

ANÁLISIS ESPACIAL DE LA VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA CAUTO, CUBA, EMPLEANDO K-MEDIAS E IMÁGENES SATELITALES

*SPATIAL ANALYSIS GROUNDWATER CONTAMINATION OF VULNERABILITY IN THE
CAUTO WATERSHED, CUBA, USING K-MEANS AND SATELLITE IMAGERY*

**Jennifer de la Caridad Rodríguez Calderón, Rosa María Valcarce,
Marina Beatriz Vega Carreño, Willy Roberto Rodríguez Miranda**

Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE), Calle 114 No. 11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.
E-mails: jenniferodr2593@gmail.com; rvalcarce1959@gmail.com; mvega@civil.cujae.edu.cu; wrodriguez1955@gmail.com

Introducción
Características del área de estudio
Materiales y métodos
 Método K-medias para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación
 Evaluación de índices espectrales NDVI y NDSI
Resultados y discusión
Conclusiones
Referencias

RESUMO - A bacia hidrográfica do Cauto, no leste de Cuba, é de interesse nacional devido à sua grande extensão e suas significativas contribuições para os recursos hídricos. É uma das bacias mais poluídas, e múltiplos projetos estão sendo desenvolvidos ali para promover o uso responsável de seus recursos. Esta pesquisa teve dois objetivos: mapear a variação espacial da vulnerabilidade intrínseca à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos, e analisar a ameaça representada pela variação espaço-temporal da cobertura vegetal e da salinização do solo à qualidade das águas subterrâneas. Uma análise de agrupamento k-means das informações geológicas, geomorfológicas, pedológicas e hidrogeológicas da bacia mostrou que 9% e 14% das áreas foram classificadas como vulnerabilidade muito alta e alta, respectivamente, enquanto 66% foram classificadas como vulnerabilidade moderada e apenas 11% como vulnerabilidade baixa. O processamento e a interpretação das imagens de satélite Landsat mostraram que, entre 2000 e 2023, a cobertura vegetal diminuiu e a salinidade do solo aumentou, representando um impacto ambiental negativo ainda maior em áreas de alta e muito alta vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas.

Palavras-chave: Classificação não supervisionada. Carste coberto. Índices espectrais. Salinidade do solo.

RESUMEN - La cuenca hidrográfica Cauto, en la región oriental de Cuba, es de interés nacional por su gran extensión e importantes aportes de recursos hídricos. Es una de las más contaminadas y en ella se desarrollan múltiples proyectos para favorecer un uso responsable de sus recursos. Esta investigación se planteó dos objetivos: cartografiar la variación espacial de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los recursos hídricos subterráneos; y analizar la amenaza que representa la variación espacio temporal de la cobertura vegetal y la salinización de los suelos sobre la calidad de las aguas subterráneas. El análisis de agrupamiento k-medias sobre la información geológica, geomorfológica, edafológica e hidrogeológica de la cuenca, arrojó que las áreas clasificadas de muy alta y alta vulnerabilidad alcanzan el 9% y 14% respectivamente, mientras que el 66% clasifica de moderada y solo el 11% presenta baja vulnerabilidad. El procesamiento e interpretación de imágenes satelitales Landsat evidenció que entre los años 2000 al 2023 la cobertura vegetal disminuyó y la salinidad de los suelos se incrementó, lo que representa un impacto ambiental negativo aun mayor en áreas de alta y muy alta vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas.

Palabras claves: Clasificación no supervisada. Carso cubierto. Índices espectrales. Salinidad de suelos.

ABSTRACT - Cauto watershed, in eastern Cuba, is of national interest due to its large area and significant water resource contributions. It is one of the most polluted basins, and multiple projects are being developed there to promote responsible use of its resources. This research had two objectives: obtain a spatial variation map of intrinsic vulnerability to groundwater contamination; analyze the threat that represents the spatiotemporal variation of vegetal cover and soils salinization on groundwater quality. A k-means clustering analysis of the basin's geological, geomorphological, edaphological and hydrogeological information showed that 9% and 14% of the areas were classified as very high and high vulnerability, respectively, while 66% were classified as moderate and only 11% as low vulnerability. The processing and interpretation of Landsat satellite images showed that between 2000 to 2023, vegetation cover decreased and soil salinity increased, representing an even greater negative environmental impact in areas of high and very high vulnerability to groundwater contamination.

Keywords: Non-supervised classification. Covered karst. Spectral indices. Soil salinity.

INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas constituyen un espacio territorial de planificación y gestión en las que se localizan e integran los recursos naturales y el medio ambiente con el desarrollo económico y social. Generalmente se encuentran

sometidas a un intenso impacto de contaminación por lo que para garantizar su desarrollo integral sostenible se hace necesario desarrollar investigaciones multidisciplinarias dirigidas a lograr la mejor planificación territorial, la evaluación de

impactos, el control de la contaminación, la reducción de vulnerabilidades, la gestión responsable del agua y del uso de suelos (García & Gutiérrez, 2015).

Las aguas subterráneas, que se almacenan bajo la superficie de estas cuencas formando acuíferos en rocas porosas y permeables, pueden garantizar un suministro de agua de excelente calidad por lo que deben protegerse de manera especial. Estas aguas son esenciales para mantener el equilibrio ecológico de los ecosistemas; sin embargo, su gestión no siempre recibe la suficiente atención en comparación con las aguas superficiales, visibles en ríos, lagos y embalses. Las acciones antrópicas irresponsables, expresadas en el uso inapropiado de fertilizantes y pesticidas en áreas con suelos permeables y acuíferos abiertos, el vertido de desechos de animales en zonas vulnerables, los residuos de actividades industriales que liberan sustancias dañinas, el vertido de aguas residuales domésticas sin el adecuado tratamiento, entre otras causas, además de provocar el deterioro de la calidad de las aguas subterráneas, pueden provocar su contaminación irreversible (De Miguel, 2012).

La vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas por actividades antropicas y con ello la potencial pérdida de calidad de este recurso, está determinada por características naturales como el relieve, el clima, la vegetación, el suelo, los tipos de rocas que sobreyacen al acuífero y la hidrogeología (Zwahlen, 2003; UNESCO, 2021).

Cuba, desde 1959, ha priorizado el cuidado y protección de sus recursos hídricos y en la actualidad cuenta con la Ley No. 124 de las Aguas Terrestres con el fin de lograr su aprovechamiento en armonía con el desarrollo socioeconómico sostenible (ANPP, 2017).

El 25% de los recursos hídricos aprovechables en Cuba proviene de fuentes subterráneas (García & Gutiérrez, 2015). Por ello la elaboración de mapas de vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas a diferentes escalas, alcanza cada vez mayor importancia y forma parte de un sistema de alerta temprana para trazar estrategias de protección y planificación responsable de su uso. Esto resulta especialmente importante si se tiene en cuenta que el 66% de la superficie de Cuba está cubierta por rocas carbonatadas de edad Mesozoica y Cenozoica y al poseer un clima tropical donde se identifica una estación seca y otra húmeda con abundantes precipitaciones, se

ha desarrollado un intenso y extenso desarrollo cárstico en el país (Instituto de Geografía, 1989). Esta situación favorece la formación de importantes acuíferos de origen cárstico, que deben ser protegidos dada su elevada vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas que almacenan.

La cuenca hidrográfica Cauto es una cuenca de interés nacional por su gran extensión y aporte de recursos hídricos en la región oriental del país. Su principal río es el Cauto, el más largo de Cuba y el segundo más caudaloso (Batista & Rodríguez, 1986). Es una de las cuencas más contaminada de la nación, afectada por la sobreexplotación de sus recursos, la erosión y salinidad de los suelos, inadecuado tratamiento de las aguas residuales y la desertificación, lo que afecta directamente a la población, la biodiversidad, la producción agrícola y la calidad de las aguas. A todo ello se suman los desafíos climáticos ya que la precipitación anual es considerablemente menor que la evaporación, lo que provoca una reducción significativa de los recursos hídricos (García & Gutiérrez, 2015). Para lograr la gestión integrada y sostenible de la cuenca se desarrollan múltiples proyectos, sin embargo, para que estas acciones alcancen el mayor impacto positivo es imprescindible mantener el equilibrio hidrológico de sus ecosistemas y preservar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. Por esta razón resulta de gran importancia elaborar mapas de vulnerabilidad natural a la contaminación de estos recursos.

Para preservar la calidad de las aguas subterráneas que posee la cuenca, entre otros factores hay dos que deben ser controlados, la salinización de los suelos y la cobertura vegetal.

De Miguel y Sánchez (2011) evidenciaron que, desde la década de los cincuenta del pasado siglo XX, en la Cuenca del Cauto existen problemas de salinización de los suelos motivado por factores naturales y antropogénicos. Estos factores provocan que la salinidad de los suelos se mantenga o incluso pueda aumentar paulatinamente induciendo el deterioro progresivo de la calidad de las aguas subterráneas.

El otro factor que debe ser controlado es la cobertura vegetal porque actúa como un sistema de defensa natural de los recursos hídricos subterráneos. En zonas donde el acuífero es muy vulnerable a la contaminación, determinados tipos de cobertura vegetal, como bosques o pastizales, pueden ejercer una función protectora.

Las raíces de las plantas ayudan a filtrar contaminantes que se infiltran en el suelo, pueden absorber metales pesados y nutrientes en exceso permitiendo que el agua llegue más limpia a los acuíferos; la vegetación reduce la erosión de los suelos y el escurrimiento superficial, regula el ciclo hidrológico, libera vapor de agua a la atmósfera y favorece las precipitaciones y la recarga de acuíferos, proporciona hábitat a los microorganismos que contribuyen a la salud del ecosistema del suelo (WWAP, 2018; Rapiya & Ramoelo, 2025).

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca hidrográfica del río Cauto se localiza al sureste de Cuba. Limita al norte con las provincias Holguín y Las Tunas, al sur con la Sierra Maestra, al oeste con la Bahía de Manzanillo, ambas en la Provincia de Granma, y al este con la Provincia de Santiago de Cuba (Figura 1). Esta cuenca es la de mayor extensión del país abarcando 9 540 km² y su río principal

Por todo lo anterior, esta investigación se planteó dos objetivos: cartografiar a escala 1:100 000 la variación espacial de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas debido a la acción de potenciales contaminantes superficiales; y evaluar la variación espacio temporal de la vegetación y la salinidad de los suelos para el período comprendido entre los años 2000 al 2023 en la cuenca hidrográfica Cauto por la influencia de estos factores en la protección de las aguas subterráneas.

fluye con una longitud total de 343,4 km; en la misma se originan extensos pantanos y un delta que constituye el segundo humedal más grande de Cuba. Está conformada por 32 afluentes entre los que se encuentran el Río Caney, Mefán, Cañas, Yarayabo; y arroyos como Los Guaos y Tusas. Representa aproximadamente el 9% del territorio nacional (Batista & Rodríguez, 1986).

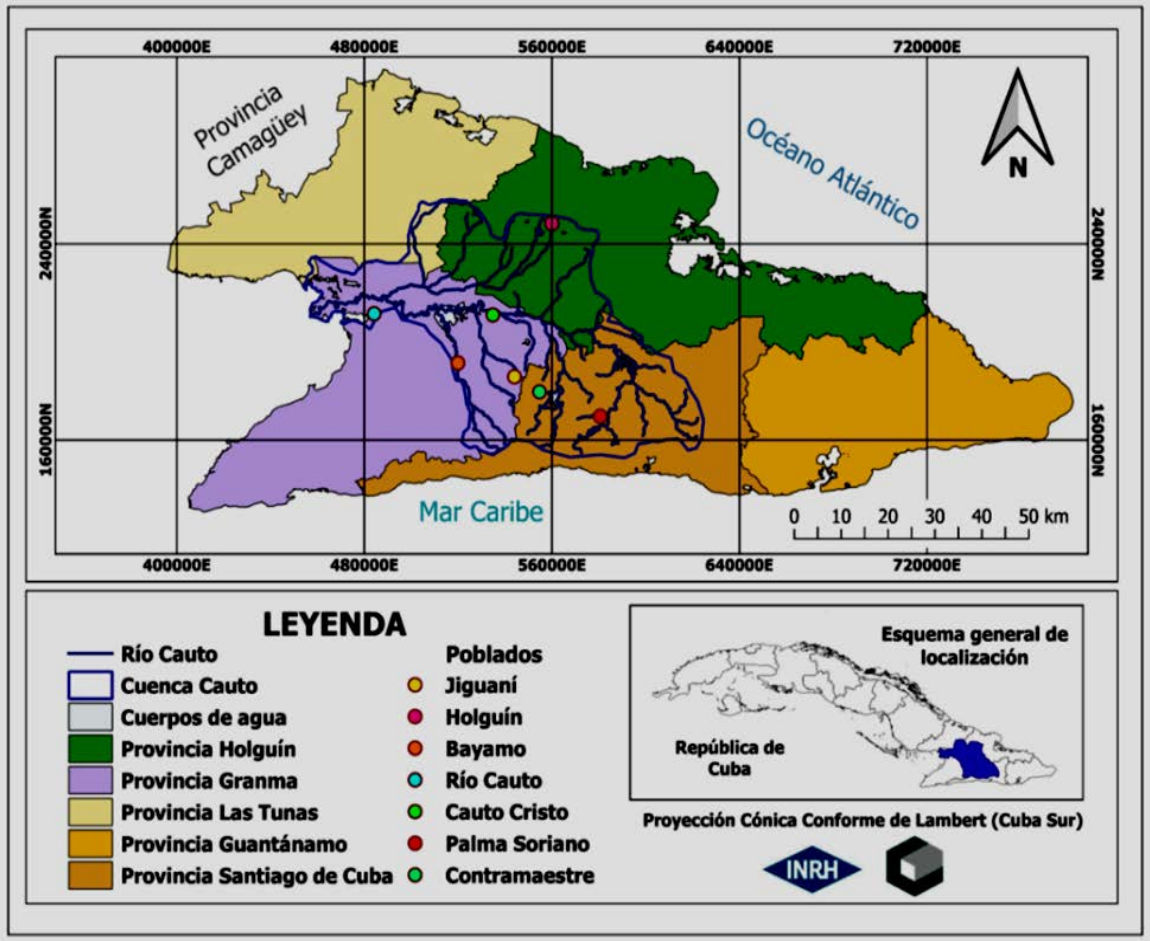


Figura 1-Ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica Cauto.

El clima en la Cuenca del Cauto es predominantemente tropical, con estaciones húmedas y secas bien definidas. Las precipitaciones son abundantes especialmente en las zonas montañosas, lo que contribuye a un caudal significa-

tivo en los ríos y arroyos de la región. El clima se caracteriza por una temporada lluviosa durante la cual aproximadamente cae el 80% de los 1 375 mm de la media histórica de lluvia para un año, y otra temporada de seca en la que apenas precipita

el 20% restante; ello, unido a su irregular distribución espacial, hacen complejo todo intento de explicar y proponer esquemas globales para el manejo del agua en esta cuenca hidrográfica. El promedio anual de las temperaturas varía entre 25 y 27°C, muy acentuadas durante el verano y especialmente en el mes de julio con 27 a 28°C como valor medio, incluso durante el invierno las temperaturas resultan elevadas, alcanzando entre 23 y 24°C. La humedad relativa es normalmente alta, por encima del 60%.

Esta cuenca almacena importantes recursos hídricos subterráneos en calizas del Neógeno fuertemente carstificadas, pero estas rocas están cubiertas por un gran espesor de sedimentos aluviales, demostrado en las perforaciones que han sido realizadas. Es por ello que las formas superficiales del carso o exocársticas no abundan, no tienen una expresión importante en el relieve y están poco desarrolladas debido a la cobertura de los suelos, aunque al ser un fenómeno muy evolu-

cionado en las zonas profundas tiene una influencia hidrogeológica muy importante (Gutiérrez & Rivero, 1999). Según la clasificación morfológico-genética del carso cubano, para la Cuenca del Cauto se describe el carso típico de una llanura cárstica cubierto por una capa de suelo (Iturralde-Vinent, 2019).

El relieve de la cuenca es variado y constituye uno de los principales parámetros para su delimitación, con montañas, valles y llanuras. En la parte alta de la cuenca se encuentran las elevaciones más pronunciadas, incluyendo la Sierra Maestra, la Sierra Nipe-Sagua-Baracoa y la Sierra Cristal. La pendiente media es aproximadamente de 6,8%, con altura media de 160 m sobre el nivel del mar y una densidad de drenaje de 0,7 km/km². Esta cuenca abastece a una población que representa aproximadamente el 11% de la población total del país.

La cuenca presenta una amplia diversidad de suelos visiblemente afectados por la erosión y la salinidad. La figura 2 muestra el mapa de suelos.

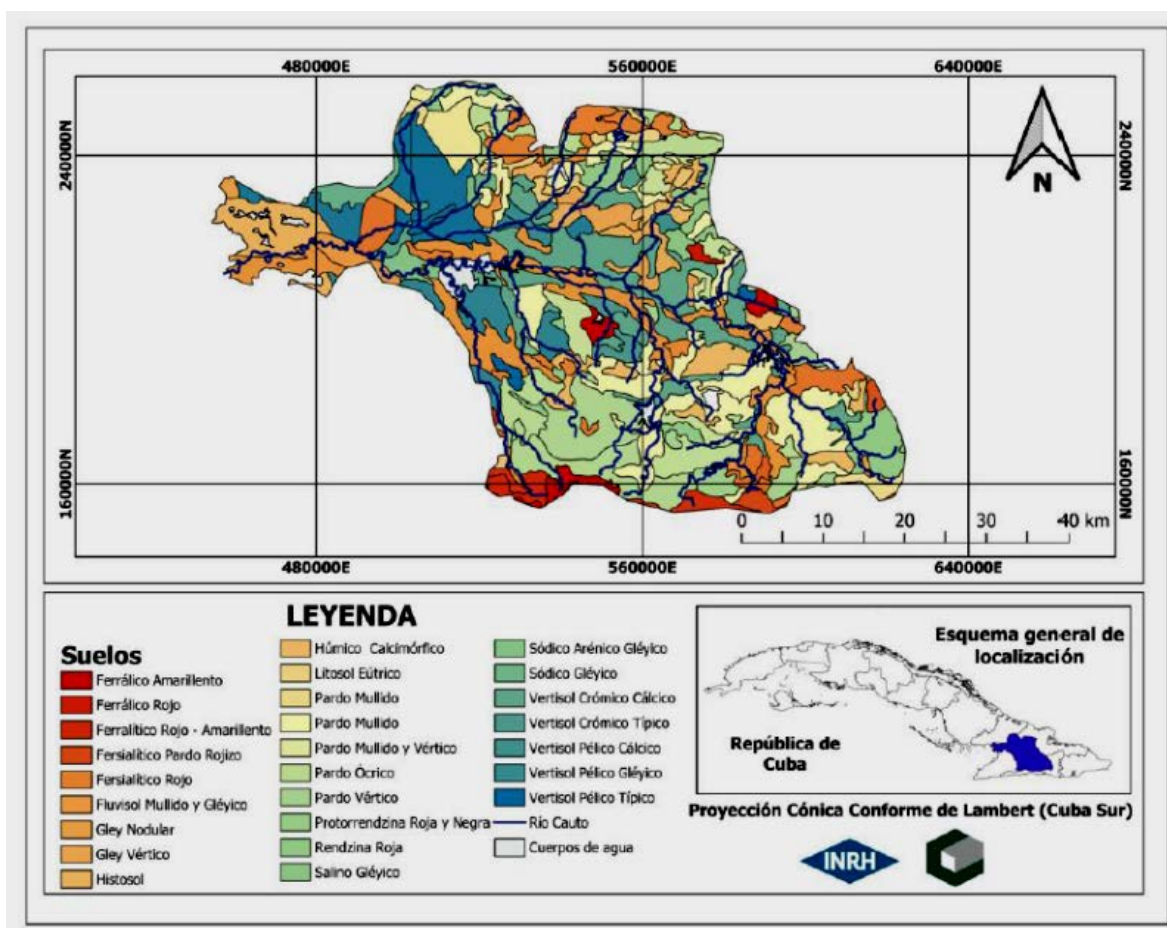


Figura 2-Mapa de suelos de la cuenca hidrográfica Cauto, escala 1:100.000 (Tomado de MINAGRI, 2000).

La diversidad de suelos presentes en la cuenca refleja la importancia de considerar las características edafológicas al planificar el uso sostenible de los recursos naturales en esta región. En la vertiente de la Sierra Maestra, al sur del área

de investigación se identifican suelos del agrupamiento Pardos que se caracterizan por su color pardo o rojizo, y suelen encontrarse en las zonas montañosas de la cuenca. Son suelos profundos, bien drenados y con buen contenido de materia

orgánica. Debido a su ubicación en áreas montañosas tienden a ser erosionados por la acción del agua y el viento, tienen como sustrato rocas carbonatadas y magmáticas; también pueden ser arcillosos predominando las arcillas del tipo montmorillonita. Los suelos Ferralíticos son comunes en las zonas de transición entre las montañas y las llanuras. Presentan un alto contenido de óxidos de hierro y aluminio, lo que les confiere un color rojizo o amarillento. Estos suelos suelen ser fértiles y aptos para la agricultura, aunque pueden presentar limitaciones de drenaje en algunas áreas debido a su alto contenido de arcilla caolinítica. Han sido desarrollados sobre un sustrato de roca carbonatada. Los suelos aluviales se presentan en zonas bajas y planas cercanas a los ríos, se encuentran depositados por la acción del agua. Suelen ser fértiles y adecuados para la agricultura debido a su alto contenido de materia orgánica y nutrientes.

Al oeste se encuentran suelos pertenecientes al agrupamiento Hidromórfico con alto contenido de materia orgánica en la superficie, ubicados en áreas con mal drenaje como las zonas pantanosas o cercanas a cuerpos de agua. Estos suelos pueden presentar problemas de encharcamiento y salinidad, lo que limita su uso para la agricultura. En las zonas montañosas y rocosas, se encuentran suelos Litosólicos, que suelen ser poco profundos y con limitaciones para la agricultura, pero son importantes para el sostenimiento de la vegetación natural (García y Gutiérrez, 2015). Otro tipo de suelo son los Vertisoles (crómicos, pélicos, cálcicos, típicos y gleys), que se forman a partir de materiales calcáreos y arcillosos transportados; de alta arcillosidad (montmorilloníticos) con características desfavorables como: mal drenaje, alta porosidad, dilatabilidad y contracción de la arcilla.

El 16% del área total de la cuenca está cubierta por bosques con gran diversidad de ecosistemas, desde bosques tropicales hasta áreas agrícolas y pastizales. La cobertura forestal es importante en algunas zonas, aunque también se observa presencia significativa de tierras dedicadas a la agricultura (Batista & Rodríguez, 1986).

Presenta una carga contaminante estimada en 99,89 toneladas DBO5 por día, equivalente a una población de 2.378.332 habitantes, lo que representa el 203% de su población actual. Posee 19 embalses construidos que almacenan un volumen de 1.329,75 hm³ y tienen una entrega garantizada de 1.218,9 hm³. Las áreas bajo riego abarcan

aproximadamente 73,7 hectáreas, lo que demanda volúmenes muy elevados de agua cada año (García & Gutiérrez, 2015).

En la cuenca predominan las formaciones geológicas de origen calcáreo, con presencia de rocas calizas, calizas dolomitizadas y dolomitas, con abundantes fenómenos cársticos que favorecen la formación de acuíferos aunque las manifestaciones exocársticas en el relieve son escasas y poco desarrolladas a causa de la cobertura de los suelos. Se describen depósitos terrígeno-carbonatados de origen marino-aluvial de la Formación Cauto, que datan del Pleistoceno. La litología presente incluye arcillas, limos, arenas, gravas y conglomerados polimícticos, con estratificación horizontal predominante. Además, se describen calizas coralino-algáceas (organógenas), calizas biodetríticas y en ocasiones arcillosas. Existe una tectónica activa, con presencia de fallas y fracturas que influyen en la configuración del paisaje y la distribución de los recursos hídricos (Iturralde-Vinent, 2019). Estas características tienen un impacto directo en el flujo de agua, la erosión y la sedimentación (Figura 3).

En la cuenca se identifican los complejos o sistemas acuíferos siguientes (Echemendía et al., 2017):

- Complejo acuífero palustre costero del Cuaternario (A1-3): Representado por los depósitos palustres en el área de investigación.
- Complejo acuífero clástico-terrígeno del Cuaternario (A2-3): Representado por los depósitos aluviales, la Fm. Cauto y la Fm. Bayamo, con predominio de arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos.
- Complejo acuífero terrígeno-carbonatado del Neógeno-Oligoceno (B3-4): Formado por alternancia de margas, limolitas calcáreas o arcillosas, calizas biodetríticas arcillosas, calizas micríticas, calcarenitas y areniscas. Representado por la Fm. Vázquez, Fm. Río Jagüeyes y Fm. Paso Real.
- Complejo acuífero carbonatado-clástico del Neógeno-Oligoceno (B4-2): Formado principalmente por calizas algo recristalizadas carstificadas, calizas arcillosas, margas y arcillas carbonatadas. Representado por la Fm. Camazán y la Fm. Bitirí.
- Complejo acuífero clástico-carbonatado del Paleógeno-Cretácico (C2-4): Constituido por areniscas, conglomerados, brechas polimícticas y vulcanomícticas carbonatadas con algunas lutitas y calcarenitas intercaladas. Representado por la Fm. Farallón Grande, Fm. Camarones, Fm. San Luis, Fm. Mucaral, Fm. La Picota, Fm. Mícara y Fm. Isabel.

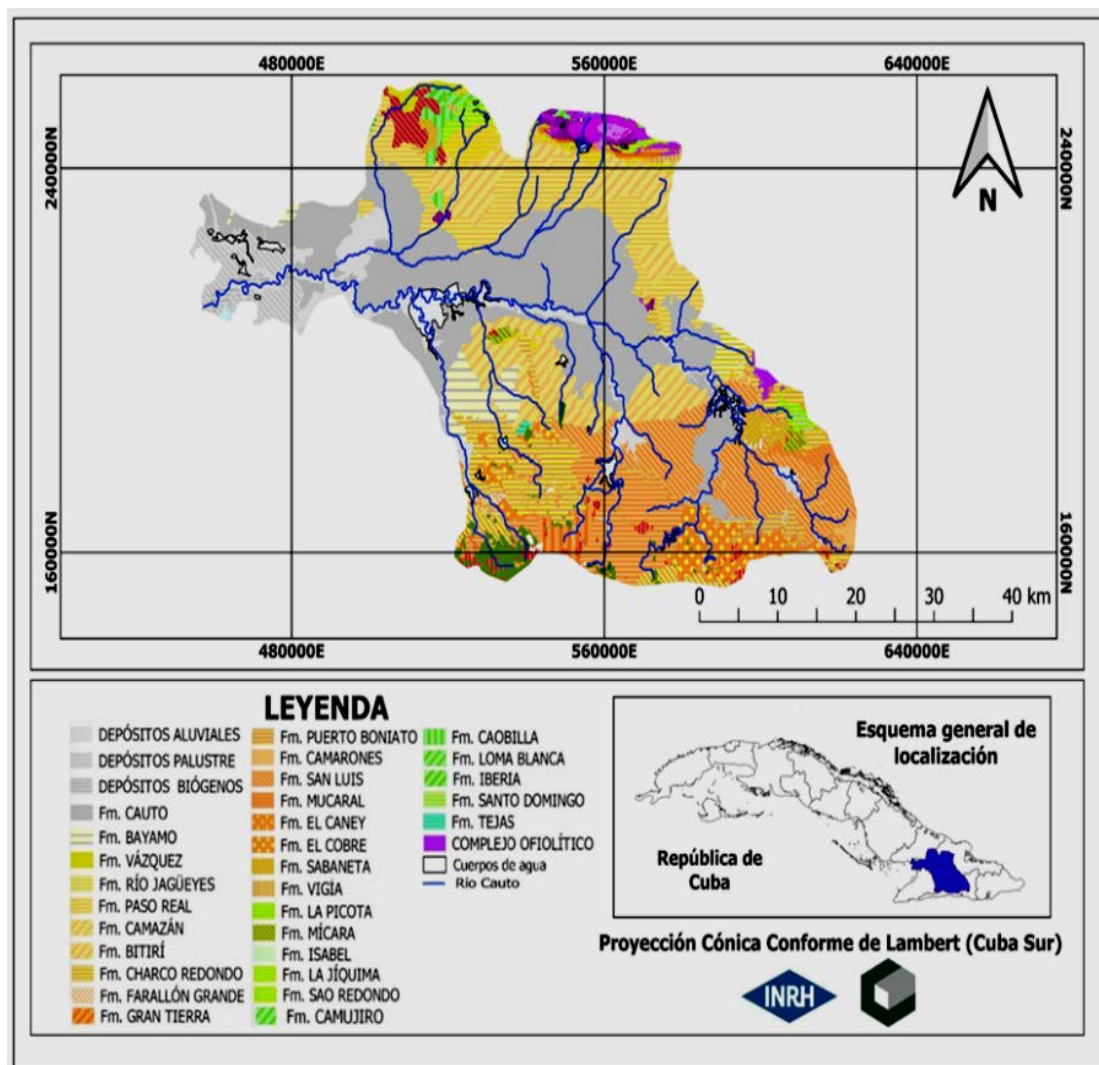


Figura 3-Mapa Geológico de la cuenca hidrográfica Cauto a escala 1:100.000. Tomado de IGP (2011).

- Complejo acuífero carbonatado-clástico del Paleógeno-Cretácico (C4-2): En este complejo predominan clastos de calizas con matriz y cemento carbonatados, pudiendo aparecer clastos de rocas volcánicas, serpentinitas y gabroides. Representado por la Fm. Charco Redondo, Fm. Gran Tierra, Fm. Puerto Boniato, Fm. La Jíquima.
- Complejo acuífero volcanógeno-clástico del Paleógeno-Cretácico (C5-2): Representado por las formaciones: Fm. El Caney, Fm. El Cobre, Fm. Sabaneta, Fm. Vigía, Fm. Sao Redondo, Fm.

Loma Blanca, Fm. Guáimaro, Fm. Iberia, Fm. Santo Domingo, Fm. Camujiro, Fm. Caobilla, Fm. Tejas.

- Complejo acuífero ultrabásico-metamorfizado del Cretácico-Jurásico (E8-7): Representado por la Asociación Ofiolítica en la que se describen rocas ultramáficas serpentinizadas y serpentinitas.
- Complejo acuífero de intrusivos básicos (gabroides) del Cretácico-Jurásico (E9): Representado por la Asociación Ofiolítica

La figura 4 muestra la distribución de estos complejos acuíferos en la cuenca.

MATERIALES Y MÉTODOS

En las últimas décadas la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos ha sido objeto de numerosos estudios en diferentes países. Los primeros esfuerzos por cartografiar la vulnerabilidad de los acuíferos tuvieron lugar en Francia (Margat, 1968). Desde entonces, se han desarrollado diversos métodos que se agrupan en métodos hidrogeológicos, métodos paramétricos y modelos numéricos (Vrba & Zaporozec,

1994). Los más empleados son los métodos paramétricos o métodos de superposición de índices ponderados, como DRASTIC, GOD, AVI, SINTAC, EPIK, RISK, entre otros (Vargas, 2010). En Aguilar *et al.* (2013) se presenta una detallada revisión de los métodos para evaluar la vulnerabilidad y riesgo de contaminación de los acuíferos cársticos, destacándose EPIK como el primer método de índices ponderados desarrollado con

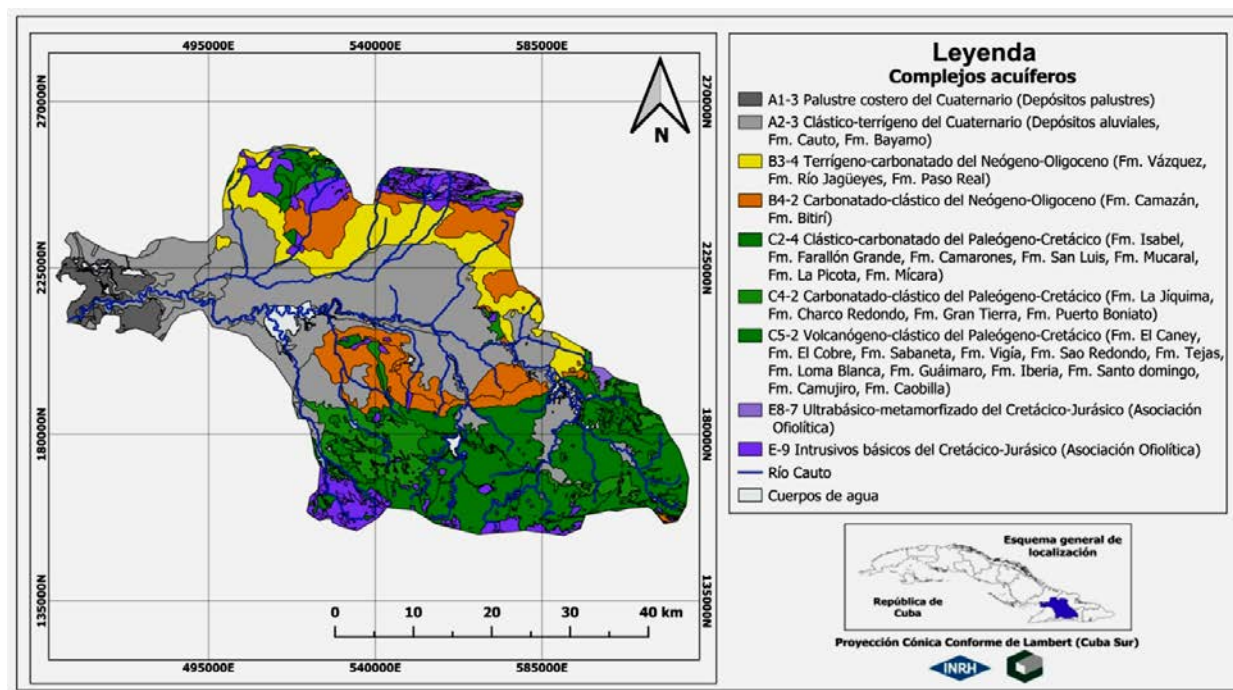


Figura 4-Mapa de complejos acuíferos de la cuenca hidrográfica Cauto, escala 1:100.000.

este objetivo, así como la fragilidad de estos sistemas y la importancia de identificar las depresiones geomórficas que constituyen zonas de absorción en estos acuíferos.

En la actualidad las técnicas de reconocimiento de patrones, entre ellas el análisis de agrupamiento, están demostrado su efectividad para generar mapas de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos (Hamdan & Emad, 2017; Valcarce & Solís, 2022; Gómez-Escalonilla & Martínez-Santos, 2024). Estas técnicas presentan ventajas sobre los métodos paramétricos en los que, de forma implícita, está presente cierto nivel de subjetividad del equipo de investigadores al ponderar los parámetros empleados, separar en rangos la variación de cada parámetro y asignar puntuación a cada rango. Las técnicas de reconocimiento de patrones permiten la identificación espacial de áreas con diferente sensibilidad a la contaminación de las aguas subterráneas, de forma objetiva y elevado poder resolutivo (Deepesh *et al.*, 2018). En la presente investigación, para estudiar la variación espacial de la vulnerabilidad en la cuenca hidrográfica Cauto, se aplicó el algoritmo de reconocimiento de patrones con autoaprendizaje K-medias.

Aplicación del método K-medias en la Cuenca Cauto

Los métodos de agrupamiento o clústeres, también llamados de segmentación de datos o de autoaprendizaje, tienen como finalidad agrupar o segmentar una colección de objetos en subconjuntos o clústeres, de manera que dentro

de cada grupo se compartan características estrechamente similares, que a la vez sean muy diferentes a los elementos de los restantes grupos, tal es el caso del algoritmo de agrupamiento K-medias, que dada su simplicidad y eficiencia es fácil de entender e implementar (Giménez, 2010). Es una técnica de reconocimiento de patrones no supervisada que permite asignar cada objeto al grupo más cercano, lo que se logra calculando una medida de similitud entre el objeto y el centroide de cada clúster. En esta investigación se empleó como medida de similitud la distancia euclidiana (Valcarce & Solis, 2022).

Para aplicar esta técnica de minería de datos se utilizó el programa informático Weka, de libre desarrollo, creado por la universidad de Waikato (Nueva Zelanda), que contiene las herramientas necesarias para realizar transformaciones sobre los datos, tareas de clasificación, regresión, clúster, asociación y visualización (Martínez, 2018).

Las variables empleadas en el análisis fueron: pendiente topográfica, litología de las capas que sobreyacen al acuífero, densidad de fallas tectónicas, índice de atenuación del suelo y nivel freático. Debido a la presencia de carso cubierto en el área de estudio y a la escala del trabajo desarrollado no fue posible identificar las depresiones y tipos de depresiones cársticas como atributos del relieve, las que deben recibir la mayor atención porque presentan la mayor exposición de las aguas subterráneas a la contaminación (Aguilar *et al.*, 2013). En investigaciones más detalladas se debe considerar la posibilidad de

incluir atributos del relieve cárstico y la aplicación de métodos que permitan evaluar el desarrollo del carso subterráneo.

Las fuentes de datos para extraer las variables seleccionadas fueron las siguientes:

- Mapa geológico de la República de Cuba a escala 1:100 000 (IGP, 2011).
- Mapa tectónico de la República de Cuba a escala 1:100 000 (IGP, 2011).
- Mapa de suelos de Cuba a escala 1:100 000 (MINAGRI, 2000).
- Modelo digital de elevaciones (MDE) 25x25 m (GEOCUBA, 2010).
- Base de datos del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

A continuación se fundamenta la selección de las variables y se explica cómo fueron obtenidas.

Pendiente topográfica: Las áreas con relieve más pronunciado experimentan mayor escorrentía superficial y menor infiltración vertical de los

contaminantes, lo que disminuye la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos. Fue extraída del MDE con resolución espacial de 25 metros empleando la función *Slope* en la herramienta *Spatial Analyst* del sistema de información geográfico QGIS.

Litología de la zona no saturada: La litología, el grado de consolidación, la posible presencia de fracturas, el desarrollo cárstico, la arcillosidad; son factores que determinan la permeabilidad de la zona no saturada favoreciendo o retardando la migración vertical de contaminantes. La litología fue caracterizada siguiendo los criterios del método GOD que le asigna puntos entre 0,4 y 1; los mayores valores corresponden a las formaciones geológicas potencialmente más permeables (Foster, 1987). En la tabla 1 se presenta la puntuación asignada a las formaciones geológicas descritas en la cuenca bajo estudio.

Tabla 1. Evaluación de las formaciones geológicas que sobreyacen al acuífero en la cuenca hidrográfica Cauto.

Formaciones Geológicas	Criterio O
Depósitos Aluviales y Biógenos	0,4
Fm. San Luis, Fm. La Jíquima	0,5
Depósitos Palustres	0,5
Fm. Río Jagüeyes, Fm. Gran Tierra, Fm. La Picota, Fm. Camujiro, Fm. Caobilla, Fm. Iberia, Fm. Santo Domingo	0,6
Complejo Ofiolítico	0,6
Fm Farallón Grande, Fm Camarones, Fm. El Caney, Grupo El Cobre, Fm Sabaneta, Fm. Vigía, Fm. Isabel, Fm Sao Redondo, Fm Tejas, Fm. Loma Blanca, Fm Guáimaro	0,7
Fm. Cauto	0,7
Fm. Bayamo, Fm. Mícara	0,8
Fm. Vázquez, Fm. Paso Real, Fm. Camazán, Fm. Charco Redondo, Fm. Puerto Boniato, Fm. Mucaral	0,9
Fm. Bitirí	1,0

Densidad de fallas tectónicas por km²: Las fallas tectónicas generan fracturas en la corteza terrestre, que pueden incrementar la porosidad secundaria y la permeabilidad de las rocas facilitando la infiltración y migración de los contaminantes hasta alcanzar el nivel freático. La densidad de fallas por km² fue extraída del mapa tectónico empleando la herramienta *Line Density* del software QGIS.

Índice de atenuación del suelo: La capacidad del suelo para retener y degradar sustancias contaminantes depende de sus propiedades físicas y químicas, como textura, profundidad efectiva (espesor) y humificación (Foster *et al.*, 2013). La textura influye porque si el contenido de arcilla disminuye, su capacidad de retención y degradación también. A mayor espesor del suelo

mayor capacidad de retención de contaminantes. A mayor humificación mayor contenido de materia orgánica y mayor será su función protectora. La tabla 2 presenta la puntuación de estos atributos disponibles en el mapa de suelos a escala 1:100.000. Para calcular el índice de atenuación del suelo esta investigación propuso la ecuación (1).

$$IA = \frac{1}{Tx + PE + H} \quad (1)$$

Donde:

IA: Índice de atenuación

Tx: Textura

PE: Profundidad efectiva

H: Humificación

Profundidad del nivel freático: La profundidad

Tabla 2-Puntuación de los atributos del suelo disponibles en MINAGRI (2000).

Textura	Puntuación	Profundidad efectiva	Puntuación	Humificación	Puntuación
Arcilla montmorillonita	1	Muy profundo (mayor de 100 cm)	1	Muy humificado (mayor del 6%)	1
Arcilla caolinita	2	Profundo (entre 61 y 99 cm)	2	Humificado (entre 4.1 y 6%)	2
Arcilla	3	Medianamente profundo (entre 41 y 60 cm)	3	Medianamente humificado (entre 2 y 4%)	3
Arcilla loamosa	4	Poco profundo (entre 21 y 40 cm)	4	Poco humificado (menor del 2%)	4
Arcilla arenosa	5	Muy poco profundo (entre 11 y 20 cm)	5		
Loam arcilloso	6				
Loam arcilloso arenoso	7				
Loam arenoso	8				
Arena arcillosa	9				

de las aguas subterráneas influye de manera importante en la susceptibilidad del acuífero a la contaminación por la migración vertical de contaminantes depositados en la superficie del suelo, de manera que a mayor profundidad del nivel freático mayor protección natural para el acuífero y viceversa. Esta variable fue obtenida

de la base de datos del Instituto Nacional de Recursos, calculando el valor promedio de Hidráulicos profundidad de las aguas subterráneas en 114 pozos, variable medida mensualmente desde los años 90 del pasado siglo hasta la actualidad. La distribución de los pozos disponibles en el área se presenta en la figura 5.

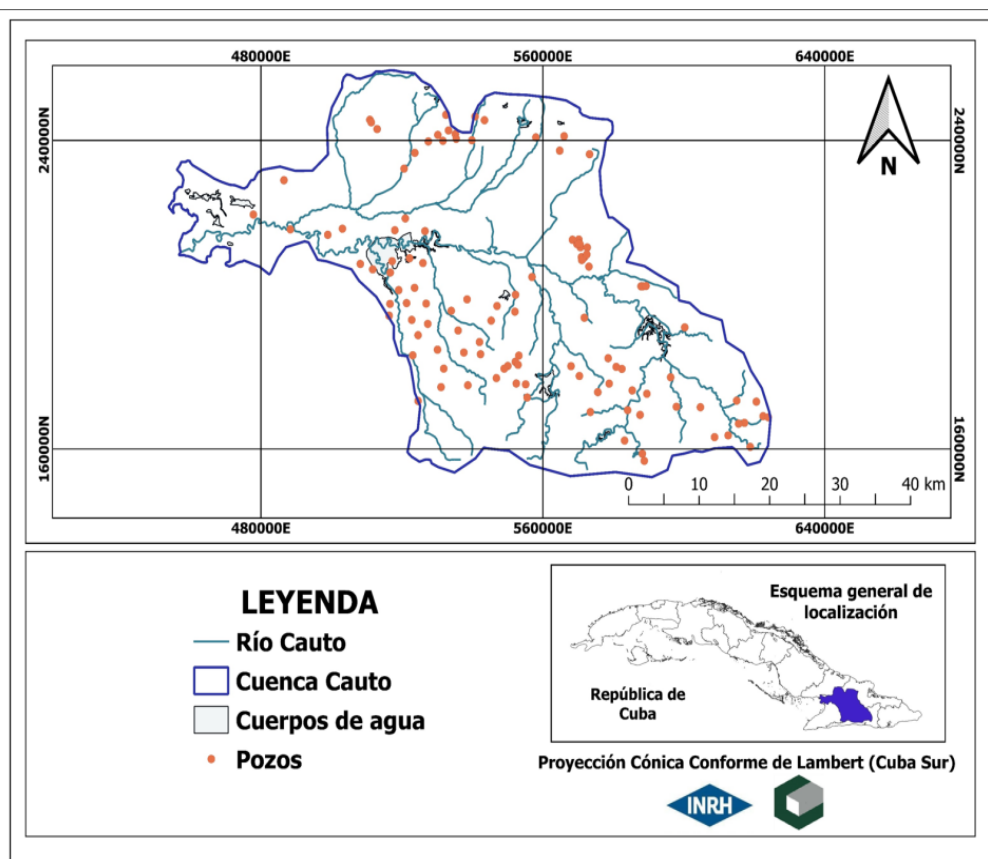


Figura 5-Mapa de distribución de pozos con mediciones del nivel freático en la cuenca hidrográfica Cauto.

La figura 6 muestra los mapas *raster* de pendiente, índice de atenuación del suelo, densidad de fallas tectónicas, litología y nivel freático de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica

Cauto a escala 1:100.000, confeccionados empleando el sistema informático QGIS. Posteriormente estos mapas fueron digitalizados con un intervalo de muestreo de 250 m para un total de 290.016 puntos.

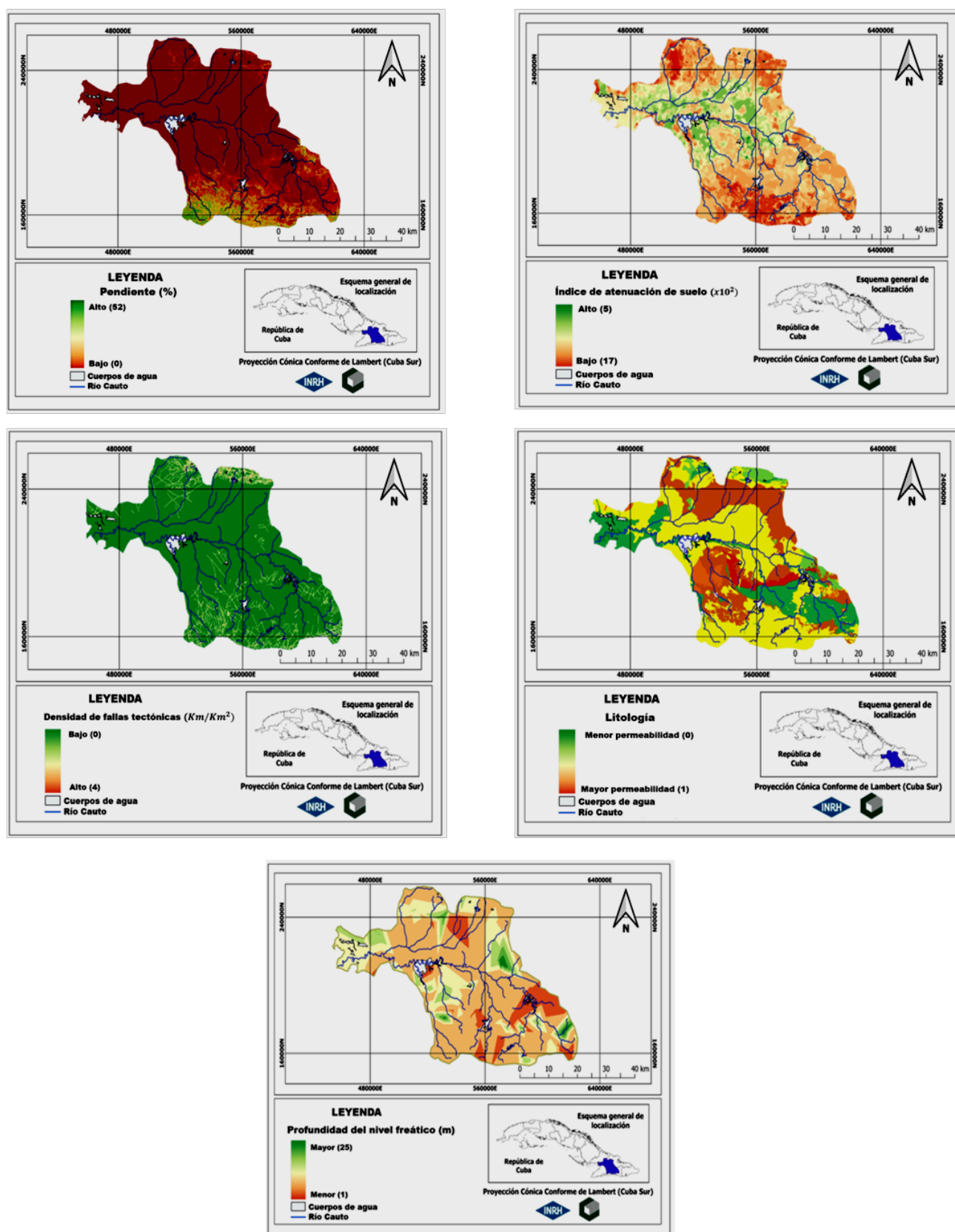


Figura 6. Mapas de pendiente, índice de atenuación del suelo, densidad de fallas tectónicas, litología y nivel freático, elaborados para la implementación del algoritmo K-medias.

Fue calculada la matriz de correlación lineal entre todas las variables, comprobándose que son independientes entre sí y no aportan información redundante, condición necesaria para obtener los mejores resultados con el algoritmo k-medias.

Se obtuvieron modelos de clasificación con dos, tres, cuatro, cinco y seis grupos. Para seleccionar el número óptimo de grupos se aplicó el Método del Codo (Moya, 2016). Según este criterio el modelo de agrupación con cuatro clústeres resultó

el óptimo. Para asociar una categoría de vulnerabilidad a cada grupo se definió el “punto ideal” para la cuenca, que representa la situación de menor vulnerabilidad del acuífero (Vías *et al.*, 2003), cuyas coordenadas se establecieron para: litología menos permeable en la zona no saturada, menor densidad de fallas tectónicas, mayor pendiente topográfica, mayor índice de atenuación del suelo y mayor profundidad del nivel freático.

El grado de vulnerabilidad de cada clúster se definió atendiendo al valor de la distancia euclidiana entre los centroides de cada grupo y el punto ideal.

Este algoritmo es muy sensible al hecho de que las variables posean un rango de variación muy diferente debido a sus valores absolutos, por lo cual el algoritmo trabaja estandarizando todas las variables entre 0 y 1.

Evaluación de la variación espacio temporal de la cobertura vegetal y la salinidad de los suelos en la cuenca

La disminución de la cobertura vegetal y el incremento de la salinidad de los suelos son factores que pueden incrementar la susceptibilidad a la contaminación de las aguas subterráneas, por lo que evaluar la variación espacio temporal de la vegetación y salinidad de los suelos es muy importante en estudios de la vulnerabilidad de los recursos hídricos. Las raíces de las plantas actúan como filtros naturales reteniendo contaminantes y reduciendo la erosión del suelo y la escorrentía superficial, protegiendo los acuíferos contra la contaminación al favorecer su recarga con agua de buena calidad. Altos valores del índice de salinidad de los suelos indica mayor concentración de sales solubles lo que provoca un impacto negativo en el crecimiento de las plantas, las que tendrán más dificultad para absorber agua y nutrientes. También los suelos salinizados pueden provocar la contaminación del agua subterránea porque al ser atravesados por agua de riego o lluvia se disuelven sales que se filtran hacia los acuíferos en detrimento de la calidad del agua que almacenan (WWPA, 2018).

La cobertura vegetal y la salinidad del suelo

fueron evaluadas calculando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de salinidad de diferencia normalizada (NDSI) empleando imágenes satelitales Landsat (Gerardo & Lima, 2022; Mohamed *et al.*, 2022). El estudio de la variación espacio temporal de estos índices espectrales permite inferir si se desarrollan o no buenas prácticas en el manejo de los recursos naturales de la cuenca.

El NDVI evalúa el verdor y densidad de la vegetación captada en una imagen satelital. La vegetación saludable presenta un patrón de reflectancia espectral distintivo, que se puede determinar mediante la diferencia entre dos bandas: la del rojo visible y la del infrarrojo cercano. Este índice varía entre -1 y 1. Permite apreciar cambios en la vegetación asociados al estrés hídrico, impacto de la sequía y susceptibilidad a la contaminación por diferentes causas. Un descenso de los valores de NDVI puede ser un síntoma de deterioro de la salud vegetal (García-Reyes *et al.*, 2021).

El NDSI es un índice utilizado para detectar y cuantificar la salinidad en cuerpos de agua, suelos y terrenos. Se basa en la diferencia entre la reflectancia en bandas espectrales sensibles a la presencia de sales disueltas en el agua o en el suelo. Los valores del NDSI pueden variar entre -1 y 1; valores altos indican mayor salinidad en el área analizada (Aslanov *et al.*, 2021).

En esta investigación fueron calculados y contrastados el NDVI y el NDSI empleando imágenes satelitales Landsat correspondientes a los meses de abril y mayo del año 2000 y al mes de mayo del año 2023. Mediante el uso del sistema informático QGIS se calcularon estos índices espectrales empleando las ecuaciones (2) y (3). Los resultados fueron representados en mapas *ráster* a escala 1: 100.000.

$$NDVI = \frac{\text{Infra rojo cercano} - \text{Rojo}}{\text{Infra rojo cercano} + \text{Rojo}} \quad (2)$$

$$NDSI = \frac{\text{Verde} - \text{Infra rojo de onda corta}}{\text{Verde} + \text{Infra rojo de onda corta}} \quad (3)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 3 presenta la clasificación obtenida al aplicar el análisis de agrupamiento k-medias. Se muestran los centroides de cada grupo y la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas que ellos representan en función de su distancia al punto ideal, punto que sintetiza las

condiciones de mayor protección de los recursos hídricos subterráneos.

La figura 7 muestra el mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas obtenido mediante el empleo de esta técnica de clasificación no supervisada.

Tabla 3-Resultados del análisis clúster K-medias en la cuenca hidrográfica Cauto

	GRUPO 1	GRUPO 2	GRUPO 3	GRUPO 4
Pendiente topográfica	2.75	14.68	3.54	2.79
Índice de atenuación del suelo (multiplicado por 10²)	9.87	7.77	9.96	9.38
Densidad de fallas tectónicas (km/km²)	0.02	0.11	0	0.02
Litología	0.51	0.7	0.71	0.91
Nivel freático	7.99	6.32	7.87	8.52
Número de instancias y %	30 990 (11%)	27 354 (9%)	192 228 (66%)	39 444 (14%)
Distancia al punto ideal	1.016	1.650	1.061	1.461
CLASIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	Baja	Muy alta	Moderada	Alta

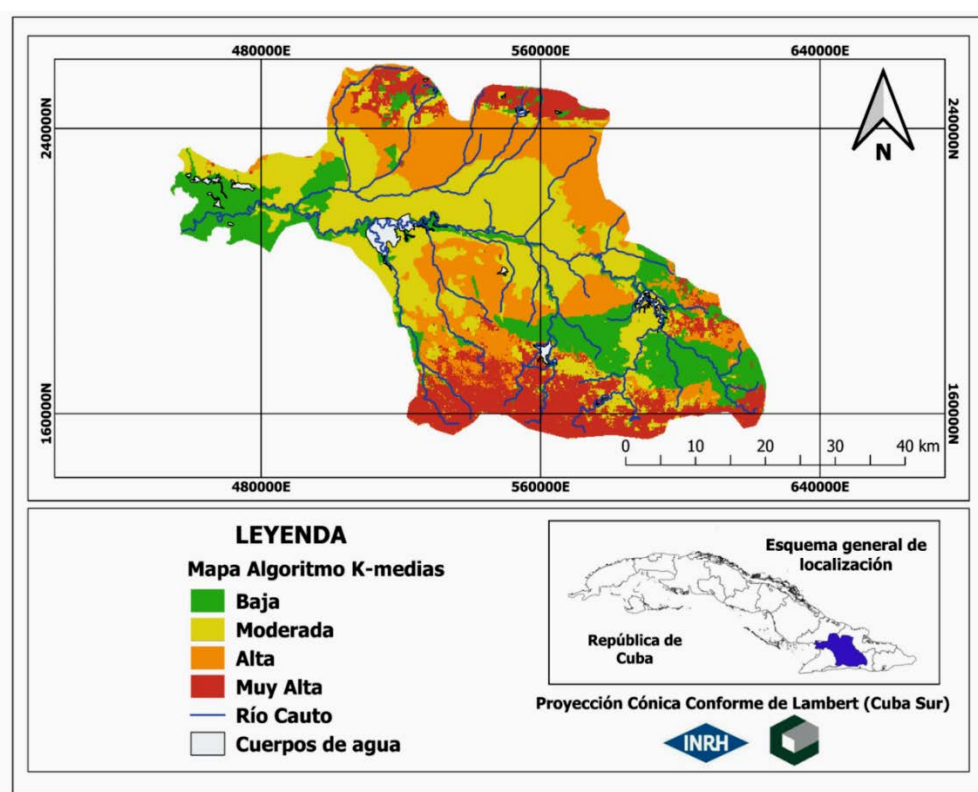


Figura 7. Mapa de vulnerabilidad natural a la contaminación del agua subterránea en la cuenca hidrográfica Cauto obtenido con el algoritmo K-medias.

En los extremos norte y sur de la cuenca se aprecia una vulnerabilidad muy alta que representa el 9 % del área total. En estos sectores existe menor profundidad del nivel freático, alta densidad de fracturamiento que provoca porosidad secundaria y permeabilidad en las rocas, y se presentan suelos con bajo índice de atenuación a los contaminantes. Esta zona se asocia a los complejos acuíferos volcanógeno sedimentario del Paleógeno-Cretácico, representados por formaciones como El Cobre y El Caney, intrusivo básico del Cretácico-Jurásico y ultrabásico-metamorfizado del Cretácico-Jurásico, con rocas del Complejo Ofiolítico.

Hacia el norte y sur de la cuenca se manifiesta alta vulnerabilidad, dada por los bajos valores de la pendiente topográfica y la presencia de rocas con elevada permeabilidad. Representan el 14% del área total y se corresponden con los complejos acuíferos terrígeno-carbonatado y carbonatado-clástico del Neógeno-Oligoceno, clástico-carbonatado del Paleógeno-Cretácico y carbo-natado-clástico del Paleógeno-Cretácico, asociados a las formaciones geológicas Paso Real, Vázquez, Camazán, Bitirí y Charco Redondo, en las que predomina la litología carbonatada cárstica y pendientes topográficas muy pequeñas.

En la zona central de la cuenca predomina la vulnerabilidad moderada al presentar muy baja densidad de fracturamiento, baja pendiente topográfica, mayor índice de atenuación del suelo y rocas con cierta permeabilidad. Representa el 66% del área total y se asocia a los complejos acuíferos clástico-terrágeno del Cuaternario, intrusivo básico del Cretácico-Jurásico, ultrabásico-metamorfizado del Cretácico-Jurásico, asociados a las formaciones geológicas Cauto y Bayamo con una litología característica de rocas clástica-terrágenas principalmente y a rocas de la Asociación Ofiolítica.

Las zonas de baja vulnerabilidad representan el 11% de la cuenca y corresponden a los complejos acuíferos palustre costero del Cuaternario, clástico-terrágeno del Cuaternario, clástico-carbonatado del Paleógeno-Cretácico y carbonatado-clástico del

Paleógeno-Cretácico, asociada a las formaciones geológicas San Luis y La Jíquima, así como a los depósitos palustres y aluviales. En estas áreas, aunque la pendiente es pequeña, se presenta la litología más arcillosa, hay baja densidad de fallas tectónicas y elevado índice de atenuación del suelo.

En investigaciones a escalas más detalladas, donde resulte posible identificar formas cársticas del relieve, debe esperarse un incremento de las áreas ocupadas por zonas de alta y muy alta vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas.

En la figura 8 se presenta la distribución espacio temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) y del Índice de Salinidad de Diferencia Normalizado (NDSI) en el período comprendido entre los años 2000 y 2023 en la cuenca Cauto.

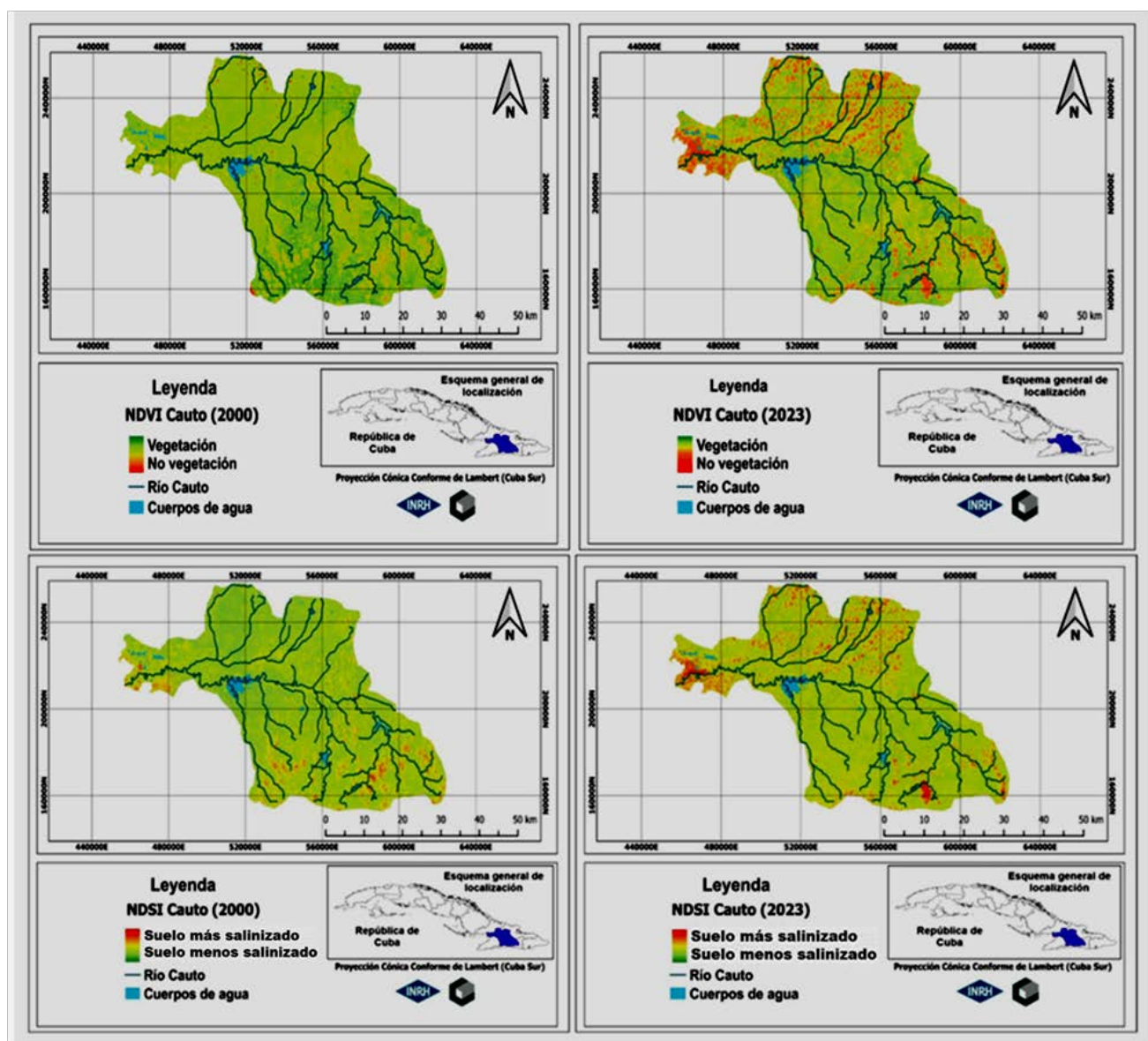


Figura 8- Mapas de la variación espacio temporal del NDVI y NDSI de la cuenca hidrográfica Cauto entre los años 2000 y 2023

Los valores del NDVI en toda el área fluctúan entre -0.8 y 0.8. Este índice es representado por el color verde cuando indica presencia o crecimiento de vegetación, el color rojo está vinculado a áreas que no presentan vegetación o existen asentamientos humanos, mientras que las áreas con tonalidades azules indican presencia de ríos y embalses. Valores entre 0 y 0.8 indican presencia de vegetación, cercanos a cero zonas con muy escasa vegetación, y próximos a 0.8 zonas con abundante vegetación. La comparación de los mapas permite asegurar que ha disminuido la vegetación en casi toda la cuenca, lo que es más acentuado en las áreas norte, sur y la desembocadura del río Cauto. Estas zonas corresponden a praderas y tierras de cultivo. Es importante señalar que la vegetación natural protege la calidad del agua subterránea pero, si es desplazada por cultivos agrícolas hay que tener en cuenta que cada tipo de cobertura vegetal presenta determinada capacidad de protección en función del nivel de agroquímicos que requiera para el desarrollo de la actividad productiva, y en zonas de alta vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los recursos hídricos subterráneos la pérdida de su capacidad protectora tendrá mayor impacto negativo (Latterra *et al.*, 2015).

El comportamiento del NDSI también evidencia incremento de la salinidad de los suelos en los sectores norte, sur y desembocadura del río Cauto, mostrando una evidente alta correlación inversa con el NDVI en estas zonas, es decir, aumento de la salinización de suelos se corresponde con disminución de la cobertura vegetal, lo que puede deberse a factores naturales, prácticas agrícolas inadecuadas o a ambas causas.

De Miguel & Sánchez (2011) estudiaron los problemas de salinización de los suelos en la cuenca Cauto, explicaron que ello obedece a diversos factores como la deforestación y el mal uso de técnicas de riego y drenaje unido al predo-

minio de aguas cloruradas sódicas que están presentes. En su investigación destacan, que del Mioceno inferior (N_1) hasta el Cuaternario (Q), en la región de la Cuenca del Cauto se desarrollaron procesos de ascensos y descensos de la corteza terrestre provocando gran número de transgresiones y regresiones marinas, explicando así el muy variado quimismo de las aguas subterráneas con predominio de aguas cloruradas sódicas en la parte más llana del valle. Estas aguas pueden ascender hasta la superficie del terreno debido a la intensa evaporación depositándose sales en el suelo que las escasas precipitaciones no logran lavar, haciendo que la salinidad en estas zonas se mantenga o incluso aumente paulatinamente si no se implementan prácticas agrícolas adecuadas. Esta situación representa una amenaza a la calidad de las aguas subterráneas tanto por factores naturales como antrópicos que es necesario controlar y mitigar.

En la provincia de Holguín, en el sector noroeste del valle del Cauto, Rodríguez & Riverón (2024) realizaron la cartografía del pH, dureza y Salinidad de las aguas subterráneas. En sus investigaciones destacaron la alta salinidad de las aguas subterráneas en el sector estudiado, lo cual coincide con los resultados obtenidos en la presente investigación para el área norte de la cuenca, en la que se evidencian incrementos de la salinidad de los suelos y disminución de la cobertura vegetal a partir del comportamiento de los índices espectrales NDVI y NDSI.

El incremento de la salinidad de los suelos y la pérdida de vegetación en los sectores norte y sur coincide con áreas clasificadas de alta y muy alta vulnerabilidad de las aguas subterráneas, lo que indica la necesidad de fortalecer las acciones de remediación de suelos y reforestación para contribuir a la gestión sostenible de la cuenca y evitar el deterioro de la calidad de los recursos hídricos.

CONCLUSIONES

El método de clasificación con autoaprendizaje k-medias demostró efectividad para evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas partiendo de una selección de variables informativas y no redundantes. Este algoritmo permitió obtener un mapa de vulnerabilidad a la contaminación por la migración vertical de potenciales contaminantes depositados en la superficie del terreno a escala 1:100 000 para la cuenca hidrográfica Cauto. El

mapa revela que el 66% del área clasifica con vulnerabilidad moderada y el 23% presenta vulnerabilidad entre alta y muy alta, cifras que deben resultar superiores si se evalúa la vulnerabilidad a escalas más detalladas y se lograra identificar la presencia de formas exocársticas en el relieve. Esta situación, unida a la alta carga de contaminación que recibe la cuenca, señala la necesidad de continuar el desarrollo de acciones para proteger sus recursos naturales.

El análisis de la variación espacio - temporal de los índices espectrales NDVI y NDSI entre los años 2000 y 2023 mostró que en la desembocadura del río Cauto y en la región norte y sur de la cuenca existe pérdida de vegetación e incremento de la salinidad de los suelos, lo que representa amenaza de contaminación para los recursos hídricos que puede estar provocada por factores de origen natural, actividades antrópicas o por ambas causas. Estas zonas coinciden con áreas donde existe alta y muy alta vulnerabilidad

a la contaminación de las aguas subterráneas lo que intensifica el impacto negativo de estas amenazas e indica la necesidad del desarrollo de futuras investigaciones que permitan identificar y controlar las causas que provocan esta situación.

El procedimiento desarrollado forma parte de un sistema de alerta temprano para prevenir el deterioro de la calidad de las aguas subterráneas y contribuye a proyectar acciones dirigidas a lograr la gestión integral sostenible de los recursos naturales de esta cuenca hidrográfica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo brindado por autoridades del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) de Cuba para el desarrollo de esta investigación, financiada por el Proyecto “Aplicaciones de la teledetección al estudio de la variación espacio temporal de los ecosistemas relacionados con el agua en Cuba”, perteneciente al Programa Sectorial denominado “Gestión integrada y sostenible de los recursos hídricos”, que se desarrolla entre el INRH y el Departamento de Geociencias de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE. Agradecen también a los árbitros de la revista por las críticas y observaciones realizadas a este trabajo permitiendo su mejor presentación.

REFERENCIAS

- ABOUD NETA, S.R.; BIAS, E.S.; SANTOS, C.A.M. “Classificação Baseada em Objetos e Mineração de Dados: Aplicação de Ferramentas Open Source no Mapeamento de Área Urbana”. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 70, n. 3, p. 932-966, 2018.
- ASAMBLEA NACIONAL DEL PODER POPULAR, ANPP. Ley No. 124 de las aguas terrestres. Gaceta Oficial No. 51 Extraordinaria. Cuba. 63 p., 2017.
- ASLANOV, I.; Kholdorov, S.; OCHILOV, S.; JUMANOV, A. Evaluación del nivel de salinidad del suelo mediante Landsat-8 OLI en el valle central de Fergana, Uzbekistán. En: Foro de Ciencias Ambientales de los Urales "Desarrollo Sostenible de la Región Industrial" (UESF-2021), 2021. pp. 1-8. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125803012>. Consultado en: 25 marzo 2024.
- BATISTA, S. J. L. & RODRÍGUEZ, R. J. Influencia del carso en el régimen de escurrimiento de los ríos de Cuba. *Revista Ciencia de la Tierra y del Espacio*. n.12, p. 22-35, 1986.
- DE MIGUEL FERNÁNDEZ, C. & SÁNCHEZ SÁNCHEZ, Y. Factores hidrogeológicos que influyen en la salinidad del suelo. Ejemplo de estudio Valle del Cauto provincia de Holguín. Cuba. En: IX Congreso Cubano de Geología (GEOLOGÍA, 2011). Disponible en: http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2011_Fernandez_GEO12-P5.pdf. Consultado en: 17 abril 2024.
- DE MIGUEL, F. C. Hidrogeología aplicada con aspectos ambientales. Editorial Digital Universitaria de Moa, 384 p., 2012.
- DEEPESH, M.; MADAN, K.; JHA, V. P.; SINGH, C. Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: Current status and challenges Earth, 2018. Disponible en: <http://doi:10.1016/j.earscirev.2018.08.009>. Consultado en: 20 de marzo 2024.
- ECHEMENDÍA MARTÍNEZ, A.; DENÉSTEVEZ GARCÍA, C.; BORRERO IVONNET, H.; HERNÁNDEZ PÉREZ, C.; BLÁZQUEZ BLANCO J. L.; CASTAÑEDA MIRANDA, L. F. Metodología para la confección del Mapa Hidrogeológico Provincial a escala 1:100 000. Cuba. Archivo técnico RAUDAL, p. 48-59, 2007.
- FOSTER, S. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Netherlands Organization for Applied Scientific Research, The Hague, p. 69-86, 1987.
- FOSTER S., HIRATA R. Y ANDREO B. The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? *Hydrogeology Journal*. 2013. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1019-7>. Consultado en: 15 noviembre 2024.
- GARCÍA, J. & GUTIÉRREZ J. La gestión de cuencas hidrográficas en Cuba. La Habana: Editorial Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, 95 p., 2015.
- GARCÍA-REYES R.A., GONZÁLEZ M.D., TORRES-CALZADO K., VILLAZÓN-GÓMEZ J.A., ABELLÓN-MOLINA M.I. Y VELÁZQUEZ –SÁNCHEZ E.C. Sensoramiento remoto de la salinidad en el agroecosistema Mayarí de la provincia Holguín, Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, v.30, n. 1, p. 26-32, 2021.
- GERARDO, R.; LIMA, I. Sentinel-2 Satellite Imagery-Based Assessment of Soil Salinity in Irrigated Rice Fields in Portugal. *Agriculture*, v. 12, p. 1-20, 2022.
- GIMÉNEZ, Y. Clasificación no supervisada: El método de k-medias. Argentina, 2010. Disponible : http://cms.dm.uba.ar/academico/carreras/licenciatura/tesis/2010/Gimenez_Yanina.pdf Consultado en: 7 abril 2024.
- GÓMEZ – ESCALONILLA V. & MÁRTINEZ-SANTOS P. A Machine Learning Approach to Map the Vulnerability of Groundwater Resources to Agricultural Contamination. *Hidrology*, v.11, n. 9, 2024. Disponible en <https://doi.org/10.3390/hydrology11090153>. Consultado en: 22 febrero 2025
- GUTIÉRREZ, R. & RIVERO, M. Regiones naturales de la Isla de Cuba. Editorial Científico Técnica, Ciudad de La Habana, Cuba, 145 p., 1999.
- GRUPO EMPRESARIAL GEOCUBA (GEOCUBA). Modelo Digital de Elevaciones de la República de Cuba, La Habana, 2010.
- HAMDAN, H., EMAD, L. K-means clustering algorithm applications in data mining and pattern recognition. *International Journal of Science and Research*, v. 6, n. 8, p. 1577-1584, 2017.
- INSTITUTO DE GEOGRAFÍA. Mapa del carso de Cuba. En

- Nuevo Atlas Nacional de Cuba: Academia de Ciencias de Cuba. Ciudad de La Habana, Cuba. 1989. Disponible en: http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/1989_Atlas-NC-cap-V.pdf. Consultado en: 20 de mayo 2025
- INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y PALEONTOLOGÍA, IGP. Mapa Geológico de la República de Cuba a escala 1:100 000. La Habana, Servicio Geológico de Cuba, 2011.
- INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y PALEONTOLOGÍA, IGP. Mapa Tectónico de la República de Cuba a escala 1:100 000. La Habana, Servicio Geológico de Cuba, 2011.
- INSTITUTO DE SUELOS de Ministerio de Agricultura, MINAGRI. Mapa de los Suelos de la República de Cuba a escala 1:100 000, Ministerio de la Agricultura, La Habana, 2000.
- ITURRALDE VINENT, M. A. (Editor). Geología de Cuba y del Caribe. Tercera Edición. Editorial CITMATEL, La Habana, Cuba, 151 p., 2019.
- LATERRA, P., BARRAL, P., CARMONA, A., NAHUELHUAL, L. ECOSER: protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y vulnerabilidad socio-ecológica para el ordenamiento territorial: Ediciones INTA, Argentina, 59 p., 2015. Disponible en: <http://ecoser.com.ar/> Consultado en: 22 febrero 2025.
- MARGAT, J. Vulnerabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Francia: Editorial BRGM, 68 p., 1968.
- MARTÍNEZ, A. Aplicación de técnicas de minería de datos con software Weka. Universidad de Salamanca, 2018. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s10115-003-0128-3> Consultado en: 29 septiembre 2019.
- MOHAMED, M.; MOHAMED, M.; REFAAT, M. Soil salinity mapping using remote sensing and GIS. Geomática, n. 75, p. 295-309, 2021.
- MOYA, R. Selección del número óptimo de clusters. Disponible en: <https://jrrob.com/seleccion-del-numero-optimo-clusters> Consultado en: 4 de octubre 2021.
- RAPIYA, M.; RAMOELO, A. Groundwater-Vegetation Interactions in Rangeland Ecosystems: A Review. Water, 17, 1174, p. 1-20, 2025. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/w17081174> Consultado en: 5 de junio 2025.
- RODRÍGUEZ, H. Y. & RIVERÓN, Z. A.B. Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas del sector noroeste del Valle del Cauto, Holguín. Revista Ciencia y Futuro, v.14, n. 3, p. 293-305, 2024
- UNESCO. Mejorar el manejo sustentable de las aguas subterráneas. 2021. Disponible en: <https://es.unesco.org/themes/garantizar-suministroagua/hidrologia/aguasubterranea/manejosustentable#:~:text=El%20manejo%20sus>. Consultado en: 31 enero 2024.
- VALCARCE, R.M. & SOLIS, E. Aplicación de la minería de datos a la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos en las cuencas Cuyaguaje y Costera Sur de Pinar del Río, Cuba. Geociencias, v. 41, n. 2, p. 417-426, 2022.
- VARGAS, Q. M. S. Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación. Ministerio de Ambiente, Bogotá, 45 p., 2010. Disponible en: <https://archivo.minambiente.gov.co>. Consultado en: 31 julio 2024.
- VÍAS J. M.; PERLES, M. J.; ANDREO, B. Aplicación del análisis clúster para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, n. 3, p. 199-215, 2003.
- VRBA, J. & ZAPOROZEC, A. Guidebook on mapping ground water vulnerability. IAH International Contributions to Hydrogeology. Heise, Hannover, 131 p., 1994.
- WWAP Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos/ONU-Agua. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. París, UNESCO. 168 p., 2018. Disponible en: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/> Consultado en: 31 julio 2024.
- ZWAHLEN, F. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, scope, goal, results. European Commission. COST Action 620. Belgium, 297 p, 2003. Disponible: http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/F+E/Cost620/cost620_fb_02_pdf?__blob=publicationFile&v=1 Consultado en: 22 de marzo 2024.

Submetido em 5 de abril de 2025

Aceito par publicação em 20 de agosto de 2025