-86.
34. Sarria-Villa R, Ocampo-Duque W, Páez M, Schuhmacher M. Presence of PAHS in water and sediments of the Colombian Cauca River during heavy rain episodes, and implications for risk assessment. *Sci Total Environ*. 1 de enero de 2016;540:455-65.
35. Johnson-Restrepo B, Olivero-Verbel J, Lu S, Guette-Fernández J, Baldiris-Avila R, O'Byrne-Hoyos I, *et al*. Polycyclic aromatic hydrocarbons and their hydroxylated metabolites in fish bile and sediments from coastal waters of Colombia. *Environ Pollut*. 1 de febrero de 2008;151(3):452-9. 0
36. Pachon JE, Sarmiento H, Hoshiko T. Temporal and spatial variability of particle-bound polycyclic aromatic hydrocabons in Bogota, Colombia. *Air Qual Atmosphere Health*. 1 de diciembre de 2014;7(4):567-76.
37. Quijano Parra A, Meléndez Gélvez I. Identificación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en el aire de Cúcuta-Colombia: Efecto gen tóxico. *Rev EIA*. junio de 2014;(21):79-87.
38. Meléndez-Gélvez I, Quijano -Vargas MJ, Quijano -Parra A. Actividad mutagénica inducida por hidrocarburos aromáticos policíclicos en muestras de PM2.5 en un sector residencial de Villa del Rosario-Norte de Santander, Colombia. *Rev Int Contam Ambient*. 31 de octubre de 2016;32(4):435-44.
39. Mueller A, Ulrich N, Hollmann J, Zapata Sanchez CE, Rolle-Kampczyk UE, von Bergen M. Characterization of a multianalyte GC-MS/MS procedure for detecting and quantifying polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHS) and PAH derivatives from air particulate matter for an improved risk assessment. *Environ Pollut*. 1 de diciembre de 2019;255:112967.
40. Quijano Parra A, Quijano Vargas MJ, Meléndez Gélvez I. Cuantificación de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en el material particulado pm2.5 de una zona residencial de Pamplona, Colombia. *Luna Azul*. junio de 2015;(40):85-101.
41. HIMAT. Proyecto Cuenca Magdalena - Cauca Convenio Colombo - Holandés. Vol. 1: Informe General. (Informe Final). I ISRIC Library and map collection [Internet]. 1977 [citado 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://library.wur.nl/WebQuery/isric/2256153>
42. Posada-García L. Controles Fluviales del Río Cauca en la Región de La Mojana. En Popayán, Colombia.; 2006. Disponible en: https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/8074/AA_4051.pdf?sequence=1&isAllowed=y
43. INGEOMINAS, Vargas Quintero MC, editores. Memoria técnica del mapa de aguas subterráneas del departamento de Sucre en escala 1:250.000: exploración y evaluación de aguas subterráneas RS1_02. Bogotá, Colombia: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS); 2002. 137 p.
44. IDEAM. Estudio Nacional del Agua 2022. Bogotá D.C.; 2023. 464 p.
45. APHA, AWWA, WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd edition. Washington, DC: American Public Health Association; 2017. 26 p.

46. IDEAM, INVEMAR. Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua [Internet]. 2021. Disponible en: <https://natura.org.co/wp-content/uploads/2022/06/Protocolo-de-Monitoreo-y-Seguimiento-del-Agua.pdf>
47. US EPA. EPA Method 3535A (SW-846): Solid-Phase Extraction (SPE) [Internet]. 2019 jun [citado 19 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://www.epa.gov/esam/epa-method-3535a-sw-846-solid-phase-extraction-spe>
48. US EPA. Method 8270E (SW-846): Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography/ Mass Spectrometry (GC/MS). Washington, DC.; 2014.
49. Amaringo F, Puerta Y, Molina F. Probabilistic Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Colombian Reservoir. *Bull Environ Contam Toxicol*. 1 de septiembre de 2022;109(3):518-25.
50. Stogiannidis E, Laane R. Source Characterization of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Using Their Molecular Indices: An Overview of Possibilities. En: Whitacre DM, editor. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2015 [citado 19 de septiembre de 2023]. p. 49-133. (*Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*). Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-10638-0_2
51. Masih A, Lal J, Patel D. Contamination and Exposure Profiles of Persistent Organic Pollutants (PAHs and OCPs) in Groundwater at a Terai Belt of North India. *Water Qual Expo Health*. 3 de mayo de 2014;6.
52. Masih A, Saini R, Taneja A. Contamination and exposure profiles of priority Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in groundwater in a semi-arid region in India. *Int J Water*. enero de 2008;4(1-2):136-47.
53. Wang XW, Zhong NN, Hu DM, Liu ZZ, Zhang ZH. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) pollutants in groundwater from coal gangue stack area: characteristics and origin. *Water Sci Technol*. 1 de marzo de 2009;59(5):1043-51.
54. He F, Zhang Z, Wan Y, Lu S, Wang L, Bu Q. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Beijing and Tianjin region: Vertical distribution, correlation with TOC and transport mechanism. *J Environ Sci*. 1 de enero de 2009;21(5):675-85.
55. Łyszczarz S, Lasota J, Szuszkiewicz MM, Błońska E. Soil texture as a key driver of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) distribution in forest topsoils. *Sci Rep*. 19 de julio de 2021;11(1):14708.
56. Srogi K. Monitoring of environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review. *Environ Chem Lett*. 1 de noviembre de 2007;5(4):169-95.
57. Lasota J, Błońska E, Łyszczarz S, Tibbett M. Forest Humus Type Governs Heavy Metal Accumulation in Specific Organic Matter Fractions. *Water Air Soil Pollut*. 8 de febrero de 2020;231(2):80.
58. Corpoica. Análisis agroclimático de la región de La Mojana [Internet]. 1998. Disponible en: https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/11872/60689_63436.pdf?sequence=1&isAllowed=y
59. Ríos J, González JC, García de las Heras M. Environment and armed conflict in Colombia: terrorist attacks against water resources and oil infrastructure in Norte de Santander (2010-2020). *Small Wars Insur*. 2021;0(0):1-29.
60. ANH. Resolución Número 1485 [Internet]. Sec. Por la cual se incorporan unos ajustes al Mapa de Tierras dic 29, 2022. Disponible en: https://www.anh.gov.co/documents/21207/RESOLUCI%C3%93N_No._1485_DEL_29-12-2022.pdf
61. IDEAM. Aguas Subterráneas en Colombia: una Visión General. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM; 2013.



Imagen tomada de Pixabay.com

Capítulo 6

Análisis multitemporal del comportamiento de las áreas húmedas y las plumas de sedimentos de la subregión La Mojana entre 1982 y 2022

Multi-Temporal Analysis of the Behavior of Wet Areas and Sediment Plumes of La Mojana Subregion between 1982 and 2022

Mendoza-Atencio, M. A.¹, Herrera-Arango, J.¹, Rosso-Pinto, M. J.¹, Marrugo-Negrete, J. L.¹, Paternina-Uribe, 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: mariangelica-12@hotmail.com

Resumen

Un análisis multitemporal espacial compara las coberturas a través de la interpretación de información obtenida mediante sensores remotos de un mismo lugar en diferentes fechas. Asimismo, la combinación de diferentes bandas espectrales permite la visualización de diversas características que a simple vista pueden ser indetectables, como presencia de vegetación, cambios en la superficie del agua, concentración de sedimentos y demás. La subregión La Mojana, distribuida en cuatro departamentos al norte de Colombia, ha sufrido impactos climáticos considerables en diferentes periodos, derivados de los efectos del fenómeno El Niño Oscilación del Sur. Teniendo en cuenta que, la región es una zona de almacenamiento hídrico temporal y depósito de los sedimentos vertidos por los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge, la investigación, tuvo como objetivo realizar un análisis multitemporal para estimar el comportamiento de las áreas húmedas y las plumas de sedimentos de la subregión La Mojana durante un periodo de cuarenta años (1982-2022). Los cuerpos de agua de la región se identificaron a partir del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, por su sigla en inglés); y las plumas de sedimentos mediante la combinación de bandas espectrales *Roja + Verde*. Durante el periodo evaluado, se determinó que las ciénagas de estudio, dependiendo del evento climático ocurrido, pueden experimentar una expansión o contracción de hasta un 30 % en su superficie, llegando incluso, en condiciones de precipitación extremas, a unirse y formar un gran cuerpo de agua que alcanza los 4.900 km², aproximadamente. En cuanto a las plumas de sedimentos, el comportamiento observado mostró una tendencia general hacia los rangos de turbidez entre bajo y moderado en la mayoría de las ciénagas de la región, lo cual denota su efecto como sedimentador, a medida que el agua ingresa al sistema cenagoso.

Palabras clave: bandas espectrales, fenómenos climáticos extremos, Landsat, NDWI, sólidos suspendidos.

Introducción

Un análisis multitemporal, es aquel de tipo espacial donde se comparan las coberturas a través de la interpretación de información obtenida mediante sensores remotos, como imágenes satelitales o mapas, fotografías aéreas e imágenes de radar de un mismo lugar en diferentes fechas, permitiendo evaluar los cambios en la situación de las coberturas que han sido clasificadas (1).

Entre los diferentes satélites de observación disponibles, el programa Landsat de la NASA y el Servicio Geológico de EE. UU. (USGS, por sus siglas en inglés), proporciona el registro espacial continuo más largo que existe de la Tierra (2). Este recopila datos e imágenes de la superficie terrestre en distintos rangos de longitud de onda a lo largo del espectro electromagnético, que se almacenan en una banda espectral y son útiles para el mapeo de diferentes características, tales como agua cargada de sedimentos, áreas de aguas poco profundas, límites de vegetación entre tierra y agua, entre otras (3,4).

Asimismo, la combinación de diferentes bandas espectrales puede mejorar la visualización de diversas características que, a simple vista, pueden ser indetectables, como color natural, falso color, presencia de vegetación, cambios en la superficie del agua, concentración de sedimentos y demás (5–9). En el recurso hídrico, de manera particular, la percepción remota permite la detección y el monitoreo de la calidad del agua, la contaminación, las sequías y el impacto del cambio en la cobertura del suelo (10).

Diferentes estudios han señalado de qué manera el agua es un fuerte absorbente de la radiación infrarroja cercana, por lo que solo las longitudes de onda de las bandas en el espectro visible e infrarrojo cercano tienen una penetración eficaz de la luz solar que incide en la misma (11,12). Mientras que la banda azul, empleada con frecuencia en ecosistemas acuáticos, se utiliza para monitorear los sedimentos en el agua, la banda verde se encarga de enfatizar la vegetación; por su parte, la banda roja resulta útil para la distinción entre vegetación y suelo, y el monitoreo de salud de la primera, y la banda del infrarrojo

cercano, donde el agua absorbe casi toda la luz, es buena para definir la interfaz agua/tierra (13). Al mismo tiempo, las imágenes satelitales de resolución alta a moderada, como la serie Landsat a 30 m, pueden proporcionar un contorno claro de los sedimentos brillantes (14).

Por su parte, el análisis de la dinámica de cuerpos de agua, así como de sólidos en suspensión a través de imágenes satelitales, se ha abordado en numerosos estudios alrededor del mundo (7,15–21). Como la investigación realizada por Rokni *et al.* (2014), quienes modelaron los cambios espaciotemporales del lago Urmia en Irán, durante los años 2000-2013, utilizando imágenes Landsat. En el análisis de resultados se identificaron cuatro periodos en los que el cuerpo de agua estudiado sufrió una contracción de 2.805 km² (22). Además, se destacó la efectividad del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, por sus siglas en inglés) propuesto por McFeeters (1996), con enfoque en Componentes Principales (PC en inglés), desarrollado en este estudio con base en el método sugerido por Phua *et al.* (2012), para la detección de cambios en agua superficial (23,24). Dicho enfoque se realizó mediante la técnica de análisis estadístico de igual nombre para transformar la imagen compuesta —a partir de datos Landsat multitemporales— en un nuevo conjunto de variables; los resultados obtenidos demostraron un alto rendimiento para la identificación de cambios entre dos y tres fechas diferentes simultáneamente.

Otros estudios que revisaron la temática de sedimentos en cuerpos de agua, fueron los realizados por Fernandez *et al.* (2014) y Sutari *et al.* (2020); el primero monitoreó el comportamiento de la pluma de turbidez en el embalse Los Molinos en Argentina en el año 2003, y el segundo, estimó las concentraciones de sólidos suspendidos (CSS) en el río Rin en Europa durante el periodo 1995-2016, ambos, a partir del uso de imágenes Landsat, considerando a su vez los datos *in situ* disponibles. En los dos casos se evidenciaron resultados satisfactorios con una precisión aceptable de acuerdo con la información satelital adquirida, teniendo en cuenta, en el caso de la pluma, la evaluación de los mecanismos de dispersión observados, calculados mediante un conjunto de parámetros —caudal, sólidos suspendidos, excedente— basados en las condiciones de desembocadura del río, y, en el caso de las CSS, las mediciones adquiridas (6,20).

Este tipo de investigaciones demuestra la importancia del registro periódico de información multiespectral, y cómo la metodología de análisis multitemporal permite determinar los cambios y los impactos ambientales a través del tiempo. Esto hace posible la planificación del territorio, y ayuda a la comprensión de las problemáticas asociadas al suelo, su evolución y usos—tales como minería aurífera, deforestación, procesos erosivos—, que pueden afectar el recurso hídrico, por lo que se busca, mediante procesos planificados, la solución de estas (25).

Lo anterior, evidencia que promover este tipo de estudios a escala nacional, especialmente aquellos asociados al comportamiento de cuerpos de agua y sedimentos, puede contribuir como una herramienta de análisis —de fácil acceso y aplicación— para la gestión del recurso. En tanto que muchas zonas hídricas del país, con el paso del tiempo, han sufrido cambios considerables al ser afectadas por factores naturales, como fenómenos meteorológicos, geológicos y geomorfológicos, y antrópicos, como actividades industriales, procesos de crecimiento urbano y problemas de contaminación, este proceso de análisis resulta provechoso.

La subregión La Mojana, de acuerdo con el Plan de Gestión Ambiental Regional, ha sufrido impactos climáticos considerables en diferentes periodos, derivados de los efectos del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur en sus fases fría, La Niña, y cálida, El Niño, como los dos casos que se citan a continuación. Durante el evento ocurrido entre los años 2010 y 2012 —fenómeno La Niña—, se afectaron alrededor de 47.000 hectáreas adicionales a las que normalmente se inundan en la jurisdicción como resultado del papel regulador de sus ciénagas, lo cual provocó la pérdida de especies arbóreas, así como el desplazamiento de población humana. En el transcurso del evento correspondiente a los años

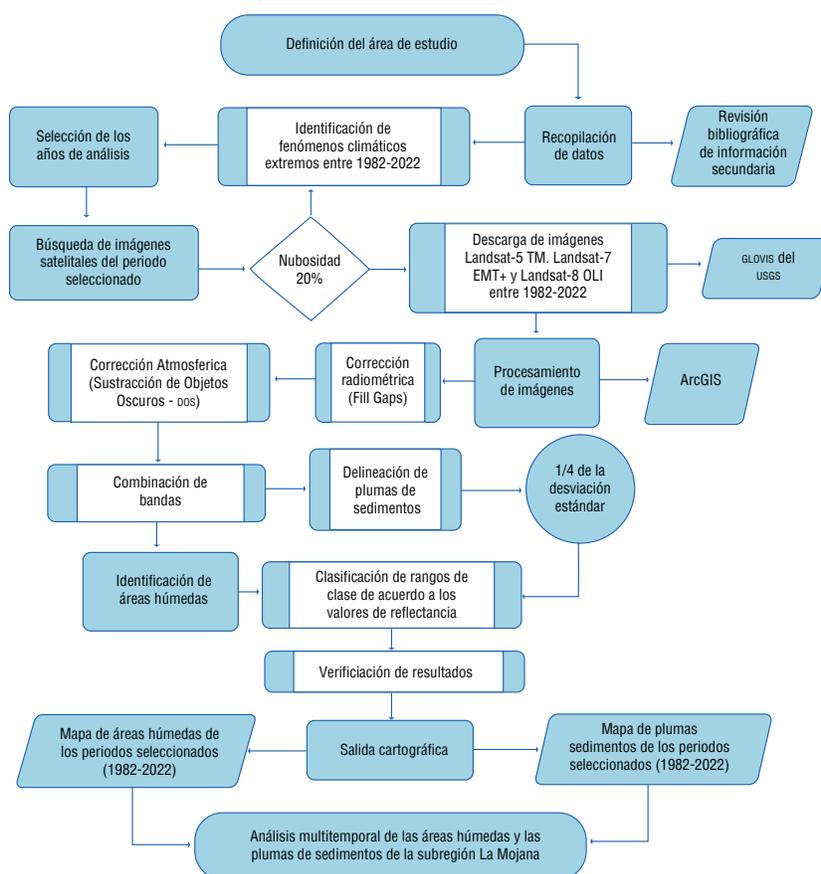
2014-2015 –fenómeno El Niño–, hubo reducciones de hasta el 70 % en los espejos de agua de los humedales, además de incendios en relictos boscosos, zapales y pastizales (26).

Sumado a lo anterior, La Mojana –como se indicó en el capítulo de Introducción al Sistema Acuífero La Mojana– actúa como una zona de depósito sedimentario de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge. Por tanto, el objetivo de esta investigación fue realizar un análisis multitemporal para estimar el comportamiento de las áreas húmedas y las plumas de sedimentos de esta subregión durante un periodo de cuarenta años (1982-2022). Para esto, se utilizaron diferentes combinaciones de bandas espectrales de imágenes Landsat 5 (TM), 7 (ETM+) y 8 (OLI).

Metodología

Con el fin de realizar el análisis multiespectral de la zona de estudio para un periodo de cuarenta años (1982-2022), se llevaron a cabo los procedimientos descritos en la **Figura 6-1**: definición del área de estudio, recopilación de datos, procesamiento de imágenes satelitales, identificación de las áreas húmedas, delineación de las plumas de sedimentos y ejecución del análisis multitemporal de la subregión La Mojana.

Figura 6-1. Diseño metodológico



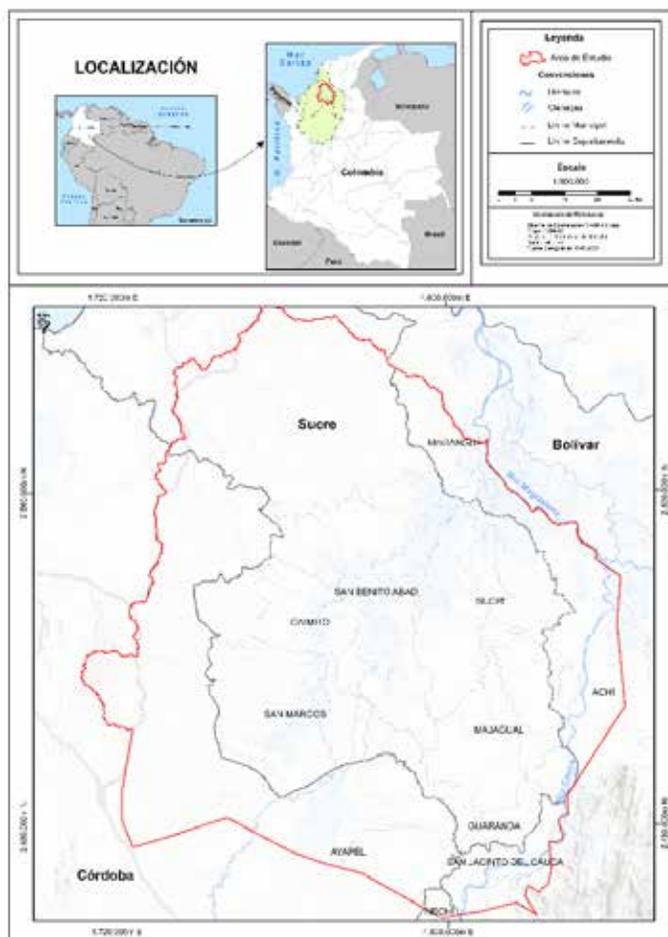
Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361.

Definición del área de estudio

La región de La Mojana, como se indicó en el capítulo de introducción al Sistema Acuífero La Mojana, forma parte de la depresión momposina y cuenta con un área total de 9.097 km², estimada a partir

de los límites establecidos con base en su ubicación al sur del Brazo de Loba; al oeste de la Llanura de inundación del río San Jorge, entre el límite occidental; al este de las estribaciones de la serranía de San Lucas; y al sur de las serranías de Ayapel y Sacramento (**Figura 6-2**). Esta abarca un total de veintidós municipios, distribuidos en cuatro departamentos al norte de Colombia, correspondientes a Sucre, Bolívar, Córdoba y Antioquia, los cuales comprenden un 50,9 %, 32,2 %, 16,2 % y 0,7 % del territorio, respectivamente.

Figura 6-2. Área de estudio



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

La Mojana cuenta con gran variedad de ecosistemas acuáticos, tales como sistemas lóticos, ambientes lénticos, cuerpos de aguas permanentes, variados sistemas temporales, y ecosistemas cambiantes entre léntico y lótico, los cuales, al integrarse con los sistemas terrestres la convierten en una región de alta complejidad ecológica e hidrológica (27).

En épocas de invierno, los planos de inundación formados junto a las ciénagas se anegan, por lo que favorece la acumulación de sedimentos heterométricos con abundancia de materiales finos (28).

Recopilación de datos y descarga de imágenes satelitales

Desde la plataforma de acceso libre Global Visualization Viewer (GLOVIS) del USGS, se adquirieron imágenes satelitales Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ y Landsat-8 OLI de nivel 1 para el periodo 1982-2022 (**Tabla 6-1**), coincidentes con años afectados por eventos climáticos extremos (**Tabla 6-2**) y una nubosidad inferior al 20 %.

Tabla 6-1. Imágenes Landsat adquiridas

N.º	Fecha	Satélite - Sensor	Resolución	Época	Evento climatológico registrado durante la fecha de la imagen
1	24/01/1985	Landsat-5 TM	30 m	Seca	Fenómeno La Niña (moderado)
2	30/01/1987			Seca	Fenómeno El Niño (moderado)
3	20/05/1998			Húmeda	Fenómeno El Niño (fuerte)
4	12/01/2001	Landsat-7 ETM+	30 m	Seca	Fenómeno La Niña (moderado)
5	23/10/2011			Transición	Periodo normal posterior a un fenómeno La Niña (fuerte), finalizado en mayo de 2011
6	07/09/2012			Húmeda	Periodo normal posterior a un fenómeno La Niña (moderado), finalizado en mayo de 2012
7	18/12/2017	Landsat-8 OLI	30 m	Seca	Fenómeno La Niña (débil)
8	17/07/2019			Húmeda	Periodo normal
9	09/01/2020			Seca	Periodo normal previo a un fenómeno La Niña (moderado) iniciado en agosto de 2020
10	28/02/2021			Seca	Fenómeno La Niña (moderado)

Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361 a partir de GLOVIS (consultado el 25 de julio de 2022), IDEAM (2012, 2017), UNGRD (2016, 2021) y Montealegre (2007) (29–33).

Tabla 6-2. Eventos climatológicos de impacto considerable en La Mojana entre 1982-2022

Año	Evento	Referencia	Descripción
May. 1982 – ago. 1983	Fenómeno El Niño	(31)	Evento catalogado como fuerte, sin embargo, no se observaron mayores alteraciones en la precipitación.
1984-1985	Fenómeno La Niña	(34)	El evento de La Niña ocurrido, contrario a lo esperado, registró afectaciones por sequía durante el 67 % de los meses reportados, donde la causa probable de este comportamiento fue que la señal captada fue muy débil.
Oct. 1986 – dic. 1987	Fenómeno El Niño	(31)	Evento catalogado como moderado con una duración de quince meses. Las alteraciones pluviométricas durante este periodo fueron prácticamente imperceptibles.
May. 1988 – mar. 1989	Fenómeno La Niña y huracán Joan	(35)	En 1988 el huracán Joan pasó por el archipiélago de San Andrés y Providencia, con unos vientos de hasta 194 km/h, y llegó a ser denominado tormenta tropical al llegar al Pacífico, se le llamó Miriam. En su recorrido por la costa norte colombiana causó muchos estragos materiales. Este evento, además, coincidió o incidió con un periodo de aparición del fenómeno La Niña, siendo así un año de intensas lluvias e inundaciones en la región.
Oct. 1991 – may. 1992	Fenómeno El Niño	(31)	Catalogado como moderado. Se observaron condiciones de déficit hídrico, las cuales abarcaron extensas áreas en las regiones Andina, Caribe, Pacífico y Orinoquia.
Sep. 1995 – mar. 1996	Fenómeno La Niña y huracán César	(31,36–39)	Este evento tuvo una duración de siete meses. Por otra parte, el 26 julio de 1996, se formó una depresión tropical en el Caribe, la cual posteriormente se convirtió en el huracán César de categoría 4. Este fue notable porque pasó muy cerca de la península de La Guajira.
May. 1997 – may. 1998	Fenómeno El Niño	(32)	Fue uno de los eventos más fuertes del último siglo. Se observaron deficiencias de precipitación en gran parte del país, así como registros históricos de temperaturas máximas, sequías, incendios de cobertura vegetal, y disminuciones de caudal a niveles bajos históricos para los principales ríos de las regiones Andina y Caribe.
Ago. 1999 – feb. 2000	Fenómeno La Niña	(40)	Las inundaciones de este periodo en La Mojana tienen una correlación positiva con la ocurrencia de los eventos del fenómeno de La Niña presentados en estas fechas. En 1999 se registraron un total de 132 eventos de inundación, los cuales dejaron grandes pérdidas para el país.
2000–2001	Fenómeno La Niña	(31)	Evento de categoría débil.
2006–2007	Fenómeno El Niño (tardío)	(32)	Alcanzó la categoría de moderado; no se evidenciaron mayores impactos.
2007–2008	Fenómeno La Niña	(41)	Se presentaron inundaciones severas en La Mojana.
2009	Fenómeno La Niña	(42)	En junio de 2009, ocurrió una transición de un fenómeno de La Niña a El Niño, el cual, a mediados del 2010, retornó a un evento de La Niña. A pesar de su corta duración en el año 2009, este tuvo un fuerte impacto en los patrones de convección y vientos tropicales en el norte de Suramérica; se registraron en el país excesos de precipitación, entre 40-70 %, durante el primer trimestre de este periodo.
Jun. 2009 – may. 2010	Fenómeno El Niño (tardío)	(32)	Provocó una ola de incendios forestales durante la principal temporada seca del país (primer trimestre del 2010); se reportaron un total de 1.878 eventos, los cuales afectaron 83.270 hectáreas.

Año	Evento	Referencia	Descripción
Jul. 2010 – may. 2011	Fenómeno La Niña	(43)	Aumento en el promedio de lluvias hasta en un 300 %, presentándose desbordamientos en los principales ríos del país.
Dic. 2011 – may. 2012	Fenómeno La Niña	(30)	Evento de categoría entre débil y moderado. Se evidenciaron excesos de lluvia, así como crecientes súbitas en la cuenca alta del río Cauca.
2014–2016	Fenómeno El Niño	(32)	Se registró un déficit de lluvia mayor que en el evento 97-98, con un promedio de 37 % para la región Caribe. De igual manera, se observaron temperaturas elevadas, sequías, incendios y disminución en los caudales de los ríos. Además, se reportaron un total de 358 calamidades públicas, de las cuales, 187 fueron por desabastecimiento parcial y racionamiento de agua.
Nov. 2017 – mar. 2018	Fenómeno La Niña	(29)	En noviembre del año 2017, se confirmó el desarrollo de un fenómeno La Niña de características débiles y corta duración. Durante este periodo se registraron excesos de lluvia en los departamentos de Magdalena, Cesar, Sucre, Atlántico, Bolívar, Meta, Chocó, Valle del Cauca, Tolima, Cundinamarca y Norte de Santander.
Ago. 2020 – ene. 2023	Fenómeno La Niña	(33,44,45)	De acuerdo con el IDEAM, este fenómeno inició desde agosto de 2020. Fue catalogado como de intensidad moderada, con niveles excesivos de precipitación en diversas zonas del país entre noviembre y diciembre (>40 %) de 2020, este comportamiento continuó hasta febrero de 2021. Durante el transcurso de este periodo, se presentó un evento triple del fenómeno La Niña, el cual abarcó tres años consecutivos; finalizó en enero de 2023.

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

Procesamiento de imágenes satelitales

Para ejecutar las mejoras radiométricas se utilizó la extensión Fill Gaps de ArcGIS. Los sensores satelitales capturan información de la cobertura terrestre a partir de la intensidad de radiación electromagnética —proveniente de la luz solar que se refleja sobre la superficie de la Tierra—, y la energía dispersada y reflejada por la atmósfera, definida como radiancia. Esta información es transformada y almacenada en una representación discreta de números digitales con una escala artificial determinada, dependiendo de las características específicas de almacenamiento de cada sensor, las cuales pueden estar compuestas por 8 bits, 12 bits y 16 bits (46).

Es decir, la resolución radiométrica hace referencia a la capacidad del sensor para discriminar niveles o intensidades de radiancia espectral. En los sistemas ópticos-electrónicos, esta radiancia se registra en forma matricial mediante un arreglo de celdas, las cuales reportan un nivel digital (ND) proporcional a la cantidad de energía electromagnética recibida. Los sensores existentes pueden distinguir entre 128 y 1024 niveles diferentes (47). A mayor resolución radiométrica, mejor será la capacidad para interpretar la imagen (48).

En consecuencia, los mejoramientos o realces radiométricos se ejecutan para disminuir las distorsiones que afectan los niveles digitales (ND) de una imagen. Este proceso permite convertir la información bruta de cada pixel, de ND a niveles de reflectancia captada por el sensor en el tope de la atmósfera, ayudando a disminuir los efectos de dispersión o absorción generados por la presencia de partículas en la misma. Adicionalmente, busca remover el efecto de incidencia de la energía solar y de la distancia de la Tierra al Sol, producidos como resultado de la diferencia temporal en la adquisición de imágenes (46,47).

De esta manera, se corrigieron los errores en el bandeamiento, sustituyendo los niveles digitales de las líneas con anomalías por el de sus vecinos inmediatos. Esto permite una mejor representación visual de las imágenes defectuosas con información perdida; dichas líneas se restablecen a partir de autocorrelación espacial, tomando como base los valores de los píxeles individuales más cercanos (46).

En cuanto a la corrección atmosférica, se empleó el método de sustracción de objetos oscuros (DOS, por sus siglas en inglés) para normalizar los valores de neblina en las bandas espectrales, este se basa estrictamente en la imagen digital y no requiere de mediciones *in situ*, lo que lo hace relativamente fácil de aplicar (Chávez, 1988, 1996).

Posterior a estos procesos, se evaluaron diferentes combinaciones de bandas espectrales dependiendo del objetivo establecido, como se describe a continuación.

Identificación de las áreas húmedas

Para detectar los cambios presentados en las ciénagas y los canales de La Mojana durante el periodo 1982–2022 y desarrollar el análisis multitemporal propuesto, se extrajeron las áreas húmedas de la zona mediante el cálculo de cuatro índices espectrales: Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, por sus siglas en inglés) (23), Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI, por sus siglas en inglés) (50), Índice Normalizado de la Diferencia de Humedad (NDMI, por sus siglas en inglés) (51) e Índice de Vegetación Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés) (52), los cuales combinan diferentes pares de bandas espectrales, como se puede observar en las siguientes expresiones:

$NDWI = \frac{\rho_{verde} - \rho_{NIR}}{\rho_{verde} + \rho_{NIR}}$	Ecuación 1
$MNDWI = \frac{\rho_{rojo} - \rho_{SWIR}}{\rho_{rojo} + \rho_{SWIR}}$	Ecuación 2
$VDMI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}$	Ecuación 3
$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{rojo}}{\rho_{NIR} + \rho_{rojo}}$	Ecuación 4

Siendo, ρ_{verde} la banda de reflectancia del verde, ρ_{NIR} la del infrarrojo cercano, ρ_{rojo} la del rojo y ρ_{SWIR} la del infrarrojo de onda corta.

Aunque el NDVI fue inicialmente desarrollado para identificar la distribución de la vegetación, su aplicación ha resultado de gran utilidad en la detección de aguas superficiales (5,22). En el presente estudio, se encontró que este índice muestra resultados óptimos para la distinción de cambios en agua superficial, por lo que se implementó en la metodología planteada.

Posteriormente, con el objetivo de identificar los cuerpos de agua de la región para los diferentes años seleccionados, se compararon los índices de humedad y vegetación descritos con anterioridad.

Los índices NDWI, NDVI y MNDWI demostraron un desempeño adecuado para la identificación de las áreas húmedas de la zona de estudio, caso que no se evidenció para el NDMI. Estos resultados, son similares a los observados en el estudio de Rokni *et al.* (2014), quienes destacaron la precisión de los dos primeros, así como la superioridad del NDWI para la extracción de agua superficial de datos Landsat (22).

Como se ha mencionado previamente, este índice hace uso de la radiación infrarroja cercana, fuertemente absorbida por el agua, y la verde, mejorando la presencia de dichas características mientras elimina las del suelo y la vegetación terrestre (11,23). Por tanto, fue el seleccionado para la detección de los cambios –aumento, permanencia o disminución– en la superficie de los cuerpos de agua que conforman La Mojana.

Delineación de las plumas de sedimentos

Con el propósito de detectar y mapear los patrones de distribución espacial de la turbidez en el área de estudio, se delinearon las plumas de sedimentos de las imágenes satelitales adquiridas. Para tal fin, se analizaron diferentes combinaciones de bandas —Landsat-5 TM y Landsat-8 OLI— en el espectro visible e infrarrojo cercano, cuyos valores de reflectancia superficial, comparados con perfiles espectrales *in situ*, han demostrado ser más sensibles a los cambios de concentración de sólidos suspendidos (css) en la superficie del agua (11,53,54).

La combinación de bandas *Roja + Verde* (55) permite observar la css, reflejando diferentes rangos de reflectancia, distribuidos entre valores altos y bajos.

La combinación $\frac{Roja}{Verde}$ (56) no refleja de manera adecuada la css. Esta presenta un rango entre 0-1, donde la mayoría de los valores observados corresponden al rango de reflectancia más bajo.

La combinación *Roja + NIR* (57) deja apreciar la css. La mayoría de los rangos presentados se agrupan en valores cercanos.

La combinación $\frac{Roja + NIR}{2}$ (17) permite observar la css. Al igual que la anterior, la mayoría de los rangos contemplados se agrupan en valores cercanos.

Por último, la combinación $(Roja + Verde) * (Verde + Azul)$ (55) permite observar moderadamente la css. Presenta valores de reflectancia más elevados (≈ 10 veces) comparado con el resto. Se evidencian diferentes rangos distribuidos entre valores altos y bajos.

Para la cualificación de las combinaciones de bandas, se utilizaron intervalos basados en 1/4 de la desviación estándar. Obteniendo resultados coincidentes en la aplicación de las ecuaciones $(Roja + Verde) * (Verde + Azul)$, $\frac{Roja + NIR}{2}$ y *Roja + NIR*, las cuales mostraron rangos de reflectancia similares tanto en contraste como en distribución por la pluma, además, las combinaciones que incluyeron la banda del infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés), presentaron una reflectancia mayor en diferentes zonas del área de estudio.

Una mayor reflectancia en la radiación infrarroja cercana es un indicativo de vegetación densa y sana. De igual manera, dicha banda es útil para la distinción entre tierra y agua debido a la baja reflectividad de esta última en el NIR, por lo que la diferencia, con respecto al resto de áreas, puede estar influenciada por la cantidad y estado de la vegetación presente en las mismas.

En el caso de la ecuación *Roja + Verde*, el contraste obtenido entre las áreas con diferentes cargas de sedimentos es notoriamente mayor. La combinación planteada por Wang *et al.* (2007), en comparación con las demás, presenta diferencias marcadas más notables a lo largo de la pluma, especialmente en aquellas zonas donde el espectro de reflectancia es mayor (55).

Teniendo en cuenta lo anterior, se utilizó la ecuación correspondiente a la suma de las bandas verde —Banda 2 para Landsat 5 y 7, Banda 3 para Landsat 8— y roja —Banda 3 para Landsat 5 y 7, Banda 4 para Landsat 8— (4). Dicha combinación, mostró mayores contrastes en comparación con las otras, resaltando áreas de acumulación de sedimentos que las demás no señalaron, y definiendo la dispersión de sólidos suspendidos dentro de las ciénagas con mayor detalle (55,58–60).

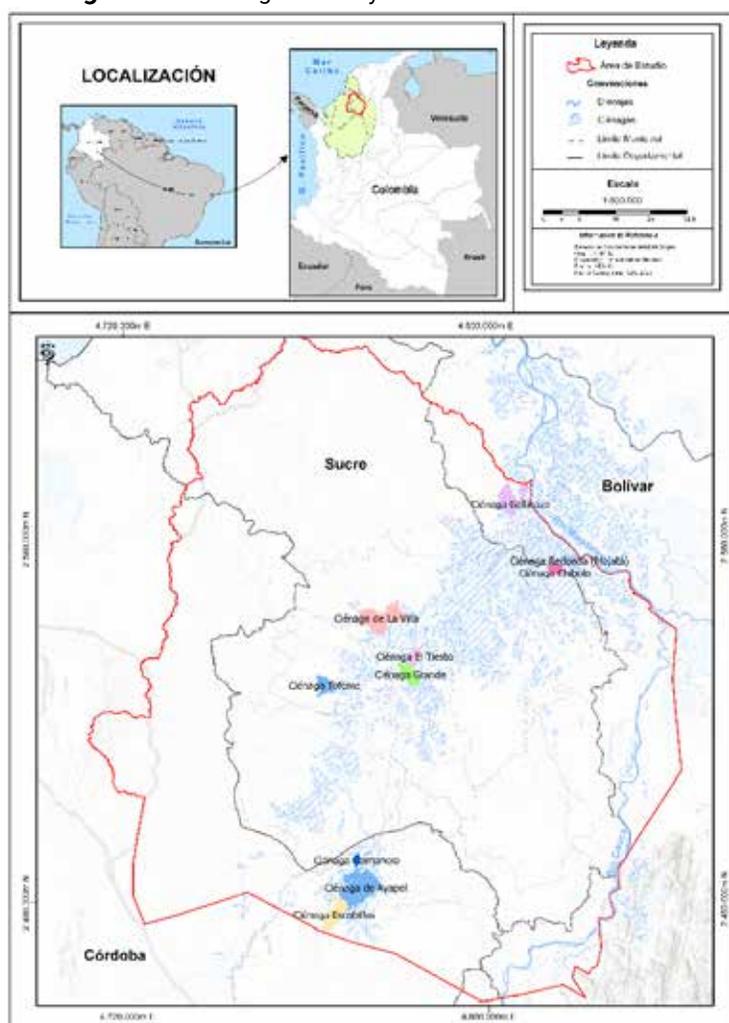
Para identificar las diversas concentraciones de sedimentos en suspensión, se dividió el espectro de reflectancia en diferentes intervalos. Los resultados se categorizaron a partir de rangos de desviación estándar —en este caso $\frac{1}{4}$ — ya que, de esta forma, la comparación de las plumas de sedimentos entre los diferentes periodos resultó más adecuada. Los rangos de reflectancia seleccionados se clasificaron de acuerdo con la concentración de sólidos suspendidos en muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto.

Más adelante, se realizó una comparación entre los rangos de reflectancia obtenidos y la imagen satelital de color natural, la cual muestra detalles de turbidez, así como de procesos de transporte de plumas de sedimentos en aguas poco profundas. Esto dio paso a la ejecución del análisis multianual del comportamiento de los sólidos suspendidos de la zona de estudio.

Ejecución del análisis multitemporal de la subregión La Mojana

Para el desarrollo del análisis multitemporal planteado, se tomaron como enfoque aquellas ciénagas donde se evidenciaron los cambios más significativos de áreas húmedas y plumas de sedimentos de la zona de estudio durante el periodo evaluado. Las ciénagas seleccionadas fueron (**Figura 6-3**): La Villa, El Tiesto y Ciénaga Grande del municipio San Benito Abad (Sucre); Ayapel, Escobillas y Caimanera del municipio de Ayapel (Córdoba); Ciénaga Redonda –Majatá– y Gallinazo del municipio de Magangué (Bolívar); Tofeme del municipio de Caimito (Sucre); y Chibolo del municipio de Sucre (Sucre).

Figura 6-3. Ciénagas de mayor interés del área de estudio



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

Las áreas húmedas (**Figura 6-4**) se identificaron a partir del uso del índice NDWI. El análisis de su comportamiento se realizó mediante la comparación de la superficie de los cuerpos de agua detectados, en aquellos periodos donde se presentaron eventos climáticos extremos que impactaron de manera considerable las ciénagas de La Mojana (**Tabla 6-2**).

El análisis multianual (**Figura 6-5**) de las plumas de sedimentos, se llevó cabo comparando las concentraciones de sólidos en suspensión obtenidas; en primer lugar, entre el año inicial y final de estudio, correspondientes al periodo de 40 años (1982-2022) propuesto, para después continuar con la evaluación de los cambios más representativos que se evidenciaron en el transcurso del periodo definido.

Finalizada la observación general del área de estudio, se tomaron las ciénagas La Villa y Ayapel para el desarrollo de un análisis multianual más específico, ya que estas presentaron un comportamiento particular respecto a las CSS y no mostraron una tendencia definida de acuerdo con los eventos climáticos extremos ocurridos, evidenciándose rangos desde muy bajos hasta muy altos, tanto en la fase fría, como en la fase cálida del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur.

Resultados y discusión

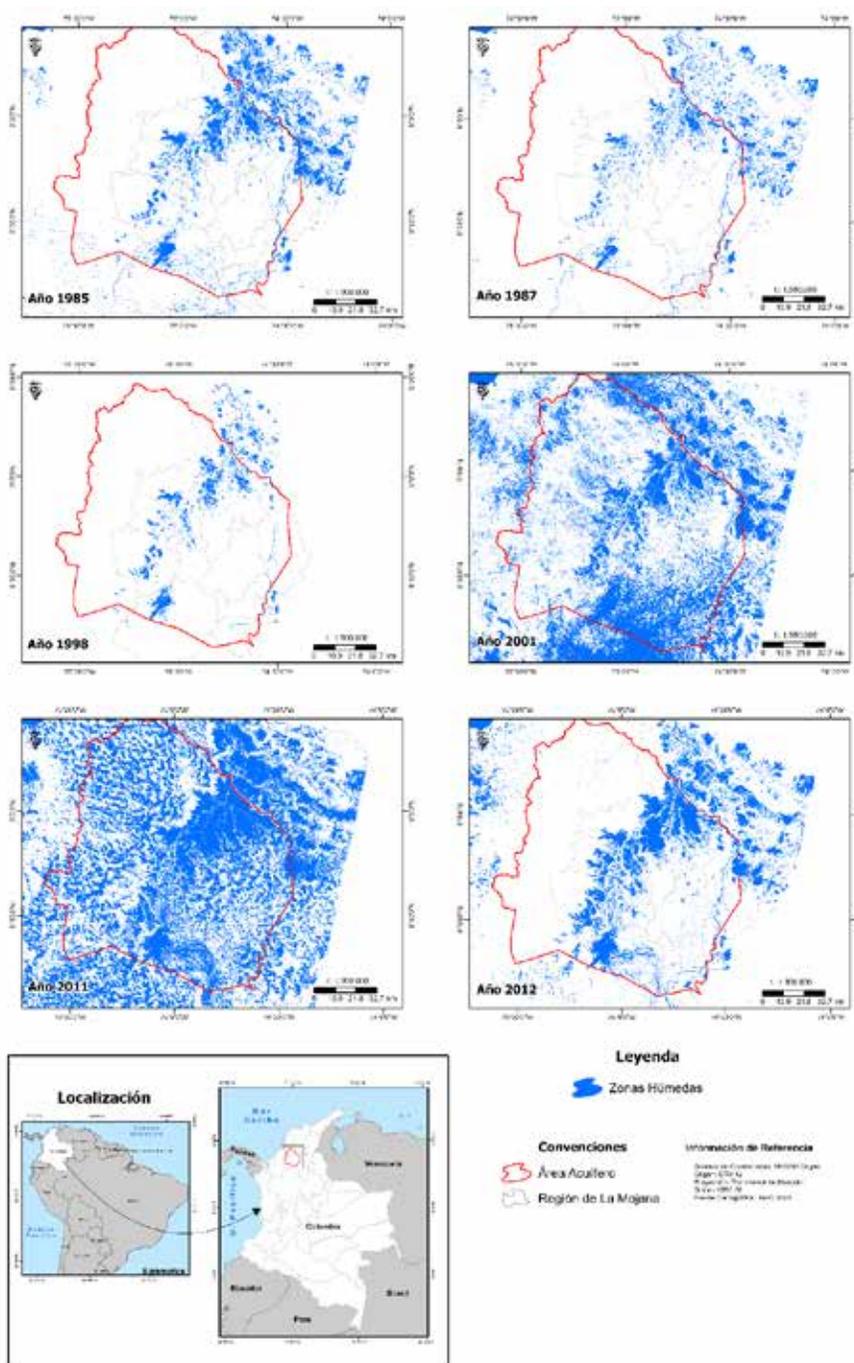
Áreas húmedas

Como se observa en la **Figura 6-4**, los primeros tres escenarios climáticos revelan diferentes comportamientos —estabilidad, disminución y aumento—, respecto a las ciénagas que conforman la región de La Mojana.

Durante el mes de enero del año 1985, correspondiente a un periodo del fenómeno La Niña moderado, se puede observar que el área superficial de las ciénagas no demuestra condiciones de inundación o sequía, comparado con el resto de años evaluados. En el caso de enero de 1987, en el cual se registró un evento del fenómeno El Niño —moderado— se puede evidenciar una clara disminución con respecto al periodo anterior en la superficie de las ciénagas El Tiesto, Ciénaga Grande, Caimanera y Gallinazo, así como en aquellas localizadas al noreste del municipio de San Benito Abad y noroeste del municipio de Sucre, las cuales limitan entre sí.

Para el mes de mayo de 1998, donde se registró uno de los eventos del fenómeno El Niño más fuerte de las últimas décadas, contrario al periodo anterior, se reflejó un aumento en la superficie de las áreas húmedas de las ciénagas mencionadas previamente, así como una leve disminución en la parte baja del conjunto de ciénagas localizadas al noreste del municipio de Sucre. Este aumento pudo deberse a las secuelas derivadas del fenómeno La Niña y el huracán César, ocurridos entre 1995 y 1996; en comparación, durante los años anteriores —1984 y 1985— con el periodo 1987, el evento de La Niña registrado fue de categoría débil, donde se dieron, además, condiciones de sequía en más del 60 % de los meses reportados (**Tabla 6-2**).

Figura 6-4. Áreas húmedas periodos (a) 1985 – fenómeno La Niña moderado; (b) 1987 – fenómeno El Niño moderado; (c) 1998 – fenómeno El Niño fuerte; (d) 2001 – fenómeno La Niña moderado; (e) 2011 – climático normal; (f) 2012 – climático normal



Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361 a partir de imágenes Landsat-5 TM del 24 de enero de 1985; Landsat-5 TM del 30 de enero de 1987, Landsat-5 TM del 20 de mayo de 1998; Landsat-7 ETM+ del 12 de enero de 2001; Landsat-7 ETM+ del 23 de octubre de 2011 y Landsat-7 ETM+ del 07 de septiembre de 2012.

Para enero del año 2001, donde se presentó un fenómeno La Niña de categoría moderado, se reveló un notable aumento –con respecto al periodo 1998– en la superficie de las ciénagas de estudio. No obstante, al ser un año con múltiples eventos de precipitación, la nubosidad presentada era bastante elevada, lo que dificultó la identificación de los cuerpos de agua de estudio, para su eliminación se empleó una metodología empírica de interpretación visual.

Para el mes de octubre de 2011, periodo climático normal posterior a la ocurrencia de un fenómeno La Niña de categoría fuerte —finalizado en mayo de ese mismo año— donde se registró un aumento excesivo en el promedio de lluvias, así como diferentes eventos de desbordamiento de los principales ríos del país. Se pueden evidenciar los efectos derivados en la superficie de las áreas húmedas de la región de La Mojana, especialmente en las ciénagas de Ayapel (Ayapel) en su margen derecho y La Villa (San Benito Abad) en su margen derecho, tanto superior como inferior. Al igual que el 2001, este fue un año con numerosos eventos de precipitación y alta nubosidad, por lo que se aplicó la misma metodología de eliminación para identificar los cuerpos de agua de estudio.

Por último, para el periodo correspondiente a septiembre de 2012 —climático normal posterior a un fenómeno La Niña moderado—, se puede observar una clara disminución en las áreas inundadas alrededor de las ciénagas de estudio, así como en aquellas zonas donde se presentaron desbordamientos, como al este de la ciénaga de Ayapel y al norte de la ciénaga Caimanera.

La superficie total calculada para las áreas húmedas de la región de estudio durante los periodos evaluados fue de aproximadamente 2.965,25 km² para 1985; 1.858,95 km² para 1987; 2.459,45 km² para 1998; 7.396,21 km² para 2001; 6.857,58 km² para 2011; y 4.803,92 km² para 2012.

Entre 1985 y 1987 el sistema cenagoso se contrajo alrededor de un 37,3 % (1.106,30 km²), debido al fenómeno El Niño registrado desde oct-86 hasta dic-87; entre 1987 y 1998 sufrió una expansión de 32,3 % (600,50 km²); entre 1998 y 2001, a causa del fenómeno La Niña presentado en el periodo 2000-2001 las áreas húmedas se extendieron 4.936,76 km² triplicando su tamaño; entre 2001 y 2011, por la intensidad del fenómeno La Niña 2010 (julio) - 2011 (mayo), las ciénagas se expandieron hasta unirse y formar un gran cuerpo de agua, no obstante, comparado con el periodo anterior se reflejó una disminución de 7,3 % (538,63 km²).

A finales del 2011, inició un nuevo evento del fenómeno La Niña de categoría moderado, el cual se mantuvo hasta mayo de 2012. Para septiembre de ese mismo año, se presentó una contracción de 29,9 % (2.053,66 km²) respecto al periodo anterior. Esto, comparado con el primer año evaluado —enero de 1985—, corresponde a una expansión del 60 % (1.838,67 km²) de las superficies inundadas. Por otro lado, las mayores contracciones para mayo de 2012 se observaron en las ciénagas de San Benito Abad, hacia el sur y en el sector noreste; Sucre, hacia el noroeste; y Ayapel, hacia el norte y en los extremos este y oeste.

Resultados similares se produjeron en la investigación desarrollada por Mejía *et al.* (2019), donde se utilizaron imágenes Landsat de tres periodos específicos —1991, 2003 y 2005—, tanto en época seca como húmeda, junto con la aplicación de siete índices hídricos —identificando el NDWI como es el más adecuado— para delimitar los cuerpos de agua del Complejo de Humedales del Bajo Sinú (Colombia) y compararlos durante diferentes periodos estacionales e interanuales. Se hallaron disminuciones de un 56,2 % en la capacidad de almacenamiento de agua, un 24,7 % en el número de cuerpos de agua y un 41 % en el tamaño promedio de estos últimos durante los 25 años de estudio (64). Flórez *et al.* (2018), por su parte, desarrollaron un análisis multitemporal sobre la degradación de humedales altoandinos, localizados en una zona de páramo entre los municipios de Villamaría y Manizales, Colombia, mediante imágenes satelitales e imágenes de radar. En él identifican una pérdida del 67,9 % del espejo de agua durante 2007 y 2016, así como una relación directa entre la pérdida de humedales y la reducción de las precipitaciones (65).

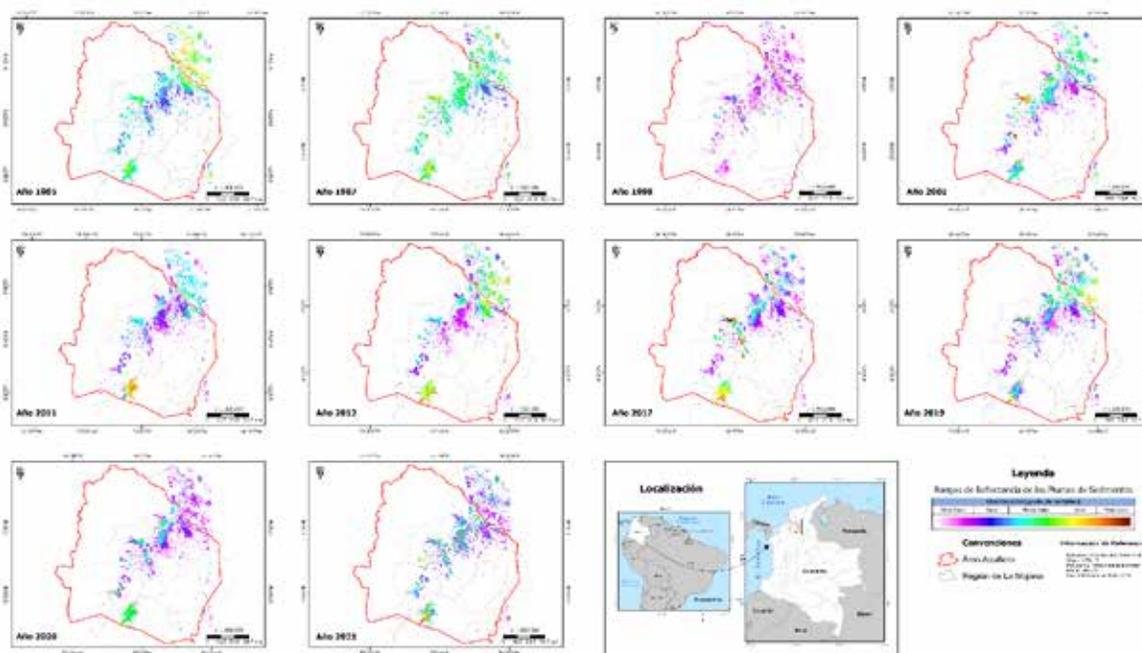
Plumas de sedimentos

La aplicación de la ecuación multiespectral seleccionada (*Roja + Verde*) permitió la identificación del comportamiento de las plumas de sedimentos a lo largo de la zona de humedales de La Mojana durante

los diferentes periodos seleccionados: 1985, 1987, 1998, 2001, 2011, 2012, 2017, 2019, 2020 y 2021. Estos resultados (**Figura 6 - 5**) resaltan zonas de alta concentración, principalmente en las ciénagas de San Benito Abad, Ayapel y Magangué.

Durante enero del año 1985, la pluma se desplazó a lo largo del área de estudio con concentraciones entre bajas y moderadas, principalmente, enfocándose en las zonas con mayor rango —alto— en las ciénagas La Villa (parte central), Ayapel (noroeste), Gallinazo (suroeste) y Redonda (Majatá). Para febrero del 2021, los rangos observados oscilaron entre bajo y moderado en la mayoría de la pluma; no obstante, se puede mostrar que, entre un periodo y otro, la concentración aumentó en diversas partes de los cuerpos de agua estudiados, presentándose rangos de altos a muy altos en las ciénagas Escobillas, Ayapel y Caimanera del municipio de Ayapel, Tofeme del municipio de Caimito y zonas puntuales de las ciénagas La Villa (margen superior derecho), El Tiesto (margen central inferior) y Ciénaga Grande (margen superior e inferior) del municipio de San Benito Abad. Aunque ambas imágenes fueron tomadas en época seca, enero y febrero respectivamente, y corresponden a un mes donde se presentó un evento del fenómeno La Niña de categoría moderado, las concentraciones reflejadas en el 2021 fueron superiores; esto puede deberse a un mayor registro en los niveles precipitación, los cuales provocaron un aumento en el transporte de sedimentos, y, por consiguiente, un incremento en la presencia de sólidos suspendidos en la región de La Mojana.

Figura 6-5. Plumitas de sedimentos (a) año 1985; (b) año 1987; (c) año 1998; (d) año 2001; (e) año 2011; (f) año 2012; (g) año 2017; (h) año 2019; (i) año 2020; (j) año 2021



Fuente: Construcción equipo de trabajo – Proyecto Código BPIN: 2020000100361 a partir de imágenes Landsat-5 TM del 24 de enero de 1985; Landsat-5 TM del 30 de enero de 1987; Landsat-5 TM del 20 de mayo de 1998; Landsat-7 ETM+ del 12 de enero de 2001; Landsat-7 ETM+ del 23 de octubre de 2011; Landsat-7 ETM+ del 07 de septiembre de 2012; Landsat-8 OLI del 18 de diciembre de 2017; Landsat-8 OLI del 17 de julio de 2019; Landsat-8 OLI del 09 de enero de 2020 y Landsat-8 OLI del 28 de febrero de 2021.

En el transcurso de los periodos siguientes (**Figura 6-5**), se registraron cuatro eventos del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur: dos en su fase cálida, El Niño, correspondientes a 1987 –categoría moderado– y 1998 –categoría fuerte–, y dos en su fase fría, La Niña, relativos a 2001 –moderado– y 2011 –fuerte–.

Se puede constatar que para los meses influenciados por el fenómeno El Niño, la pluma se desplaza hacia el norte de la región de estudio con rangos de concentración entre bajo y moderado –principalmente– para enero del año 1987, y muy bajo –en su mayoría– y moderado para mayo del año 1998.

Respecto al fenómeno La Niña, los rangos oscilaron, principalmente, entre bajo y moderado. Se concentró en las zonas con presencia de sedimentos entre rangos altos a muy altos en las ciénagas La Villa de San Benito Abad, La Cruz de San Marcos y Caimanera de Ayapel, para el caso de enero de 2001; y en las ciénagas de Ayapel (zona este) y Caimanera del municipio de Ayapel, para el caso de octubre de 2011, periodo posterior al evento finalizado en mayo de ese mismo año.

Comparando ambos escenarios, se puede observar que, durante la fase fría de este evento, las concentraciones observadas llegan hasta rangos muy altos y que los cambios más notables se evidencian en las ciénagas La Villa, Escobillas, Ayapel y Caimanera, así como en las ciénagas que limitan entre los municipios de Sucre –(noroeste) y San Benito Abad (noreste) junto con aquellas localizadas al noreste del primero, como la ciénaga Chibolo.

El comportamiento observado para la pluma durante los últimos cuatro periodos –2012, 2017, 2019 y 2020– (**Figura 6-5**) fue bastante similar en el conjunto de ciénagas localizadas aguas abajo de San Marcos, con excepción de La Villa, Ciénaga Grande y El Tiesto para 2017, las cuales reflejaron rangos de menor CSS que oscilaron, en su mayoría, entre muy bajo y moderado en el departamento de Sucre, y entre bajo y moderado en el departamento de Bolívar, exceptuando el periodo respectivo a enero de 2020, que para estas últimas presentó rangos, principalmente, muy bajos; en el caso de las ciénagas ubicadas aguas arriba de este municipio en Ayapel (Córdoba), las concentraciones contempladas fueron, en general, mayores.

Las áreas donde se evidenciaron rangos entre altos y muy altos corresponden a las ciénagas Escobillas, Ayapel, Caimanera y Redonda (Majatá) para septiembre del año 2012; las ciénagas Escobillas y Ayapel, así como algunas zonas de La Villa, (mayormente en la parte central), y Ciénaga Grande (este y oeste hacia el sur) para diciembre del año 2017; las ciénagas Escobillas (sur), Caimanera (norte), Tofeme y La Villa (norte) para julio del año 2019; y unos cuantos sectores de las ciénagas que hacen parte de los municipios de San Marcos y Ayapel para enero del año 2020.

En términos climáticos, septiembre de 2012, julio de 2019 y enero de 2020 corresponden a periodos normales, y diciembre de 2017 a un evento del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur en su fase fría, La Niña, de categoría débil. De manera general, los rangos de concentración reflejados oscilaron entre bajo y moderado. Con excepción, principalmente, de las ciénagas La Villa de San Benito Abad, Escobillas, Ayapel y Caimanera de Ayapel, y aquellas localizadas al noreste de Sucre, como Chibolo, las cuales han presentado un comportamiento variable –tanto en rangos de concentración de sólidos suspendidos, como en distribución por la pluma– a lo largo del periodo evaluado. Dicha dinámica se describe en la **Tabla 6-3**.

Tabla 6-3. Concentración de plumas de sedimentos en cuerpos de agua de acuerdo con el periodo analizado

Rangos de concentración de plumas de sedimentos		fecha analizada	condición climática observada
Ciénaga La Villa	Ciénaga de Ayapel		
Moderado, alto	Moderado, alto	Enero de 1985	Fenómeno La Niña moderado
Moderado y muy alto	Moderado y muy alto	Enero de 1987	Fenómeno El Niño moderado
Muy bajo y moderado	Muy bajo y bajo	Mayo de 1998	Fenómeno El Niño fuerte
Moderado y muy alto	Bajo y moderado	Enero de 2001	Fenómeno La Niña moderado
Bajo y moderado	Moderado y muy alto	Octubre de 2011	Climático normal posterior a un fenómeno La Niña fuerte
Bajo y moderado	Moderado y muy alto	Septiembre de 2012	Climático normal posterior a un fenómeno La Niña fuerte
Moderado y muy alto	alto y muy alto	Diciembre de 2017	Fenómeno La Niña débil
Bajo y alto	Muy bajo y moderado	Julio de 2019	climático normal
Bajo y moderado	Muy bajo y moderado	Enero de 2020	Climático normal previo a un fenómeno La Niña moderado
Bajo y moderado	Muy bajo y muy alto	Febrero de 2021	Fenómeno La Niña moderado

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

Los resultados obtenidos en la mayoría de la subregión La Mojana presentan similitudes con el estudio realizado por Cerón *et al.* (2021), quienes analizaron, de forma espacio-temporal (1950-2019), la influencia de El Niño – Oscilación del Sur (ENOS) en la hidrología de la cuenca alta del río Cauca, evidenciando que las descargas de agua bajas se amplifican durante los eventos de El Niño, y las altas durante los eventos de La Niña, consistentes con una disminución e incremento, respectivamente, en la precipitación (66). De igual manera, Salas (2020) señala cómo la hidroclimatología de Colombia está notablemente afectada por el fenómeno ENOS, el cual condiciona la respuesta hidrológica en el país al incrementar o disminuir tanto la lluvia, como los caudales durante La Niña o El Niño, según la región correspondiente (67). Particularmente en América del Sur tropical, el ENOS afecta las condiciones climáticas e hidrológicas en escalas de tiempo que van desde estaciones hasta décadas. Con algunas diferencias regionales en cuanto a sincronización y amplitud. Esta región presenta anomalías negativas de precipitación y caudal con El Niño, y anomalías positivas con La Niña. Al respecto, observaciones del efecto de ENOS muestran que las descargas de los ríos ocurren gradualmente más tarde en los ríos ubicados hacia el este de Colombia y el norte de América del Sur, donde son más pronunciados los impactos de La Niña (68).

En cuanto al flujo de agua y desplazamiento de sólidos suspendidos, el estudio de Restrepo y Kjerfve (2000) relacionó la variabilidad de la descarga de agua y la carga de sedimentos del río Magdalena con el ciclo ENOS. La regresión de la descarga de agua en el Índice de Oscilación del Sur (SOI, por sus siglas en inglés), utilizado para evaluar la fase y la intensidad del ENOS, mostró que el 69 % de la variabilidad del río Magdalena puede ser explicada por el SOI, asociando las descargas altas a la fase de La Niña, y las bajas a la fase de El Niño.

El análisis de las series temporales de carga de sedimentos de 1975-1995 indicó que el evento de La Niña se caracterizó por una carga de sedimentos de $1.600 \times 10^3 \text{ t día}^{-1}$. Correlacionándose de forma positiva con el SOI ($R^2 = 0,54$). Demostrando que tanto la descarga de agua, como la carga de sedimentos están estrechamente vinculadas al ciclo de El Niño-La Niña (69). Resultados similares fueron reportados por Ávila y Gallo (2021), cuya investigación reveló que el delta del río Magdalena presenta condiciones de sedimentación –descargas negativas– durante los años de El Niño, y de erosión –descargas positivas– durante los años de La Niña. En cuanto a las escalas intra-anales, los periodos secos (enero-abril) mostraron tendencias de sedimentación y los periodos húmedos (septiembre-diciembre) de erosión (70).

Ruano (2017) también, de manera particular, analizó el tamaño y direccionalidad de la pluma de sedimentos del río Magdalena en la desembocadura de Bocas de Ceniza, durante el periodo 2000-2017, mediante imágenes satelitales Landsat. La clasificó en zonas de alta (ACS) y baja (BCS) concentración de sedimentos, las cuales se correlacionaron posteriormente con el fenómeno El Niño – Oscilación del Sur a través del ONI. Se identificó que el área promedio de la pluma fue de 954,3 km² y que esta se dispersa principalmente hacia el noroeste. Los resultados además revelaron que el menor aporte de sedimentos se observó durante la segunda temporada seca del año y que el área de ACS (cuya ocupación promedio fue del 19,2 %) presentó una correlación negativa con el ONI (-0,57). Así, se demuestra que a partir del sensoramiento remoto es posible analizar de manera espacial y temporal las plumas de sedimentos, lo que evidencia la posible influencia del fenómeno ENOS (71).

En este sentido, el análisis planteado en el presente estudio muestra elementos de gran importancia sobre la hidrodinámica de las ciénagas de la región. Entre ellos el desplazamiento de las plumas de sedimentos a lo largo de la zona de humedales de La Mojana, y su comportamiento frente a la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos a través de diferentes periodos.

Conclusiones

Los mejores resultados para la identificación de las áreas húmedas se lograron con la aplicación del índice NDWI propuesto por McFeeters (1996) (23). Durante el periodo evaluado, se observó que las ciénagas de estudio, dependiendo del evento climático ocurrido –fenómeno La Niña o El Niño– pueden experimentar una expansión o contracción de hasta un 30 % en su superficie, llegando incluso, en condiciones de precipitación extremas, a unirse y formar un gran cuerpo de agua que alcanza los 4.900 km², aproximadamente.

De igual manera, el estudio realizado por Hernández *et al.* (2016), donde se analizaron los patrones de inundación interanual (1993-2008) e intra-anual (2006-2008) del río San Pedro (México), mediante imágenes satelitales y datos de precipitación y flujo, presenta la teledetección y el análisis de imágenes Landsat como una forma práctica y económica de obtener información espacial sobre el comportamiento de grandes sistemas dinámicos de y monitorear eventos climáticos en sistemas fluviales durante un tiempo prolongado (72).

Por otro lado, la metodología propuesta mostró grandes bondades para la investigación de la distribución de sedimentos a lo largo de la zona de humedales de estudio. Esto permitió la observación de las áreas tanto de mayor, como de menor acumulación de sólidos suspendidos, así como su desplazamiento a través del conjunto de ciénagas que conforman la región, junto con el análisis de su comportamiento ante la ocurrencia de eventos climáticos extremos. La combinación de bandas *Roja + Verde* ofreció los mejores resultados, en comparación con las demás analizadas, para una región de planicies extensas inundables como las de La Mojana.

El comportamiento observado en las plumas de sedimentos durante los años seleccionados mostró una tendencia general hacia los rangos de turbidez entre bajo y moderado en la mayoría de las ciénagas de la región, lo que denota su efecto como sedimentador, a medida que el agua avanza en el sistema cenagoso.

Las ciénagas que exhibieron mayores variaciones espectrales respecto a los eventos climáticos extremos ocurridos entre 1982 y 2022, fueron La Villa en San Benito Abad (Sucre) y Escobillas, Ayapel y Caimanera en el municipio de Ayapel (Córdoba); estas reflejaron concentraciones de sedimentos en suspensión desde muy bajas hasta muy altas, que demostraron un comportamiento particular al actuar como zonas receptoras de los sólidos suspendidos procedentes de los desbordamientos del río Cauca. En ellas se dan procesos de acumulación –alta o baja– de sedimentos, independiente a las condiciones –registradas en cada periodo– del fenómeno El Niño – Oscilación del Sur.

La ciénaga de Ayapel y los cuerpos de agua que la circundan reciben grandes cargas de sedimentos durante los desbordamientos del río Cauca, los cuales son transitados a través de la conexión de brazos que llegan a este núcleo cenagoso. Las mayores concentraciones se reúnen principalmente hacia las zonas sur y este de las ciénagas observadas.

El estudio de Dolan *et al.* (2024), realizado en el delta del río Mackenzie en Canadá, evalúa el traslado de material suspendido, donde los lagos con frecuencia actúan como trampas de agua y sedimentos, limitando o retrasando el movimiento de material hacia el océano costero. En él, se identificó, mediante teledetección con imágenes Landsat, la conectividad funcional de lago a canal —correspondiente a la facilidad con la que el agua cargada de sedimentos se transporta desde los canales distributivos hacia los lagos deltaicos— de 10.362 lagos durante el verano, entre 1984 y 2022. Se encontraron niveles de agua críticos que desencadenan el movimiento de agua de río con alta carga de sedimentos en 5.989 lagos (73).

Por otro lado, en el orden nacional, Carillo (2016) elaboró un modelo aplicado a imágenes de sensores remotos para detectar la cantidad, así como la distribución de la sedimentación en el golfo de Urabá, partiendo de un análisis multitemporal de cinco años (2011–2015) y mediciones *in situ*. El modelo brindó evidencia suficiente para entender la dinámica de sedimentación mensual, anual y por temporada en la zona. Asimismo, demostró cómo, con el uso de imágenes satelitales, es posible realizar un seguimiento del estado de diferentes ecosistemas, cuya información es escasa, teniendo como fin último su preservación y cuidado (74).

Este tipo de investigaciones, que son de fácil acceso y aplicación, pueden contribuir en la estimación del comportamiento de cuerpos de agua superficial y demás factores asociados, como presencia de sólidos suspendidos, transporte de sedimentos y concentración de estos. A su vez, se considera la influencia de eventos climáticos extremos, así como los efectos derivados de estos últimos. Además, dado que la extensión de humedales colombianos, su diversidad y complejidad requiere amplios esfuerzos, tanto humanos como tecnológicos, para la generación de información adecuada que permita la toma de decisiones, los productos derivados de la teledetección se convierten en insumo valioso para el manejo de los cuerpos de agua, las estrategias de conservación y la gestión de riesgos (75).

Para finalizar, la mayor dificultad en este tipo de técnica de análisis se presenta en 1) la consecución de imágenes con baja nubosidad, 2) la corrección del bandeamiento, 3) la identificación y el cálculo de la superficie de áreas húmedas en imágenes con alta nubosidad y 4) la falta de mediciones o de datos de campo para validar los resultados obtenidos con teledetección y análisis multiespectral.

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. Chuvieco E. Fundamentos de teledetección espacial. Madrid: Rialp. S.A; 1990. 453 p.
2. NASA Landsat Science. About Landsat [Internet]. 2022 [citado 13 de agosto de 2022]. Disponible en: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
3. Landsat Missions. usgs science for a changing world. 2022 [citado 8 de agosto de 2022]. Landsat Satellite Missions. Disponible en: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>

4. USGS. USGS science for a changing world. 2022 [citado 18 de julio de 2022]. What are the best Landsat spectral bands for use in my research? Disponible en: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-best-landsat-spectral-bands-use-my-research>
5. CONAE. Índices Espectrales derivados de imágenes satelitales Landsat 8 Sensor OLI [Internet]. 2016. Disponible en: <https://catalogos.conae.gov.ar/landsat8/Docs/IndicesEspectralesDerivadosDeLandsat8.pdf>
6. Fernández RL, Bonansea M, Marques M. Monitoring Turbid Plume Behavior from Landsat Imagery. *Water Resour Manage*. 2014;28(10):3255-69.
7. Kavan J, Wiczorek I, Tallentire G, Demidionov M, Uher J, Strzelecki MC. Estimating Suspended Sediment Fluxes from the Largest Glacial Lake in Svalbard to Fjord System Using Sentinel-2 Data: Trebrevatnet Case Study. *Water*. 2022;14(12):1840.
8. Landsat Missions. USGS science for a changing world. 2021 [citado 8 de agosto de 2022]. Common Landsat Band Combinations. Disponible en: <https://www.usgs.gov/media/images/common-landsat-band-combinations>
9. Rokni K, Ahmad A, Solaimani K, Hazini S. A New Approach for Detection of Surface Water Changes Based on Principal Component Analysis of Multitemporal Normalized Difference Water Index. *Journal of Coastal Research*. 2016;32(2):443-51.
10. USGS NASA. Sharing our Understanding and Engaging with Geosciences through Landsat and Earth Observations. 2019.
11. Baban SMJ. The use of Landsat imagery to map fluvial sediment discharge into coastal waters. *Marine Geology*. 1995;123(3):263-70.
12. Vargas G. Determination of the relative sediment concentration in water bodies using remote sensing methodology. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*. 2017;26(1):11-24.
13. Center for Biodiversity and Conservation (CBC). Landsat Spectral Band Information [Internet]. Practical Guides to Remote Sensing - American Museum of Natural History; Disponible en: https://ibis.geog.ubc.ca/courses/geob373/lectures/Handouts/CBC_landsat_band_info.pdf
14. Barnes BB, Hu C, Kovach C, Silverstein RN. Sediment plumes induced by the Port of Miami dredging: Analysis and interpretation using Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*. 2015;170:328-39.
15. Chu VW, Smith LC, Rennermalm AK, Forster RR, Box JE. Hydrologic controls on coastal suspended sediment plumes around the Greenland Ice Sheet. *The Cryosphere*. 2012;6(1):1-19.
16. González LC, Torres FM, Torregroza AC, Hansen IR, Rodríguez HB. Use of LANDSAT 8 images for depth and water quality assessment of El Guájaro reservoir, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*. 2018;82:231-8.
17. Hughes KE, Wild A, Kwoil E, Geertsema M, Perry A, Harrison KD. Remote Sensing of Landslide-Generated Sediment Plumes, Peace River, British Columbia. *Remote Sensing*. 2021;13(23):4901.
18. Manzo C, Braga F, Zaggia L, Brando VE, Giardino C, Bresciani M, *et al.* Spatio-temporal analysis of prodelta dynamics by means of new satellite generation: the case of Po river by Landsat-8 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018;66:210-25.
19. Ouillon S, Douillet P, Andréfouët S. Coupling satellite data with in situ measurements and numerical modeling to study fine suspended-sediment transport: A study for the lagoon of New Caledonia. *Coral Reefs*. 2004;23:109-22.

20. Sutari CAT, Perk MV der, Middelkoop H. Estimation of suspended sediment concentrations in the Rhine River using Landsat Satellite Images. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci.* 2020;451(1):012079.
21. Waxter M. Analysis of Landsat Satellite Data to Monitor Water Quality Parameters in Tenmile Lake, Oregon [Internet] [Master Thesis]. Portland State University; 2014 [citado 13 de julio de 2022]. Disponible en: <http://archives.pdx.edu/ds/psu/12014>
22. Rokni K, Ahmad A, Selamat A, Hazini S. Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery. *Remote Sensing.* 2014;6(5):4173-89.
23. McFeeters SK. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing.* 1996;17(7):1425-32.
24. Phua MH, Tsuyuki S, Lee J, Ghani M. Simultaneous detection of burned areas of multiple fires in the tropics using multisensor remote-sensing data. *International Journal of Remote Sensing.* 2012;33:4312-33.
25. Flórez GY, Rincon A, Cardona PS, Alzate AM. Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia. *DYNA.* 2017;84(201):95-101.
26. Corporación para el Desarrollo Sostenible de La Mojana y el San Jorge (Corpomojana). Plan de Gestión Ambiental Regional 2016 - 2026 [Internet]. 2016. Disponible en: <http://www.corpomojana.gov.co/web2/jdownloads/extranetcorpomojana/planeacion/pgar/pgar-2016-2026-corpomojana.pdf>
27. Torres J, Pinilla G. Revisión de las características limnológicas de los sistemas acuáticos de la región de La Mojana. Informe final. Estudios, análisis y recomendaciones para el ordenamiento ambiental y el desarrollo territorial de La Mojana [Internet]. Departamento Nacional de Planeación - Universidad Nacional de Colombia; 2011. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/9310/gabrielpinilla.2011.pdf?sequence=1&isAllowed>
28. Mosquera L. Estudio general de suelos de los municipios de Caimito, la Unión de Sucre, Majagual, San Benito Abad, San Marcos y Sucre (departamento de Sucre). Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC; 1986.
29. IDEAM. Boletín informativo sobre el monitoreo de los Fenómenos de variabilidad climática «El Niño» y «La Niña». Boletín número 113 [Internet]. 2017. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/21021/93551518/12_IFN_DIC_21_2017.pdf/8ce5a750-cafb-4171-bdd8-7f370c532bbf?version=1.0
30. IDEAM. Boletín de monitoreo fenómeno El Niño y La Niña 2012 [Internet]. 2012 [citado 22 de agosto de 2022]. Disponible en: t.ly/5W9UC
31. Montealegre E. Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia [Internet]. IDEAM; 2007. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Modelo+Institucional+El+Ni%C3%B1o++La+Ni%C3%B1a.pdf/232c8740-c6ee-4a73-a8f7-17e49c5edda0>
32. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). Fenómeno El Niño: Análisis Comparativo 1997-1998//2014-2016 [Internet]. Bogotá; 2016. 144 p. Disponible en: https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/20564/Fenomeno_nino-2016.pdf?sequence=3&isAllowed=y#:~:text=La%20variabilidad%20clim%C3%A1tica%20expresada%20en,en%20el%20segundo%20caso%2C%20con
33. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). La presencia del Fenómeno La Niña (2020-2021) y su influencia en el clima reciente del país [Internet]. 2021. Disponible en: <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Conocimiento/LA-PRESENCIA-DEL-FENOMENO-LA-NINA-2020-2021-Y-SU-INFLUENCIA-EN-EL-CLIMA-RECIENTE-DEL-PAIS.pdf>

34. Hurtado G, González O. Evaluación de la afectación territorial de los fenómenos El Niño/La Niña y análisis de la confiabilidad de la predicción climática basada en la presencia de un evento. IDEAM-Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Internet]. 2011; Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Evaluaci%C3%B3n+de+la+Afectaci%C3%B3n+Territorial.pdf>
35. Hernández H, Rincón A. Análisis estadístico de los eventos potencialmente catastróficos de origen natural, ocurridos en Colombia entre 1970 y 1990, mediante la utilización del sistema de información sobre desastres, hidrometeorología y medio ambiente Sidhma [Internet]. 2010. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1105&context=ing_ambiental_sanitaria
36. Bernal G, Osorio AF, Urrego L, Peláez D, Molina E, Zea S, *et al.* Occurrence of energetic extreme oceanic events in the Colombian Caribbean coasts and some approaches to assess their impact on ecosystems. *Journal of Marine Systems*. 2016;164:85-100.
37. Enríquez O, Guzmán A, Narváez G. Análisis del comportamiento de la precipitación en el municipio de Buenaventura (Valle del Cauca, Colombia) en condiciones de desarrollo de los fenómenos El Niño y La Niña. *Cuad geogr rev colomb geogr*. 2014;23(1):165-78.
38. Otero LJ, Ortiz JC, Ruiz JK, Higgins AE, Henríquez SA. Storms or cold fronts: what is really responsible for the extreme waves regime in the Colombian Caribbean coastal region? *Nat Hazards Earth Syst Sci*. 2016;16(2):391-401.
39. Wahlström M, Weber G. Central America: Hurricane Cesar. appeal no: 11/96; 1996.
40. Rodríguez A, Ramírez L. Análisis estadístico de los eventos catastróficos de origen natural ocurridos en Colombia entre los años 1990 y 1999, soportado en el sistema de información SIDHMA Unisalle [Internet]. 2014. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/957
41. Muñoz L. Assessment of ecological and socio-economic impacts of meteorological and hydrological drought in Colombian Mojana region. 2018; Disponible en: <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/4546>
42. Aristizábal GL. Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala sobre el noroccidente de Suramérica asociada al ciclo ENOS 2009-2010 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Colombia. 2010; Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/Circulaci%C3%B3n+Atmosf%C3%A9rica+ENOS++2009-2010_GloriaLeon.pdf/b4345abd-fcef-461d-8053-44614dc67d07
43. Villegas P. Caracterización territorial y de inundaciones en la región de La Mojana. 2013; Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/911>
44. IDEAM. Seguimiento al ciclo ENOS El Niño – Oscilación del Sur. Boletín No. 177 [Internet]. 2023. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/21021/125559305/04_ENSO_IFN_ABR_21_2023.pdf/db1846b7-0eb6-4e5d-ae26-338b618c9760?version=1.1
45. Organización Meteorológica Mundial (OMM). El episodio triple de La Niña continúa y prolonga la sequía y las inundaciones [Internet]. 2022 [citado 23 de julio de 2023]. Disponible en: <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-episodio-triple-de-la-ni%C3%B1a-contin%C3%BAa-y-prolonga-la-sequ%C3%ADa-y-las>
46. Aguilar H, Mora R, Vargas C. Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, RapidEye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo FLAASH del software ENVI. *REV GEO*. 2015;2(53):39-59.
47. Tristán P, Wainschenker R, Doorn JH. Normalización de imágenes satelitales en el análisis multi-temporal. En 2008 [citado 20 de junio de 2024]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/20582>

48. Rodríguez OE, Arredondo HA. Manual para el manejo de procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto MODIS de la NASA, aplicado en estudios de ingeniería civil [Internet]. [Bogotá, Colombia]: Pontificia Universidad Javeriana; 2005. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10554/7050>
49. Posada E, Ramírez H, Espejo N. Manual de prácticas de percepción remota con el programa ERDAS IMAGINE 2011 [Internet]. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC): Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica - CIAF; 2021. Disponible en: https://www.un-spider.org/sites/default/files/ManualERDAS_web.pdf
50. Cabrera E, Vargas D, Galindo G, García M, Ordoñez M. Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación Nivel Subnacional Escala gruesa y fina. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM-. Bogotá D. C. Colombia: IDEAM; 2011. 46 p.
51. Chavez P. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*. 1988; 24(3):459-79.
52. Chavez P. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric engineering and remote sensing*. 1996;62(9):1025-35.
53. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2006;27(14):3025-33.
54. Jin S, Sader S. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment*. 2005;94(3):364-72.
55. Rouse J, Hass R, Schell J, Deering D. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium, 1. En Greenbelt, ON, Canada; 1973. p. 309-17.
56. Mertes LAK, Hickman M, Waltenberger B, Bortman AL, Inlander E, McKenzie C, *et al.* Synoptic views of sediment plumes and coastal geography of the Santa Barbara Channel, California. *Hydrological Processes*. 1998;12(6):967-79.
57. Yépez S, Laraque A, Martínez JM, De Sa J, Carrera JM, Castellanos B, *et al.* Retrieval of suspended sediment concentrations using Landsat-8 OLI satellite images in the Orinoco River (Venezuela). *Comptes Rendus Geoscience*. 2018;350(1):20-30.
58. Wang LW, Smith C, Reddy S, Lewis A, Smith A. Evaluation of satellite remote sensing for operational monitoring of sediment plumes produced by dredging at Hay Point, Queensland, Australia. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2007;1.
59. Peterson KT, Sagan V, Sidike P, Cox AL, Martinez M. Suspended Sediment Concentration Estimation from Landsat Imagery along the Lower Missouri and Middle Mississippi Rivers Using an Extreme Learning Machine. *Remote Sensing*. 2018;10(10):1503.
60. Schild KM, Hawley RL, Chipman JW, Benn DI. Quantifying suspended sediment concentration in subglacial sediment plumes discharging from two Svalbard tidewater glaciers using Landsat-8 and in situ measurements. *International Journal of Remote Sensing*. 2017;38(23):6865-81.
61. Flores J, Wu J, Stöckle C, Ewing R, Yang X. Estimating River Sediment Discharge in the Upper Mississippi River Using Landsat Imagery. *Remote Sensing*. 2020;12(15):2370.
62. Hernández B, Canet C, Molina J, Vásquez M. Algorithm to calculate suspended sediment concentration using Landsat 8 imagery. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2019;13:6549-62.
63. Hossain A, Mathias C, Blanton R. Remote Sensing of Turbidity in the Tennessee River Using Landsat 8 Satellite. *Remote Sensing*. 21 de septiembre de 2021;2021:3785.

64. Mejía D, Soto VC, Martínez Z. Spatio-temporal modelling of wetland ecosystems using Landsat time series: case of the Bajo Sinú Wetlands Complex (BSWC)– Córdoba– Colombia. *Annals of GIS*. 2019; 25(3):231-45.
65. Flórez GY, Betancur JF, Monterroso MF, Londoño JM. Temporary wetland evolution in the upper Chinchiná river basin and its relationship with ecosystem dynamics. *DYNA*. 2018;85(207):351-9.
66. Cerón WL, Kayano MT, Ocampo C, Canchala T, Rivera IA, Avila A, *et al.* Spatio-Temporal Variability of Hydroclimatology in the Upper Cauca River Basin in Southwestern Colombia: Pre- and Post-Salvajina Dam Perspective. *Atmosphere*. 2021;12(11):1527.
67. Salas H. Synchronization and interdependence between the cycles of Colombia's hydroclimatology and El Niño-Southern Oscillation [Internet] [Trabajo de grado - Maestría]. [Medellín, Colombia]: Universidad Nacional de Colombia; 2020 [citado 21 de junio de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78420>
68. Poveda G, Mesa OJ. Feedbacks between Hydrological Processes in Tropical South America and Large-Scale Ocean–Atmospheric Phenomena. 1997 [citado 21 de junio de 2024]; Disponible en: https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/10/10/1520-0442_1997_010_2690_fbhpit_2.0.co_2.xml
69. Restrepo JD, Kjerfve B. Magdalena river: interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*. 2000;235(1-2):137-49.
70. Ávila B, Gallo MN. Morphological behavior of the Magdalena River delta (Colombia) due to intra and interannual variations in river discharge. *Journal of South American Earth Sciences*. 2021;108:103215.
71. Ruano DM. Análisis de la variación espacio-temporal de la pluma de sedimentos del río Magdalena [Internet] [Maestría]. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano; 2017 [citado 21 de junio de 2024]. Disponible en: <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20.500.12010/18914>
72. Hernández R, Ruiz A, Berlanga CA, Ponce JT. Analysis of flood pulse dynamics in the lower basin of the San Pedro River (northwestern Mexico) using remote sensing. *Iajar*. 2016;44(2):293-304.
73. Dolan W, Pavelsky TM, Piliouras A. Remote Sensing of Multitemporal Functional Lake-To-Channel Connectivity and Implications for Water Movement Through the Mackenzie River Delta, Canada. *Water Resources Research*. 2024;60(4):e2023WR036614.
74. Carrillo ID. Elaboración de un Modelo Aplicado a Imágenes Modis para la Estimación de los Sólidos Suspendidos Totales en la Desembocadura del Río Atrato [Internet]. 2016 [citado 21 de junio de 2024]. Disponible en: <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3825>
75. Estupiñán LM, Flórez C, Quiñones MJ, Pacheco AM, Santos AC. Detection and characterization of Colombian wetlands using Alos Palsar and MODIS imagery. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*. 2015;XL-7/W3:375-82.



Imagen tomada de Pixabay.com

Capítulo 7

Acumulación de mercurio en variedades criollas de arroz (*Oryza sativa* L.) cultivadas en suelos de la región de La Mojana

Mercury accUmulation in rice (*Oryza sativa* L.) grown in soils of La Mojana region

Laza-Durante, M.¹, Urango-Cárdenas, I.¹, Enamorado-Montes, G.¹, Pinedo-Hernández, J.¹,
Marrugo-Negrete, J.¹, Paternina-Uribe, R.^{1,2}, Peroza-Sierra, J.³

¹ Grupo de investigación en Agua, Química Aplicada y Ambiental, Departamento de Química, Universidad de Córdoba.

² Programa de Regencia y Farmacia, Departamento de Regencia y Farmacia, Universidad de Córdoba.

³ Programa de Ingeniería Agronómica, Departamento de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba.

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

Resumen

En la región de La Mojana, en el norte de Colombia, el cultivo de arroz es uno de las más importantes en la actividad agrícola de la región, es una fuente importante de ingreso y también uno de los alimentos que satisfacen la dieta local. El objetivo de la presente investigación fue analizar la bioacumulación de mercurio (Hg) en diferentes tejidos comestibles y no comestibles de la especie *Oryza sativa* L., en tres variedades criollas y tres variedades comerciales cultivadas en suelos provenientes de la región de La Mojana, para determinar el nivel de riesgo a la salud por la ingesta de arroz con trazas de Hg. El experimento se condujo bajo condiciones de invernadero, en macetas que contenían 10 kg del suelo proveniente de la región de la Mojana (suelo superficial 0-30 cm). La biomasa seca y el rendimiento fueron significativamente influenciados por la variedad de arroz de acuerdo con el test de ANOVA (nivel alfa de 0,05). La biomasa fue significativamente más alta en las variedades criollas en comparación con las variedades comerciales. El rendimiento fue mayor en las variedades criollas, reportándose valores de $3,73 \pm 0,013 \text{ t ha}^{-1}$ para la variedad Fortuna morao que, a su vez fueron valores altos en comparación con los reportados por otros autores para variedades criollas de la región de La Mojana. La acumulación de Hg fue mayor en la raíz, seguida de la cáscara y el grano. No se presentaron diferencias estadísticas significativas para las concentraciones en el grano, donde el Hg varió entre 0,32 y $31,57 \mu\text{g kg}^{-1}$ con una media general de $11,57 \pm 6,64 \mu\text{g kg}^{-1}$. Los factores de bioconcentración fueron superiores a la unidad en todas las variedades comerciales e inferiores a la unidad para las variedades criollas; entre tanto, los factores de traslocación siempre fueron menores a la unidad, con excepción de la variedad Ina blanco donde se observó un valor superior a 1 para el factor de traslocación suelo/cáscara. La ingesta semanal estimada para el Hg estuvo entre 0,004 y $0,829 \mu\text{g kg}^{-1}$ peso corporal por semana, siendo inferior al umbral de $4 \mu\text{g kg}^{-1}$ peso corporal por semana establecido como *ingesta semanal tolerable provisional*. La estimación del cociente de peligro a partir de *ingesta semanal estimada* mostró que la vía de exposición por consumo de arroz no produce un riesgo potencial de acuerdo con la metodología empleada. Otras rutas de exposición a Hg deben ser consideradas en futuras evaluaciones de riesgo a la salud humana.

Palabras clave: bioacumulación, riesgo a la salud, translocación.

Introducción

La minería es una fuente importante de desarrollo económico que plantea desafíos significativos en términos de contaminación ambiental (1). Uno de los contaminantes más preocupantes asociados con la minería es el Hg, un metal pesado que puede tener efectos perjudiciales en los ecosistemas terrestres y acuáticos. La acumulación del Hg afecta la salud de las plantas, altera el equilibrio ecológico y compromete la seguridad alimentaria de las poblaciones locales (2–5). La exposición al Hg representa un grave peligro para la salud humana, debido a que provoca una serie de problemas neurológicos, entre ellos temblores incontrolables, pérdida del equilibrio, neurotoxicidad, malformaciones congénitas y mortalidad perinatal (6). En este contexto, las variedades de arroz criollo, con su potencial adaptación a condiciones locales y su diversidad genética, surgen como una opción viable para abordar los desafíos de la agricultura en suelos contaminados con Hg (7).

El arroz (*Oryza sativa* L) es el alimento básico de más de la mitad de la población mundial, además constituye el sustento económico de los cultivadores de este cereal. Se destaca la producción global en el año 2021 en cerca de 513 millones de toneladas, esto evidencia un incremento de más de tres millones de toneladas en comparación con la cantidad registrada en el año anterior (8). El más reciente pronóstico de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) del año 2023, mostró que la producción global de cereales experimentó un aumento de 5,9 millones de toneladas (un incremento del 0,2 %) en comparación con las cifras del mes anterior; esto representa un total de 2.819 millones de toneladas. Esta indica una elevación anual del 1,1 % y marca un récord histórico en la producción de cereales (9).

En el contexto específico de Colombia, el arroz es un cereal importante en el marco de la canasta básica de la población. Según datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística, en 2023 se produjeron aproximadamente 2,4 millones de toneladas de arroz cáscara, (DANE). Derivado de esta producción, el país se ubicó como uno de principales productores de arroz en América Latina. Durante la primera mitad del año 2023, la cifra estimada para la extensión cultivada de arroz alcanzó las 407.043 hectáreas en el país. Este valor representa un incremento de 49.349 hectáreas en comparación con el total registrado en la misma época del año anterior, que ascendió a 357.694 hectáreas. Este ampliación de un 13,8 % indica una notoria expansión en la superficie destinada al cultivo de arroz en el país en el período mencionado (10).

La Mojana es una extensa área al norte de Colombia y forma parte de la depresión momposina. Esta región se caracteriza por su topografía baja y la presencia de cuerpos de agua, que desempeñan un papel crucial como reguladores de los principales ríos del país, como el Magdalena, Cauca y San Jorge. La altitud de estos cuerpos de agua varía según las temporadas de lluvias y el clima en Colombia, lo cual influye directamente en el caudal de los ríos que fluyen hacia la depresión momposina (11). En la extensa región de La Mojana, la práctica agrícola del cultivo de arroz se establece como un componente de suma relevancia socioeconómica en todos los municipios que hacen parte de la región. Allí, la agricultura del arroz ocupa aproximadamente 513.464 hectáreas. Esta circunstancia otorga al cultivo de arroz un papel importante como principal fuente de recursos destinados a satisfacer las necesidades fundamentales de la población residente (12).

Además de los retos inherentes vinculados a las inundaciones y sequías que impactan la subregión de La Mojana, cobra gran importancia el problema asociado a la contaminación por metales pesados, en particular, el Hg (13). La presencia de este elemento en los alimentos plantea una amenaza directa para la seguridad alimentaria (14). Aunque la explotación aurífera a gran escala no es predominante en esta área, el uso de mercurio en la extracción de oro plantea la posibilidad de contaminación en la región. Esta exposición se origina en gran medida por las conexiones entre las corrientes fluviales que convergen en esta depresión geográfica (15). Se han identificado niveles significativos de Hg en los sedimentos, suelos, peces y macrófitas en la región de la mojana; vale la pena destacar que el ciclo de sequías y precipitaciones desempeña un papel de importancia en la acumulación de este metal (13,16,17).

El objetivo de la presente investigación fue analizar la bioacumulación de Hg en diferentes tejidos comestibles y no comestibles de la especie *Oriza sativa* L., en tres variedades criollas y tres variedades comerciales cultivadas en suelos provenientes de la región de La Mojana, para determinar el nivel de riesgo a la salud por la ingesta de arroz con trazas de Hg. Esta exploración cobra particular relevancia debido a las evidencias científicas que respaldan la capacidad del Hg para ser absorbido por la planta de arroz y llegar al grano (18–22); así mismo, es relevante considerar el potencial riesgo que esto implica para la salud humana (14).

Materiales y métodos

Muestreo y preparación del suelo

Se tomaron aproximadamente 300 kg de suelo superficial (0-30 cm) en un campo donde se han realizado cultivos de arroz durante varios años consecutivos, en el municipio de Majagual (Sucre). El suelo se trasladó hasta las instalaciones del Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental de la Universidad de Córdoba en el municipio de Montería. Para la selección del sitio de muestreo se tuvo en cuenta la influencia por contaminación de Hg, debido a los aportes que hacen los ríos por la hidrodinámica de la zona. En la región de Caño Mojana, perteneciente al municipio de Majagual, se han reportado concentraciones en sedimentos de 1187,6 ng g⁻¹ (23). El suelo se transportó en sacos de polipropileno nuevos que fueron previamente lavados con agua destilada y enjuagados con solución de ácido nítrico

al 5 %; luego, fue homogenizado y analizado para su contenido de Hg total, nutrientes y caracterización fisicoquímica; posteriormente, se cribó con un tamiz 4 y se dividió en dos lotes (24) y; finalmente, se humedeció hasta saturación y quedó listo para realizar el ensayo en donde se comparan las variedades comerciales y criollas.

Ensayo de potes

El experimento se llevó a cabo en una instalación de casa malla, situada en las instalaciones de la Universidad de Córdoba, durante el periodo comprendido entre octubre de 2014 y febrero de 2015. En este lapso, se registró una temperatura promedio de 27,8°C, con una humedad relativa entre el 76-82 %, condiciones climáticamente similares a las de la región de La Mojana. La ubicación geográfica fue a 8°55' de latitud norte y 75°49' de longitud oeste, y a una altitud de 20 metros sobre el nivel del mar.

Las semillas de arroz se clasificaron en dos subgrupos: 1) morfotipos comerciales: Fedearroz 2000, Fedearroz 473, Fedearroz Mocarí, las cuales fueron suministradas por la Federación Nacional de Arroceros de Colombia, y 2) morfotipos criollos: Ligerito belepano, Ina blanco y Fortuna morao, ampliamente cultivados en la región de La Mojana; estos fueron proporcionados por agricultores locales a partir de las semillas de la cosecha del ciclo anterior de arroz. Las semillas se sumergieron en un recipiente con agua durante 2 minutos y se descartaron aquellas que permanecieron flotando. Las semillas que pasaron el control de calidad anterior se consideraron para el experimento. Cada pote con capacidad aproximada de 20 litros, con una altura aproximada de 30 cm y un diámetro superior de 28 cm. En cada pote se agregaron 10 kg del suelo y sembraron 4 semillas.

Manejo agronómico del cultivo

Se realizó control de malezas de manera manual eliminando cualquier competencia para las plantas, de tal forma que no influenciaran su crecimiento. Se implementó un programa de fertilización edáfica basada en el requerimiento nutricional del cultivo. La primera aplicación de fertilizantes, compuesta por DAP (fosfato diamónico) y úrea, tuvo lugar 16 días después de que emergieran las plantas de arroz. Esta combinación permitió suplementar el nitrógeno proporcionado por la urea con fósforo adicional. A los días 45 y 80 después de la emergencia, se llevaron a cabo una segunda y tercera aplicación de urea y KCl (cloruro de potasio) para evitar posibles deficiencias en los macronutrientes esenciales para el desarrollo normal de las plantas. Además, el cultivo fue irrigado adecuadamente, dado que las unidades experimentales estaban contenidas en recipientes plásticos, lo que evitó pérdidas por infiltración. El suministro de agua se realizaba dos veces al día, tanto por la mañana como por la tarde, lo cual aseguró condiciones óptimas sin estrés hídrico.

Monitoreo del cultivo

El monitoreo del cultivo se realizó cada 5 días, verificando las condiciones fitosanitarias y la presencia de malezas. El monitoreo incluyó el registro de la altura de la planta y número de macollas. La medición de las alturas de las plantas se llevó a cabo con un flexómetro, desde la base del tallo de la planta de arroz hasta los ápices de las hojas, con un intervalo de registro de datos de 10 días, continuando así hasta el momento de la cosecha. Para el número de macollas por planta, se realizó un recuento de las macollas de cada planta a los 80 días desde su emergencia, con el propósito de asegurar que este proceso se hubiera desarrollado de manera significativa en las diversas variedades de arroz.

La biomasa en base seca fue determinada al concluir el ciclo de cultivo y se llevó a cabo mediante un corte basal de las plantas, las cuales se colocaron en bolsas de papel previamente rotuladas. Posteriormente, se sometieron a un proceso de secado en un horno a una temperatura constante de 38°C. Durante este proceso, se monitoreó de manera continua el peso de las muestras hasta que se alcanzó un peso constante.

A los 130 días desde la emergencia, se realizó la medición de la producción estimada en kilogramos por hectárea (kg ha^{-1}) con el objetivo de evaluar todos los tratamientos. En primer lugar, se desgranaron las espigas y se pesaron los granos de cada planta individualmente en cada tratamiento. Posteriormente, se calculó el peso promedio por réplica para obtener la producción por planta en cada tratamiento. Este cálculo se utilizó luego para estimar la producción por hectárea de arroz, expresada en kg ha^{-1} , multiplicando el peso promedio por planta por el número total de plantas por hectárea cosechada. Se tuvieron en cuenta, como datos referenciales para la estimación de la productividad (ton ha^{-1}), los valores aproximados promedios que se obtienen en la zona de las variedades tanto criollas como comerciales, teniendo como base que la producción óptima se da entre 200 y 250 plantas m^{-2} .

Análisis físico-químico del suelo

Se realizó análisis químico y físico a los suelos utilizando los siguientes métodos: CIC= capacidad de intercambio catiónico que corresponde a la sumatoria de $\text{Ca}+\text{K}+\text{Mg}+\text{Na}$; pH (potenciométrico relación suelo agua 1:1); materia orgánica (Walkley-Black); textura (método Boyoucos); azufre (monofosfato de calcio 0.008M); fósforo (Bray II) y Ca, K, Mg y Na (acetato de amonio 1M pH 7.0).

Análisis de mercurio total

Las muestras de suelo, raíz, grano y cáscara fueron secadas. Las muestras de suelo, a temperatura ambiente, en una cámara de secado por convección y las muestras de las diferentes partes de las plantas, en una estufa de secado por convección con control de temperatura a 38°C . Todas las muestras fueron finamente pulverizadas; para el caso de las muestras de suelo se empleó un mortero, mientras que, para los órganos de planta se empleó un molino tipo willye. Más adelante, las muestras se pasaron por un tamiz con un tamaño de malla de 20 y 200 mesh, para las plantas y suelo, respectivamente. La determinación de Hg se realizó por descomposición térmica, amalgamación y espectrofotometría de absorción atómica mediante análisis directo con el equipo DMA-80 TRICELL (Milestone) siguiendo el método EPA 7473 (25). El límite de detección fue de 0,01 ng de Hg total por muestra, y las curvas de calibración mostraron valores R^2 superiores a 0,9995. La exactitud se evaluó utilizando el material de referencia CRM 1753a de hojas de tomate, proporcionado por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST), Gaithersburg, MD, EE. UU. Se obtuvieron recuperaciones de $0,0339 \pm 0,0013 \text{ mg kg}^{-1}$, las cuales están dentro del rango permitido por dicho material. Para el análisis de suelos, se empleó el material de referencia IAEA-456 de sedimentos marinos, suministrado por el Departamento de Ciencias Nucleares y Aplicaciones de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), Viena, Austria, con recuperaciones de $0,07 \pm 0,003 \text{ mg kg}^{-1}$, también dentro del rango permitido por este material.

Factores de translocación y bioconcentración

Los factores de bioacumulación se calcularon como la relación entre la concentración de Hg en el suelo y la concentración de Hg en los diferentes tejidos de interés (raíz, grano pilado y cáscara) de las variedades de *Oryza sativa* L (26) de acuerdo con la ecuación 1. Por otra parte, el factor de translocación se calculó de acuerdo con la ecuación 2, mediante la relación entre la concentración de Hg en el grano y en la cáscara, y la concentración de Hg en la raíz.

$$F_{\text{bioacumulación}} = \frac{Hg_{\text{Organo de la planta}}}{Hg_{\text{suelo}}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$F_{\text{translocación}} = \frac{Hg_{\text{grano o cáscara}}}{Hg_{\text{raíz}}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Evaluación del riesgo a la salud humana

Para evaluar la exposición al mercurio (Hg) debido al consumo de arroz, se calculó la ingesta semanal de Hg (IS_{Hg}), expresada en $\mu\text{g Hg kg}^{-1}$ de peso corporal semana⁻¹, utilizando la ecuación 3. Donde, C representa la concentración de Hg en el grano de arroz para cada uno de los tratamientos, medida en $\mu\text{g kg}^{-1}$, y IR es la tasa de consumo semanal de arroz, expresada en gramos por semana (g semana⁻¹). Según Argumedo-García *et al.* (15) en la región de La Mojana, la tasa de consumo semanal de arroz es de 1218 g semana⁻¹. Por su parte, el factor de exposición (FE) se considera igual a 1 cuando la dosis de exposición a un contaminante es igual a la referencia de dosis segura establecida por una agencia reguladora, como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Este factor incorpora las variables de frecuencia la exposición (365 días año⁻¹), duración de la exposición (se consideró como 70 años) y el promedio de exposición o la cantidad de días al año que se debe estar expuesto para observar efectos no cancerígenos (se consideró como 365 días durante 70 años) (27). En este estudio, el peso corporal (PC) empleado para un adulto fue de 60 kg (28).

$$IS_{Hg} = C * \frac{IR}{PC} * FE$$

Ecuación 3

Para evaluar el riesgo no cancerígeno a la salud humana, debido a la exposición de Hg a través del consumo de arroz, se empleó el cociente de peligro (CP_{Hg}) de acuerdo con la ecuación 4 (29). Esta ecuación relaciona la ingesta semanal de Hg calculada en la ecuación 3 con el valor de la ingesta semanal tolerable provisional (ISTP) para el Hg inorgánico, establecido por El Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios $4 \mu\text{g Hg kg}^{-1}$ de peso corporal semana⁻¹ (30)

$$CP_{Hg} = \frac{IS_{Hg}}{ISTP}$$

Ecuación 4

Cuando los valores estimados de se encuentran por debajo de 1 se considera que no existe riesgo, sin embargo, cuando los valores son superiores a 1 se considera que existe riesgo.

Con el objetivo de evaluar el riesgo para diferentes grupos poblacionales, se utilizaron los datos generales de consumo de arroz de la Encuesta Nacional de Situación Nutricional 2005, incluyendo la información específica de consumo para los grupos etarios de 19 a 50 años y de 51 a 64 años (31). También, se tuvieron en cuenta los datos departamentales de consumo per cápita de arroz de la Encuesta Nacional de Calidad de Vida 2021, realizada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y Fedearroz para el primer semestre del 2022, sobre el consumo semanal de arroz por persona, para los departamentos que incluyen municipios dentro de la región de La Mojana, los cuales reportan valores de acuerdo con la zona rural, cabecera municipal y población total (10).

Diseño experimental y análisis estadístico

Para la comparación entre variedades criollas y variedades comerciales se empleó la prueba t anidada. Las variedades criollas conformaron un tratamiento a partir de las tres repeticiones de cada uno de los tres morfotipos (Fortuna morao, Ina blanco, Ligerito belepano) y las variedades comerciales conformaron otro tratamiento formado a partir de las tres repeticiones de cada uno de los tres morfotipos (Fedearroz 2000, Fedearroz Mocari y Fedearroz 473).

Para la comparación entre morfotipos se empleó un análisis de la varianza (ANOVA) de una vía con seis tratamientos: tres tratamientos provenientes de las variedades comerciales y tres tratamientos

provenientes de las variedades criollas, cada tratamiento con tres repeticiones. En los casos en los que el ANOVA dio diferencias estadísticas significativas, se realizaron pruebas de contrastes múltiples de Tukey a un nivel de significancia del 95 %. Los resultados se presentan como la media \pm la desviación estándar de la media. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software GraphPad Prism 8.

Resultados y discusión

Crecimiento y desarrollo de las variedades criollas de arroz

Los resultados de la caracterización del suelo se muestran en la **tabla 7-1**. El suelo empleado presentó una textura franco-arcillosa, caracterizada por un pH ligeramente ácido de 5,7. En términos de composición, se identificó un contenido de materia orgánica del 2,51 %. Además, se observaron concentraciones significativas de calcio ($16,2 \text{ cmol+ kg}^{-1}$), magnesio ($10,4 \text{ cmol+ kg}^{-1}$) y azufre ($55,4 \text{ mg kg}^{-1}$). Sin embargo, las proporciones de potasio ($0,32 \text{ cmol+ kg}^{-1}$) y fósforo ($18,9 \text{ mg kg}^{-1}$) resultaron ser inferiores a las requeridas para el desarrollo fisiológico óptimo de las plantas.

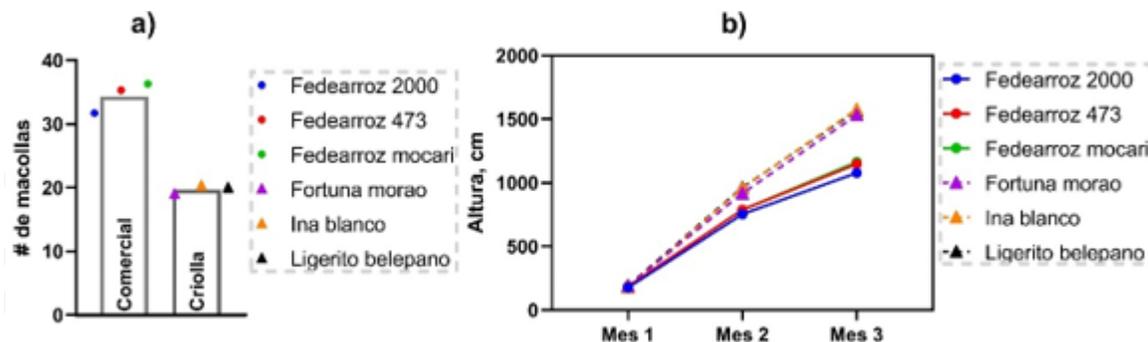
Tabla 7-1. Caracterización del suelo proveniente de Majagual empleado en el ensayo de potes

pH	Materia orgánica %	Azufre mg kg^{-1}	Fósforo mg kg^{-1}	Textura	
5,70	2,51	55,4	18,9	Franco - Arcillosa	
CIC	K	Mg	Ca	Na	Hg
	cmol+ kg^{-1}				mg kg^{-1}
27,0	0,32	10,4	16,2	0,09	0,13

La altura de las plantas y el número de macollas se presenta en la **figura 7-1**. Durante el primer mes, las plantas de *O. sativa* mostraron una altura similar con un rango entre 17,7 y 19,0 cm. No obstante, a partir del segundo mes, las variedades criollas mostraron longitudes notoriamente mayores (91,7-96,3 cm) respecto de las variedades comerciales (75,3-78,7 cm). Para el tercer mes, la diferencia de alturas fue más notoria, duplicando la diferencia del mes anterior, con la variedad criolla Ina blanco que fue de mayor longitud con 157,7 cm, mientras que la variedad Fedearroz 2000 fue la que presentó una menor altura final con 107,7 cm (**Figura 7-1b**). El número de macollas presentó un comportamiento inverso a la altura de las plantas (**Figura -1a**), dado que para las variedades comerciales se observó un mayor número de macollas (31,7 a 36,39 macollas por pote) en comparación con las variedades criollas (19,0 a 20,3 por pote).

Es sabido que la altura de las plantas se encuentra influenciada por factores tanto intrínsecos como extrínsecos, además su desarrollo está condicionado por una combinación entre sus patrones genéticos y cómo este se manifiesta bajo diversas condiciones agroecológicas. Así, la uniformidad en las mediciones de altura de la planta puede derivar de la predisposición genética a mantener esta propiedad constante en ciertas condiciones cualitativas (32); sin embargo, las condiciones de estrés generadas por la presencia del contaminante pueden no ser suficientes para provocar algún tipo de alteración en la altura de la planta (33). Aunque, es factible que en situaciones de estrés más intensas se presenten modificaciones en esta variable (34). Por otra parte, la diferencia entre el número de macollas de las variedades criollas y las variedades comerciales es atribuible al material genético, más que a las condiciones ambientales, dado que el número de macollas podría relacionarse con el rendimiento del cultivo, esta podría ser una desventaja de las variedades criollas respecto de las variedades comercial (35).

Figura 7-1. Variables morfométricas obtenidas de variedades comerciales y criollas del cultivo de *O. Sativa* L. a) número de macollas a los 80 días después de la emergencia y b) altura promedio (cm) mensual de las diferentes variedades de arroz analizadas en este estudio



Efecto sobre la biomasa y rendimiento

Los valores medios para la biomasa seca (g), y el rendimiento ($t\ ha^{-1}$) de cada variedad se presentan en la **Tabla 7-2**. Los valores máximos de biomasa y rendimiento se reportan para las variedades criollas, destacándose la variedad Fortuna morao con una biomasa y rendimiento de $366,16 \pm 56,50\ g$ y $3,73 \pm 0,013\ t\ ha^{-1}$. Estos valores de rendimiento para las variedades criollas son superiores a los reportados por Cadena y Reza, (36) en donde el mayor rendimiento obtenido en granjas del municipio de Majagual fue de $2,81\ t\ ha^{-1}$ en 2010; también, por Cárdena-Torres *et al.* (11), quienes reportaron rendimientos promedio de $2,25\ t\ ha^{-1}$, sin embargo, el rendimiento promedio de todos los municipios estudiados estuvo por debajo de $2,3\ t\ ha^{-1}$. Estas diferencias pueden deberse a la vulnerabilidad que se presenta en los agricultores locales, principalmente por la variabilidad climática y un manejo inadecuado de los paquetes tecnológicos, los cuales fueron controlados en el presente experimento. Con relación a las variedades comerciales, presentaron tanto biomasa como rendimientos inferiores a las variedades criollas, con los valores más bajos para Fedearroz Mocari con $178,46 \pm 32,25\ g$ de biomasa y un rendimiento de $2,45 \pm 0,004\ t\ ha^{-1}$.

Tabla 7-2. Biomasa seca, rendimiento de variedades criollas y comerciales de *O. sativa* L. cultivadas en suelos de La Mojana, prueba t anidada y ANOVA de una vía. Los tratamientos que comparten letras son estadísticamente iguales ($\alpha=0,05$) de acuerdo con la prueba de Tukey

Variedades	Tipo de variedad	Biomasa seca, g				Rendimiento, $t\ ha^{-1}$			
Fortuna morao	Criolla	366,13 \pm 56,50 a				3,73 \pm 0,013 a			
Ina blanco		364,61 \pm 33,83 a				2,62 \pm 0,019 b			
Ligerito belepano		302,89 \pm 42,14 ac				3,62 \pm 0,005 c			
Fedearroz 473	Comercial	180,31 \pm 58,20 b				2,47 \pm 0,003 dg			
Fedearroz 2000		215,00 \pm 22,22 bc				2,25 \pm 0,001 e			
Fedearroz mocari		178,46 \pm 32,25 b				2,45 \pm 0,004 fg			
Prueba t anidada		p=0,003 t=6,517 df=4				p=0,053 t=2,729 df=4			
ANOVA		SS	DF	MS	F; valor p	SS	DF	MS	F; valor p
Tratamiento entre columnas		1,768	5	0,3536	10,47; p<0,001	0,7037	5	0,1407	11897; p<0,001
Residual (intracolumnas)		0,4052	12	0,03377		0,000142	12	0,00001183	
Total		2,173	17			0,7038	17		

El ANOVA de una vía mostró que tanto la biomasa como el rendimiento fueron significativos ($p < 0,05$). Aunque todos los tratamientos presentaron diferencias estadísticas en el rendimiento (excepto entre Fedearroz Mocari y Fedearroz 473, como se indica con letras diferentes en la Tabla 7 - 2), la prueba t anidada reveló que no hay diferencias significativas entre las variedades criollas y comerciales ($p = 0,053$). En cambio, para la biomasa, se encontraron diferencias altamente significativas ($p < 0,01$).

Se debe prestar especial atención al hecho de que las variedades criollas alcanzaron mayores biomasa y rendimientos, aun cuando se realizó un manejo agronómico similar para todos los tratamientos, basado en los requerimientos del suelo de La Mojana. Esto podría sugerir la gran adaptabilidad de las variedades criollas a este tipo de suelo contrastado. Se puede esperar que, al evaluar diferentes genotipos de una especie, bajo las mismas condiciones, se presente una variabilidad en algunas características poligénicas, debido a la plasticidad fenotípica propia de los individuos (37).

Acumulación de mercurio en los tejidos de las plantas

La **Figura 7-2** muestra las concentraciones medias de Hg en raíz, grano y cáscara para los 6 morfotipos estudiados. La acumulación de Hg en los diferentes tejidos mostró la siguiente tendencia: raíz > cáscara > grano, excepto para la variedad Ina blanco, en donde la concentración en la cáscara superó la concentración de la raíz. Los morfotipos de arroz estudiados lograron bioacumular niveles de Hg en las raíces ($104,91$ a $199,99 \mu\text{g kg}^{-1}$) hasta un orden de magnitud similar al que se encontraban expuestas ($130 \mu\text{g kg}^{-1}$ de Hg en el suelo), con excepción de Fedearroz Mocari, para la cual se hallaron concentraciones 2 y 3 veces mayores que el resto de las variedades ($345,2 \pm 196,9 \mu\text{g kg}^{-1}$). Algunos estudios manifiestan que las plantas usan a las raíces como un mecanismo de defensa ya que la mayor parte del contaminante queda almacenado en las raíces, donde la placa de hierro de la superficie de la raíz actúa como una barrera crítica para el transporte de Hg a las partes aéreas (21,38,39).

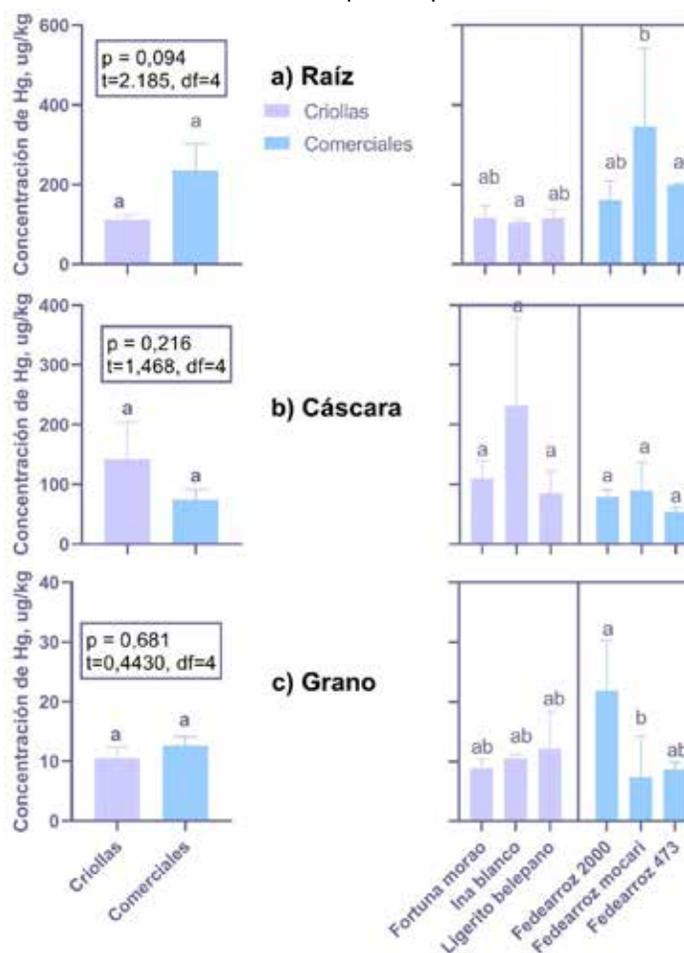
Por otro lado, en las variedades Fedearroz 473 y Ligerito belepano, la concentración de Hg en la cáscara alcanzó el mismo orden de magnitud ($109,65 \pm 29,58 \mu\text{g kg}^{-1}$ y $231,43 \pm 147,37 \mu\text{g kg}^{-1}$, respectivamente) que la concentración del suelo. Esto supone una necesidad de hacer seguimiento a la disposición de este residuo, dado que en diferentes localidades rurales de la región de La Mojana suele usarse como suplemento alimenticio para animales de corral e incluso para cerdos. La acumulación de Hg en el grano fue limitada con valores entre $0,32$ y $31,57 \mu\text{g kg}^{-1}$, y una media general de $11,57 \pm 6,64 \mu\text{g kg}^{-1}$; el promedio obtenido para la variedad Fedearroz 2000 fue de $21,84 \pm 8,47 \mu\text{g kg}^{-1}$, superando ligeramente el límite permisible para alimentos del estándar chino, el cual se encuentra fijado en $20 \mu\text{g kg}^{-1}$, con una de tres réplicas superando el umbral (40).

La concentración de Hg en la raíz de las variedades criollas frente a la concentración de Hg en la raíz de las variedades comerciales fue estadísticamente igual ($p = 0,094$). En promedio, las variedades comerciales bioacumularon más Hg en la raíz, un comportamiento similar se observó para la concentración de Hg en el grano, donde la concentración de Hg fue ligeramente superior para las variedades comerciales, sin diferencias estadísticas comparadas con el grupo de variedades criollas. A diferencia de los tejidos mencionados, en la cáscara la concentración de Hg fue ligeramente superior en el grupo de variedades criollas, respecto del grupo de las variedades comerciales, sin diferencias estadísticas entre ambos grupos ($p = 0,681$).

En la **Figura 7-2b** se puede apreciar que, aunque la variedad Ina blanco mostró niveles de Hg en la cáscara más altos, en comparación con el resto de las variedades criollas y comerciales, la prueba de Tukey mostró que la concentración fue estadísticamente similar al resto de tratamientos. En general, se encontraron pocas diferencias entre tratamientos, sin importar el tejido estudiado.

Es conocido que el Hg puede interactuar con las diferentes partes de la planta de arroz, y que puede presentarse vía suelo-planta (39). El mecanismo de absorción por la planta podría ser similar al proceso aceptado para los micronutrientes (39). Sin embargo, también es aceptado que el mecanismo puede cambiar dependiendo de la especie, orgánica e inorgánica, del metal (41). Mayores concentraciones de Hg en la raíz pueden atribuirse a que es este órgano el que se encuentra directamente en contacto con el medio contaminado, lo cual ha sido evidenciado para diferentes especies vegetales (34,42,43), incluido el arroz (14,20,21,39). Asimismo, se espera que al incrementarse las concentraciones de Hg en el suelo, se incrementen las concentraciones de Hg en la raíz (22).

Figura 7-2. Concentraciones de Hg en a) raíz, b) cáscara y c) grano de las variedades criollas y comerciales cultivadas en suelos de La Mojana. df=grados de libertad. Los tratamientos que comparten letras son estadísticamente iguales ($\alpha=0,05$)



Las concentraciones de Hg en el grano para las variedades comerciales y criollas son consistentes con los reportados por Argumedo *et al.* (7), para arroz comercializado en las localidades rurales de Bajo Perano ($18,4 \pm 0,38 \mu\text{g kg}^{-1}$) y Caño Rabón ($15,7 \pm 0,47 \mu\text{g kg}^{-1}$), en el municipio de San Marcos; pero, no se especifica qué tipo de variedad se empleó en dicho estudio. Asimismo, los resultados obtenidos en el presente trabajo, bajo condiciones controlados en casa malla, son comparables a los reportados por Marrugo-Negrete *et al.* (44) quienes monitorearon cultivos de arroz en los municipios de Guaranda, San Marcos, Sucre, San Benito y Majagual de la región de la Mojana, y observaron concentraciones de Hg en el grano de 15,3, 12,0, 11,6, 10,5 y 8,7 $\mu\text{g kg}^{-1}$, respectivamente.

En cuanto a otros estudios en Colombia, se han reportado concentraciones similares a las de nuestro estudio en la región del Atrato, donde Caicedo-Rivas *et al.* (45) reportaron concentraciones de $12,02 \pm 2,2$ para el medio Atrato y de $1,51 \pm 0,1 \mu\text{g kg}^{-1}$ en Vigía del Fuerte. Por su parte, Alfaro-Rodríguez *et al.* (46)

hallaron concentraciones de Hg de 22 a 24 $\mu\text{g kg}^{-1}$ en granos de arroz cultivados en la cuenca del río Bogotá. Como contraparte, los niveles de Hg en el grano en nuestro estudio son ligeramente superiores a los referidos por Han *et al.* (27) para 143 variedades de arroz comercializadas en el mercado de Guiyang, quienes localizaron concentraciones de Hg entre 0,97 y 13,1 $\mu\text{g kg}^{-1}$, con una media de 3,88 $\mu\text{g kg}^{-1}$.

Lo anterior podría sugerir que la acumulación de Hg en el grano de *O. sativa* es limitada y no representaría ningún tipo de riesgo. No obstante, en China se ha reportado que el grano de arroz puede acumular Hg en niveles entre 52,0 a 632,2 $\mu\text{g kg}^{-1}$ cuando se cultiva en suelos con alto contenido de Hg (4,7 mg kg^{-1}), lo que sugiere que la acumulación es dependiente de las características fenotípicas y genotípicas (47).

En el caso de áreas rurales de la provincia de Guizhou, donde las concentraciones de Hg en el grano de arroz superaron los 70 $\mu\text{g kg}^{-1}$, una evaluación de riesgo de múltiples fuentes de exposición a Hg y metilmercurio (MeHg), incluido el pescado, mostró que el MeHg contribuía en más de un 90 % de la ingesta probable diaria, lo que sugiere que la fuente de exposición por consumo de arroz puede llegar a ser más relevante que otras fuentes de exposición como el consumo de pescado (48).

Factores de bioacumulación y translocación

En la **Tabla 7-3** se presentan los factores de bioconcentración (FBC) y translocación (FT) para las variedades de arroz estudiadas en el experimento. Se observa que las tres variedades comerciales presentan FBC suelo/raíz superior a la unidad, entre 1,22 y 2,66. En conjunto, las variedades comerciales también sobrepasaron el límite de 1, sugiriendo el potencial de bioacumulación de Hg en las raíces de *O. sativa* L., incluso en suelos con concentraciones bajas de Hg como los del presente estudio. Los FBC raíz obtenidos se encuentran en el rango de los reportados por Liu *et al.* (49) quienes encontraron FBC entre 0,86 y 3,9 para variedades de arroz cultivadas en China, en suelos con concentraciones de Hg en el rango de 35 y 140 $\mu\text{g kg}^{-1}$. Los FBC suelo/grano y suelo/cáscara fueron inferiores a la unidad, demostrando la poca habilidad de *O. sativa* L., para transferir el Hg desde el suelo hasta el tejido superior en las variedades comerciales.

Las variedades criollas presentaron FBC suelo/raíz inferior a la unidad en todos los tratamientos y también en el conjunto de las tres variedades. Esto podría sugerir una habilidad para prevenir la transferencia del Hg desde el suelo hacia otros órganos de la planta. Los demás factores de bioconcentración suelo/grano y suelo/cáscara también fueron menores a 1, e incluso fueron menores que el factor de bioconcentración en la raíz ($\text{FBC}_{\text{raíz}}$). No obstante, el factor de translocación en la raíz – cáscara ($\text{FT}_{\text{raíz-cáscara}}$) para la variedad Ina blanco fue superior la unidad, siendo el único tratamiento y el único de los factores de translocación (FT) calculados para el cual se observó este comportamiento.

En general, las variedades de *O. sativa* L. de nuestro estudio presentaron una habilidad limitada para traslocar el Hg desde el suelo o la raíz hacia los tejidos aéreos, sobre todo hacia el grano. Algunos autores sugieren que valores de $\text{FBC}_{\text{raíz}} \leq 1$ indican que la planta puede absorber el metal, pero no lo puede bioacumular (49). No obstante, para el caso de la especie *O. sativa* L., la bioacumulación de Hg ha sido ampliamente estudiada, y se ha demostrado que se encuentra mediada por la cantidad de MeHg en el suelo. Cuanto más MeHg hay en el suelo, mayor es la posibilidad de bioacumulación de MeHg en cualquier órgano; sin embargo, la metilación de Hg en suelos se encuentra limitada por diferentes factores ambientales y biológicos. En cuanto al Hg inorgánico, es aceptado que existen dos fuentes posibles de su presencia en el grano: una vía es por absorción desde las raíces y translocación hacia el grano, pero la mayor cantidad de Hg inorgánico proviene de la absorción foliar del Hg atmosférico (49).

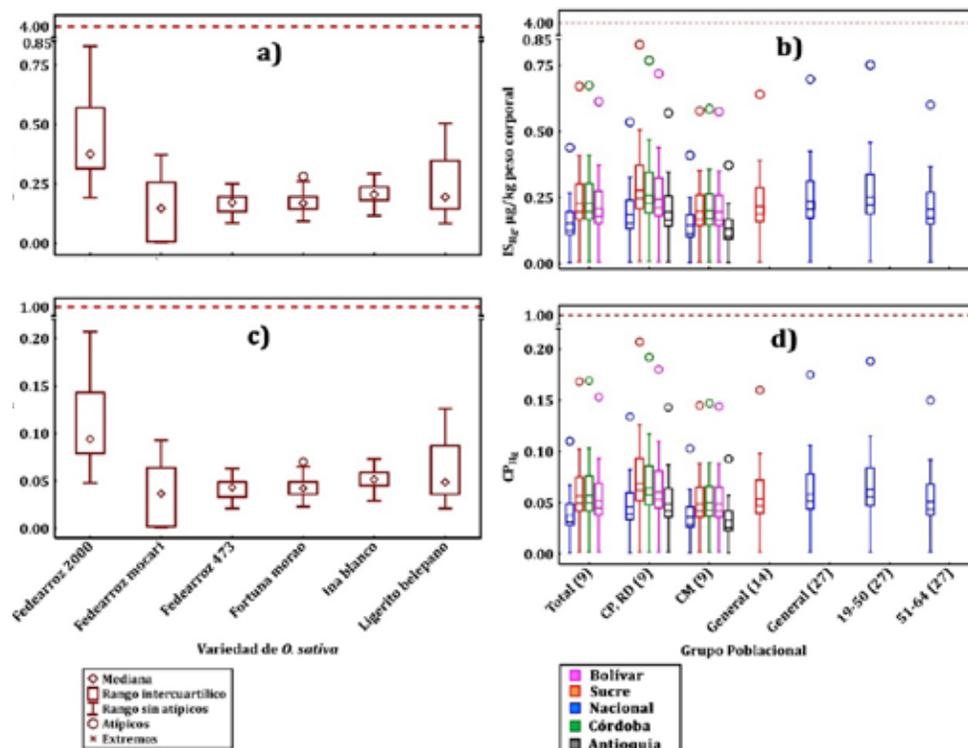
Tabla 7-3. Factores de bioconcentración y translocación de Hg estimados para las variedades criollas y comerciales de arroz en suelos de la región de La Mojana

Variedad	FBC _{raíz}	FBC _{grano}	FBC _{cáscara}	FT _{raíz-grano}	FT _{raíz-cáscara}	FT _{grano-cáscara}
Fedearroz 2000	1,23 ± 0,38	0,07 ± 0,04	0,09 ± 0,05	0,01 ± 0,01	0,18 ± 0,1	0,14 ± 0,08
Fedearroz mocari	2,66 ± 1,52	0,05 ± 0,03	0,36 ± 0,21	0,05 ± 0,03	0,15 ± 0,08	0,15 ± 0,09
Fedearroz 473	1,54 ± 0,02	0,01 ± 0,01	0,06 ± 0,03	0,01 ± 0,00	0,04 ± 0,02	0,05 ± 0,03
Variedades comerciales	1,81 ± 1,02	0,10 ± 0,07	0,57 ± 0,23	0,07 ± 0,05	0,36 ± 0,17	0,19 ± 0,13
Fortuna morao	0,89 ± 0,24	0,01 ± 0,01	0,23 ± 0,13	0,04 ± 0,02	0,14 ± 0,08	0,05 ± 0,03
Ina blanco	0,81 ± 0,05	0,01 ± 0,00	1,13 ± 0,65	0,01 ± 0,01	1,34 ± 0,77	0,04 ± 0,02
Ligerito belepano	0,89 ± 0,17	0,05 ± 0,03	0,29 ± 0,17	0,06 ± 0,04	0,42 ± 0,24	0,03 ± 0,02
Variedades criollas	0,86 ± 0,15	0,08 ± 0,03	1,09 ± 0,79	0,10 ± 0,04	1,31 ± 0,97	0,10 ± 0,05

Riesgo a la salud humana

La Figura 7-3 permite visualizar tanto los valores de *ingesta semanal* de Hg debido al consumo de arroz y el cociente de peligro estimado a partir de la *ingesta semanal* de Hg, y del umbral de ISTP de la JECFA. La IS_{Hg} estuvo entre 0,004 y 0,829 $\mu\text{g kg}^{-1}$ peso corporal a la semana, con una media de 0,225 $\mu\text{g kg}^{-1}$ peso corporal a la semana. La variedad Federarroz 2000 exhibió los niveles más altos, $0,424 \pm 0,161 \mu\text{g kg}^{-1}$ peso corporal a la semana, siendo este valor 10 veces más bajo que el valor de ISTP de la JECFA.

Figura 7-3. a) valores de ingesta semanal estimada de Hg (ISHg) de acuerdo con la variedad de arroz y b) de acuerdo con el grupo poblacional, c) cocientes de peligro para las seis variedades estudiadas y d) para los grupos poblacionales



Con relación a los valores de IS_{Hg} estimados de acuerdo con el tipo de población, se observa una amplia dispersión de los datos sin importar la variedad; al comparar este valor con el reportado para los Centros Poblados (CP) y Rural Disperso (RD) del departamento de Sucre (Figura 7-3b) se encontró el valor más elevado de IS_{Hg} . En ninguno de los casos analizados, el cociente de peligro fue mayor a la unidad, demostrando que no existe riesgo a la salud por exposición a Hg debido al consumo de arroz. Los

cocientes de peligros estuvieron entre 0,001 y 0,207. En general, los valores de CPHg presentaron medias similares, aunque en la **Figura 7–3d** se observa que para los datos provenientes de la Encuesta Nacional de Vida del DANE existe una mayor dispersión, principalmente porque los datos de consumo de arroz son más elevados. Los resultados para el cociente de peligro fueron menores en todos los tratamientos a los reportados por Enamorado *et al.* (22) y Argumedo *et al.* (15). Estos últimos encontraron que el 5 % de sus muestras sobrepasaba el valor de dosis de referencia RfD. Por su parte, Argumedo *et al.* (15) y Caicedo Rivas *et al.* (45) reportaron valores de *ingesta diaria estimada* de Hg, entre 0,06 y 0,08 $\mu\text{g kg}^{-1}$ peso corporal día y 0,002 y 0,021 $\mu\text{g kg}^{-1}$ peso corporal día, que al convertirlos a Ingesta Semanal se observa que están en el mismo rango de lo reportado en el presente estudio.

Conclusiones

Las diferentes variedades de *Oryza sativa* L. cultivadas en suelos de la región de La Mojana con bajo contenido de Hg, se lograron llevar hasta su cosecha exitosa, bajo un plan de fertilización acorde a los requerimientos nutricionales del cultivo y un manejo de malezas adecuado.

La acumulación de Hg en la raíz fue superior a la cáscara y esta, a su vez, superior al grano. La concentración en el grano es similar para todas las especies estudiadas, sin importar si el morfotipo es comercial o criollo. Esto puede deberse a que la raíz de la planta de arroz tiene una gran capacidad de interactuar con el Hg presente en el suelo; lo anterior se evidencia con valores de FBC superiores a la unidad, siendo las variedades criollas menos susceptibles de interactuar con Hg del suelo.

La ruta de exposición a Hg por consumo de arroz no representa un riesgo para la salud en la región de La Mojana, sin importar las variedades comerciales y criollas. Aun cuando el arroz es un alimento de alto consumo en la región y cuando este es cultivado en suelos que han sido impactados indirectamente por la contaminación con Hg.

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. Khan MA, Khan S, Khan A, Alam M. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Sci Total Environ.* 2017 Dec;601-602:1591-605.
2. Ma Y, Zheng W, An Y, Chen L, Xu Q, Jiang A. Mercury contamination in terrestrial predatory birds from Northeast China: Implications for species and feather type selection for biomonitoring. *Ecol Indic.* 2021 Nov;130:108108.
3. Oladoye PO, Olowe OM, Asemoloye MD. Phytoremediation technology and food security impacts of heavy metal contaminated soils: A review of literature. *Chemosphere.* 2022 Feb;288:132555.
4. Teng H, Altaf AR. Elemental mercury (Hg⁰) emission, hazards, and control: A brief review. *J Hazard Mater Adv.* 2022 Feb;5:100049.
5. Xiao R, Wang S, Li R, Wang JJ, Zhang Z. Soil heavy metal contamination and health risks associated with artisanal gold mining in Tongguan, Shaanxi, China. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2017 Jul;141:17-24.
6. Marrugo-Madrid S, Pinedo-Hernández J, Paternina-Urbe R, Marrugo-Negrete J, Díez S. Health risk assessment for human exposure to mercury species and arsenic via consumption of local food in a gold mining area in Colombia. *Environ Res.* 2022 Dec 1;215:113950.

7. Argumedo M, Vergara C, Vidal JV, Marrugo Negrete JL. Evaluación de la concentración de mercurio en arroz (*Oryza sativa*) crudo y cocido procedente del municipio de San Marcos- Sucre y zona aurífera del municipio de Ayapel - Córdoba. *Univ Ind Santander Salud*. 2015;2(47):169-77.
8. Statista. Arroz: producción mundial 2011-2021 [Internet]. 2023 [citado 2023 Sep 11]. Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/517456/produccion-mundial-de-arroz/>
9. FAO O de las NU para la A y la A. Situación Alimentaria Mundial, Nota informativa de la FAO sobre la oferta y la demanda de cereales [Internet]. 2023 [citado 2023 Oct 5]. Disponible en: <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>
10. DANE. Encuesta nacional de arroz mecanizado (ENAM), I Semestre 2022 [Internet]. 2022 [citado 2023 Oct 11]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/arroz/boletin_ENAM_Isem22.pdf
11. Cadena-Torres J, Cuello-Pérez DM, Romero-Ferrer JL, Pérez-Cantero SP. Characterization of the creole-rice production system in La Mojana, in Colombia. *Cienc Agric*. 2021;18(2):67-82.
12. Camacho J. Acumulación tóxica y despojo agroalimentario en La Mojana, Caribe colombiano. 2017. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0486-65252017000100123&script=sci_arttext
13. De la Ossa CA, Ramírez-Giraldo AF, Arroyo-Alvis K, Marrugo-Negrete J, Díez S. Neuropsychological effects, and cognitive deficits associated with exposure to mercury and arsenic in children and adolescents of the Mojana region, Colombia. *Environ Res*. 2023;216:114467.
14. Tang Z, Fan F, Deng S, Wang D. Mercury in rice paddy fields and how does some agricultural activities affect the translocation and transformation of mercury - A critical review. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2020 Oct 1;202:110950.
15. Argumedo-García M, Consuegra-Solórzano A, Vidal-Durango J, Marrugo Negrete JL. Exposición a mercurio en habitantes del municipio de San Marcos (Departamento de Sucre) debida a la ingesta de arroz (*Oryza sativa*) contaminado. *Rev Salud Publica*. 2013;15(6):903-15.
16. Calao-Ramos C, Gaviria-Angulo D, Marrugo-Negrete J, Calderón-Rangel A, Guzmán-Terán C, Martínez-Bravo C, et al. Bats are an excellent sentinel model for the detection of genotoxic agents. Study in a Colombian Caribbean region. *Acta Trop*. 2021 Dec;224:106141.
17. Marrugo-Negrete J, Vargas-Licon S, Ruiz-Guzmán JA, Marrugo-Madrid S, Bravo AG, Díez S. Human health risk of methylmercury from fish consumption at the largest floodplain in Colombia. *Environ Res*. 2020 Mar;182:109050.
18. He Y, Yang X, Li Z, Wang T, Ma C, Wen X, et al. Aging rice straw reduces the bioavailability of mercury and methylmercury in paddy soil. *Chemosphere*. 2023;339:139711.
19. Li H, Li Y, Tang W, Liu Y, Zheng L, Xu N, et al. Bioavailability and methylation of bulk mercury sulfide in paddy soils: New insights into mercury risks in rice paddies. *J Hazard Mater*. 2022;424:127394.
20. Strickman RJ, Larson S, Huang H, Kakouros E, Marvin-DiPasquale M, Mitchell CPJ, et al. The relative importance of mercury methylation and demethylation in rice paddy soil varies depending on the presence of rice plants. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2022 Jan 15;230:113143.
21. Wang Y, Chen L, Chen Y, Xue Y, Liu G, Zheng X, et al. Effects of varying amounts of different biochars on mercury methylation in paddy soils and methylmercury accumulation in rice (*Oryza sativa* L.). *Sci Total Environ*. 2023 May 20;874:162459.
22. Enamorado-Montes G, Reino-Causil B, Urango-Cardenas I, Marrugo-Madrid S, Marrugo-Negrete J. Mercury accumulation in commercial varieties of *Oryza sativa* L. cultivated in soils of La Mojana region, Colombia. *Toxics*. 2021 Nov;9(11):304.

23. Pinedo-Hernández J, Marrugo-Negrete J, Díez S. Speciation and bioavailability of mercury in sediments impacted by gold mining in Colombia. *Chemosphere*. 2015 Jan 1;119:1289-95.
24. Mahar A, Wang P, Ali A, Awasthi MK, Lahori AH, Wang Q, et al. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2016 Apr 1;126:111-21.
25. U.S. EPA. Method 7473 (SW-846): Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry. Washington, DC; 1998.
26. Yanqun Z, Yuan L, Jianjun C, Haiyan C, Li Q, Schwartz C. Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead–zinc mining area in Yunnan, China. *Environ Int*. 2005 Jul 1;31(5):755-62.
27. Han J, Chen Z, Pang J, Liang L, Fan X, Li Q. Health risk assessment of inorganic mercury and methylmercury via rice consumption in the urban city of Guiyang, Southwest China. *Int J Environ Res Public Health*. 2019;16(2):216.
28. UERIA. Perfil de riesgo de arsénico en arroz en Colombia. [Internet]. Bogotá: Instituto Nacional de Salud; 2013 [citado 2023 Oct 9]. Disponible en: <https://www.ins.gov.co/Direcciones/Vigilancia/Publicaciones%20ERIA%20y%20Plaguicidas/PERFIL%20ARSENICO%20EN%20ARROZ.pdf>
29. Granero S, Domingo JL. Levels of metals in soils of Alcalá de Henares, Spain: Human health risks. *Environ Int*. 2002;28(3):159-64.
30. Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Safety evaluation of certain contaminants in food: prepared by the Seventy-second meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). World Health Organ. 2011;791 p.
31. ICBF. Encuesta nacional de la situación nutricional en Colombia (ENSIN). Bogotá: ICBF; 2005 [citado 2023 Oct 9]. Disponible en: <https://www.icbf.gov.co/bienestar/nutricion/encuesta-nacional-situacion-nutricional>
32. FAO o de las NU para la A y la A. Problemas y limitaciones de la producción de arroz [Internet]. 2023 [citado 2023 Sep 11]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/Y2778S/y2778s04.htm>
33. Huybrechts M, Hendrix S, Kyndt T, Demeestere K, Vandamme D, Cuyper A. Short-term effects of cadmium on leaf growth and nutrient transport in rice plants. *Plant Sci*. 2021 Dec;313:111054.
34. Marrugo-Negrete J, Durango-Hernández J, Pinedo-Hernández J, Olivero-Verbel J, Díez S. Phytoremediation of mercury-contaminated soils by *Jatropha curcas*. *Chemosphere*. 2015;127:58-63.
35. Jarama A, Degiovanni Beltramo VM, Montoya RA. Índices fisiotécnicos, fases de crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz. En: Producción eco-eficiente del arroz en América Latina. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) [Internet]. Cali, co: Publicación CIAT No. 365; 2010. p. 60-82. Disponible en: <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/82473>
36. Cadena J, Reza S. Evaluación a nivel de prefactibilidad de los requerimientos para establecer un nicho mojanero de arroz limpio (arroz fino). 2013.
37. Donoso C, Premoli AC, Gallo L, Ipinza R. Variación intraespecífica en las Especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina. 2004. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/256477385_Variacion_Intraespecifica_En_Las_Especies_Arboreas_De_Los_Bosques_Templados_De_Chile_Y_Argentina
38. Tang B, Chen J, Wang Z, Qin P, Zhang X. Mercury accumulation response of rice plant (*Oryza sativa* L.) to elevated atmospheric mercury and carbon dioxide. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2021 Nov 1;224:112628.
39. Zhao L, Meng B, Feng X. Mercury methylation in rice paddy and accumulation in rice plant: A review. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2020;195:110462.

40. CNSA. Maximum levels of contaminants in foods. In: Chinese National Standard Agency BiC, editor. Beijing; 2005.
41. Pu Q, Zhang K, Poulain AJ, Liu J, Zhang R, Abdelhafiz MA, *et al.* Mercury drives microbial community assembly and ecosystem multifunctionality across a Hg contamination gradient in rice paddies. *J Hazard Mater.* 2022;435:129055.
42. Pérez Vargas HM, Vidal Durango JV, Marrugo JL. Evaluación de la capacidad acumuladora de mercurio del ají (*Capsicum annum*). *Rev Salud Pública.* 2015 Jul 16;16(6):897-909.
43. Vidal Durango JV, Marrugo Negrete JL, Jaramillo Colorado B, Perez Castro LM. Remediación de suelos contaminados con mercurio utilizando guarumo (*Cecropia peltata*). *Ing Desarro.* 2010 Jun;(27):113-29.
44. Marrugo Negrete JL, Pinedo-Hernández J, Paternina-Urbe R, Quiroz-Aguas L, Pacheco-Florez S. Distribución espacial y evaluación de la contaminación ambiental por mercurio en la región de la Mojana, Colombia. *Rev MVZ Córdoba.* 2018;23.
45. Caicedo-Rivas G, Salas-Moreno M, Marrugo Negrete JL. Health risk assessment for human exposure to heavy metals via food consumption in inhabitants of middle basin of the Atrato River in the Colombian Pacific. *Int J Env Res Public Health.* 2023;20(1).
46. Alfaro-Rodríguez R, García-Barros E, Montenegro-Ramos O. Niveles de contaminación de mercurio, cadmio, arsénico y plomo en subsistemas de producción de la cuenca baja del río Bogotá. *Bogotá Univ Cienc Apl Ambient.* 2002.
47. Zhu C, Shen G, Yan Y, He J. Genotypic variation in grain mercury accumulation of lowland rice. *J Plant Nutr Soil Sci.* 2008;171(2):281-5.
48. Zhang H, Feng X, Larssen T, Qiu G, Vogt RD. In Inland China, rice, rather than fish, is the major pathway for methylmercury exposure. *Environ Health Perspect.* 2010. Disponible en: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.1001915>
49. Liu WX, Shen LF, Liu JW, Wang YW, Li SR. Uptake of toxic heavy metals by rice (*Oryza sativa* L.) cultivated in the agricultural soil near Zhengzhou City, People's Republic of China. *Bull Environ Contam Toxicol.* 2007;79(2):209-13.

SISTEMA ACUÍFERO
LA MOJANA:
Elementos para la gestión integral del recurso hídrico

Este libro se terminó de editar en el
Fondo Editorial Remington en el mes de febrero de 2025.
Medellín, Colombia.

Los aspectos y temas clave en materia de gestión del recurso hídrico subterráneo en la región de La Mojana son descritos a partir de las condiciones geológicas de la depresión Momposina y de la región de La Mojana, analizando las formaciones geológicas principales a nivel regional y local, considerando las limitaciones de información. Se abordará el establecimiento y delimitación del Sistema Acuífero La Mojana, asimismo, a través de un análisis multitemporal de imágenes se estudia las plumas de sedimentos y sitios de acumulación en las ciénagas de la región de La Mojana y su asociación con la deformación del paisaje neotectónico. Por otro lado, se analiza la delimitación de zonas de recarga del acuífero integrando parámetros geomorfológicos, coberturas, de suelos y climáticos, así como la demanda del recurso hidrogeológico a partir de las actividades económicas e de insumos del balance hídrico. También, se estudia la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación a partir de los métodos GOD, SINTAC y DRASTIC con ciertas modificaciones. Se aborda una descripción de las condiciones hidrogeoquímicas a partir de 50 pozos de agua subterránea en diferentes campañas de monitoreo, así como la contaminación del agua de consumo humano por hidrocarburos aromáticos policíclicos.

