

La influencia del uso del suelo en la vulnerabilidad de un acuífero en la cuenca hidrográfica San Juan, Cuba

The impact of land use on the vulnerability of an aquifer in the San Juan watershed, Cuba

Mayelin González Trujillo

Universidad de Oriente
Santiago de Cuba, Cuba
mtrujillo@uo.edu.cu

 ORCID: 0000-0003-1661-9206

Rogelio García Tejera

Universidad de Oriente
Santiago de Cuba, Cuba
rogelio.garcia@uo.edu.cu

 ORCID: 0000-0002-5929-1450

María Teresa Duran Silveira

Delegación de Recursos Hidráulicos
Santiago de Cuba, Cuba
teresa@stg.hidro.gob.cu

 ORCID: 0000-0001-6355-0489

Celia Rosa Grau Cádiz

Universidad de Oriente
Santiago de Cuba, Cuba
celia.rosa@crearq.cu

 ORCID: 0000-0002-1183-0064

Información del artículo

Recibido: 31 marzo 2021

Revisado: 4 julio 2021

Aceptado: 12 diciembre 2021

ISSN 2340-8472

ISSNe 2340-7743

DOI 10.17561/AT.21.6263

 CC-BY

© Universidad de Jaén (España).
Seminario Permanente Agua, Territorio y Medio Ambiente (CSIC)

RESUMEN

El presente artículo aborda un problema ambiental en la cuenca hidrográfica San Juan, en la provincia Santiago de Cuba. El objetivo fue evaluar la vulnerabilidad del acuífero San Juan bajo las afectaciones del uso del suelo. Los métodos empleados son el análisis documental y el Groundwater confinement, Overlaying strata and Depth groundwater (GOD), la vulnerabilidad por exposición y fragilidad ambiental, representados en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Los resultados evidencian una propuesta metodológica adaptada que permite determinar la vulnerabilidad de acuíferos y analizar las afectaciones por el uso del suelo, aportando una herramienta útil en la toma de decisiones. El mapa de vulnerabilidades muestra que el acuífero está sometido a vulnerabilidad alta y moderada, siendo el área acuífera una zona en conflicto de usos del suelo, con un crecimiento urbano desordenado, usos de contaminantes potenciales, como vertido de residuales domésticos, hospitalarios, industriales, porcinos y de cultivos varios.

PALABRAS CLAVES: Acuíferos, Cuencas hidrográficas, Gestión de recursos hídricos, Vulnerabilidad hídrica, GIS.

ABSTRACT

This article deals with an environmental problem in the San Juan watershed, in the province of Santiago de Cuba. The objective was to evaluate the vulnerability of the San Juan aquifer under the effects of land use. The methods used are documentary analysis and Groundwater confinement, Overlaying strata and Depth groundwater (GOD), vulnerability by exposure and environmental fragility, represented in a Geographic Information System (GIS). The results show an adapted methodological proposal that allows determining the vulnerability of aquifers and analyzing the effects of land use, providing a useful tool for decision making. The vulnerability map shows that the aquifer is subject to high and moderate vulnerability; the aquifer area is a zone in conflict of land uses, with a disorderly urban growth, potential contaminant uses, such as dumpings of domestic, hospital, industrial, swine and various crops.

KEYWORDS: Aquifers, Watersheds, Water resources management, Water vulnerability, GIS.

L'impact de l'utilisation des terres sur la vulnérabilité d'un aquifère dans le bassin versant de San Juan, Cuba

RÉSUMÉ

Cet article traite d'un problème environnemental dans le bassin hydrographique de San Juan, dans la province de Santiago de Cuba. L'objectif était d'évaluer la vulnérabilité de l'aquifère de San Juan sous les effets de l'utilisation des terres. Les méthodes utilisées sont l'analyse documentaire et le *Groundwater confinement, Overlaying strata and Depth groundwater* (GOD), la vulnérabilité par exposition et la fragilité environnementale, représentée dans un Système d'Information Géographique (SIG). Les résultats montrent une proposition méthodologique adaptée pour déterminer la vulnérabilité des aquifères et analyser les effets de l'utilisation des terres, fournissant un outil utile pour la prise de décision. La carte de vulnérabilité montre que l'aquifère est soumis à une vulnérabilité élevée et modérée, étant la zone de l'aquifère une zone en conflit d'utilisation des terres, avec une croissance urbaine désordonnée, les utilisations de polluants potentiels, tels que le déversement de domestiques, hospitaliers, industriels, les porcs et diverses cultures.

MOTS CLÉS: Aquifères, Bassins versants, Gestion des ressources en eau, Vulnérabilité de l'eau, SIG.

O impacto do uso do solo na vulnerabilidade de um aquífero na bacia hidrográfica de San Juan, Cuba

RESUMO

Este artigo trata de um problema ambiental na bacia hidrográfica de San Juan, na província de Santiago de Cuba. O objetivo era avaliar a vulnerabilidade do aquífero de San Juan sob as expectativas de uso do solo. Os métodos utilizados são a análise documental e o Confinamento das Águas Subterrâneas, Estratos Sobrepostos e Águas Subterrâneas Profundas, a vulnerabilidade por exposição e fragilidade ambiental, representada num Sistema de Informação Geográfica. Os resultados mostram uma proposta metodológica adaptada para determinar a vulnerabilidade dos aquíferos e analisar os efeitos do uso da terra, proporcionando um instrumento útil para a tomada de decisões. O mapa de vulnerabilidade mostra que o aquífero está sujeito a uma vulnerabilidade elevada e moderada, sendo a área aquífera uma zona em conflito com o uso da terra, com um crescimento urbano desordenado,

usos de potenciais poluentes, tais como o despejo de poluentes domésticos, hospitalares, industriais, suínos, e várias culturas.

PALAVRAS-CHAVE: Aquíferos, Bacias hidrográficas, Gestão de recursos hídricos, Vulnerabilidade hídrica, SIG.

L'impatto dell'uso del suolo sulla vulnerabilità di un acquifero nello spartiacque di San Juan, Cuba

SOMMARIO

Questo articolo tratta un problema ambientale nel bacino idrografico di San Juan, nella provincia di Santiago de Cuba. L'obiettivo era quello di valutare la vulnerabilità della falda acquifera di San Juan sotto gli effetti dell'uso del suolo. I metodi utilizzati sono l'analisi documentaria e il *Groundwater confinement, Overlaying strata and Depth groundwater* (GOD), la vulnerabilità per esposizione e fragilità ambientale, rappresentata in un Geographic Information System (GIS). I risultati mostrano una proposta metodologica adattata per determinare la vulnerabilità degli acquiferi e analizzare gli effetti dell'uso del suolo, fornendo un utile strumento per il processo decisionale. La mappa di vulnerabilità mostra che l'acquifero è soggetto a vulnerabilità alta e moderata, essendo l'area dell'acquifero una zona in conflitto di uso del suolo, con una crescita urbana disordinata, usi di potenziali inquinanti, come scarico di rifiuti domestici, ospedalieri, industriali, suini, e colture varie.

PAROLE CHIAVE: Acquiferi, Spartiacque, Gestione delle risorse idriche, Vulnerabilità dell'acqua, GIS.

Introducción

La protección y conservación de los recursos hídricos es una de las metas y retos más importantes de la humanidad, y las cuencas hidrográficas adquieren el papel fundamental, ya que en ellas se producen problemáticas medioambientales que pueden generar impactos negativos en la cantidad y calidad de estos recursos.

De aquí que se abogue por la integración en la gestión de los recursos hídricos¹, ya que proporciona una herramienta para el desarrollo de los mismos, a través de un balance que incluye las necesidades económicas, sociales, políticas y ambientales en función de las características del territorio y de sus gobiernos². El análisis se centra en la cuenca hidrográfica, ya que es una unidad morfológica integral y de planificación territorial útil para la gestión de sus recursos. Este sistema integra los componentes físicos, biológicos y antropogénicos que determinan los usos del suelo: bosques, pastizales, humedales, zonas agrícolas y áreas urbanas³.

Durante las últimas décadas, el cambio y uso indiscriminado del suelo y la falta de un adecuado ordenamiento territorial, producto de avances urbanísticos sin control, han provocado en las cuencas hidrográficas cambios significativos, que pueden manifestarse en alteraciones del paisaje y diferentes usos en un mismo espacio geográfico, lo que concurre en conflictos por el uso del suelo, elementos que influyen directamente en el comportamiento del ciclo hidrológico⁴ y de los recursos hídricos.

Los conflictos del uso del suelo se producen por la discrepancia entre el uso que debería tener la tierra (suelo) por su capacidad de oferta ambiental y el uso actual al que se expone por las actividades humanas. Estas situaciones causan impactos ambientales negativos, los cuales son más peligrosos en las cercanías de las corrientes hídricas, ya que pueden afectar su calidad⁵.

En función de estos conflictos se hace necesario el análisis del ordenamiento de estas áreas, profundizando en los impactos generados, con la finalidad de lograr una mayor sustentabilidad del territorio⁶. Respecto al ordenamiento, el conocimiento geográfico se considera un elemento base para analizar en un espacio determi-

nado el comportamiento del medio ambiente, donde se manifiesta la sociedad con sus conflictos, que conlleva a la percepción de riesgos⁷ y al análisis de las vulnerabilidades, en especial la de los recursos hídricos y sus acuíferos⁸.

La perspectiva metodológica esclarece que el análisis de vulnerabilidades es uno de los procedimientos más utilizados en la gestión y manejo de los recursos hídricos. Se destacan varios métodos para la evaluación de la contaminación hidrogeológica, con sus propias limitaciones y exigencias en cuanto al tipo de datos adecuados⁹, como es el GOD¹⁰, DRASTIC¹¹, EPIK (es un método paramétrico desarrollado para acuíferos cársticos)¹², AVI¹³, SINTACS¹⁴ y el método conocido como RISK (método multicriterio para cartografiar la vulnerabilidad de acuíferos cársticos)¹⁵.

El concepto de vulnerabilidad hidrogeológica considera las características propias de los estratos (intrínsecas) que separan la zona no saturada de la saturada¹⁶, muestra dónde el acuífero es más vulnerable, pero la vulnerabilidad también depende de factores como las diversas condiciones de cobertura y uso del suelo, la actividad del hombre¹⁷ y los efectos del cambio climático, de aquí que se haga necesario introducir variables que analicen estas vulnerabilidades. En este aspecto, se propone una metodología que determina la vulnerabilidad por exposición, fragilidad y capacidad de adaptación y respuesta de fenómenos naturales¹⁸. En cuanto a los criterios, la vulnerabilidad por fragilidad y por exposición que ofrecen estas, forman parte de la base metodológica para esta investigación.

Los sistemas de información geográfica son herramientas que poseen la capacidad de simplificar la recolección de datos, la caracterización y los análisis de las cubiertas del suelo, sus usos y sus variaciones en distintos periodos de tiempo¹⁹. Sirven también para la representación y modelación espacial de las vulnerabilidades, en una cartografía que permite representar las áreas o zonas donde el acuífero es más vulnerable

1. Murillo, 2019.

2. García y Herrera, 2019.

3. Peña et al., 2011.

4. Olivares, López y Lobo, 2019.

5. Alfaro, 2018.

6. Yael, Zulaica y Vazquez, 2020.

7. Bayón y Padilla, 2020

8. Gómez et al., 2019.

9. Gárfias et al., 2017.

10. Foster, 1987.

11. Aller et al., 1987.

12. Doerfliger, Jeannin y Zwahlen, 1999.

13. Van Stempvoort, Evert y Wassenaar, 1993.

14. Civita, 1994.

15. Valcarce et al., 2020.

16. Gómez et al., 2019.

17. Albornoz y González, 2017.

18. Vera y Albarracín, 2017.

19. Yael, Zulaica y Vazquez, 2020.

y que, de presentarse un vertimiento, lo expondría a la contaminación²⁰. Además, permiten trabajar con bases de datos geo-referenciadas que pueden ser actualizadas y admiten el monitoreo del comportamiento de las variables que inciden en las vulnerabilidades.

El estudio de caso de esta investigación se llevó a cabo en la cuenca hidrográfica San Juan, que está ubicada en la isla de Cuba –en Santiago de Cuba–, donde se dispone del único acuífero de la ciudad, el cual abastece a una población aproximada de sesenta mil habitantes. Es una cuenca de interés industrial y agropecuario, donde se producen frutas de magnífico sabor y predominan las granjas de ganado vacuno y porcino. Además, cuenta con especies de flora y fauna autóctonas y una de las tradiciones santiagueras, que data desde la época de los indios (en la zona del Caney), el baño en las aguas del río San Juan el 24 de junio.

Esta cuenca tiene establecido un Programa de Gestión Integrada y está considerada por el Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas en Cuba, como de interés provincial; y por su importancia como fuente de abasto a la ciudad, valor económico, paisajístico, cultural e histórico, se está valorando que sea de interés nacional.

En un estudio realizado sobre este programa, se plantea que en la gestión del mismo “...aún prevalecen enfoques sectoriales, bajo cumplimiento de las normas jurídicas asociadas al ordenamiento territorial y los sistemas de gestión ambiental urbanos y empresariales constituyen alto riesgo jurídico para su gestión integrada”²¹.

Asimismo, entre los problemas ambientales que la afectan se encuentra el uso inadecuado del suelo, el incremento urbanístico, poblacional y de actividades productivas (industrias, servicios sociales y agropecuarios, entre otros), la falta de un sistema de alcantarillado competente, que provoca el vertido de las aguas residuales directo al suelo sin previo tratamiento y con insuficiencias en su sistema de gestión. Estos problemas afectan al acuífero y lo hacen vulnerable a la contaminación, aspecto muy marcado en los últimos tiempos²².

Por lo anterior, el presente estudio evalúa la vulnerabilidad del acuífero San Juan bajo las afectaciones del uso del suelo. Dado que la vulnerabilidad está en función de la exposición, la fragilidad y la capacidad de adaptación y respuesta, se propone estimar la vulnerabilidad en función de estos factores, con el fin de

obtener elementos científicos que permitan orientar el proceso de toma de decisiones en la gestión integrada de esta cuenca hidrográfica, en función de la protección del acuífero.

Metodología

La evaluación de la vulnerabilidad es de los primeros pasos que se realizan para la implementación de programas en la gestión de los recursos hídricos y protección de acuíferos. Una de las tareas más importantes es la selección del método a aplicar. En este aspecto se debe considerar el grado de detalle de la evaluación, la información existente de la zona en estudio y el objetivo a perseguir.

De los métodos que se utilizan para determinar la vulnerabilidad hidrogeológica, el DRASTIC y el SINTACS permiten obtener una mejor definición de la vulnerabilidad por sus estudios de detalle, pero requieren un mayor número de parámetros²³, lo que complica el proceso en regiones con poca información. En cambio, el GOD, que es un método sencillo y sistemático, simplifica la evaluación y permite hacer una primera valoración en función de la planificación para la conservación y uso adecuado del acuífero.

No obstante, la vulnerabilidad hidrogeológica se aborda desde el punto de vista del recurso, evaluando sus características intrínsecas naturales, no así de los usuarios, por lo que no considera los usos del suelo, la acción del hombre²⁴ ni el comportamiento de los efectos del cambio climático dentro de los parámetros de su evaluación. Por ello, se hace necesario evaluar también la vulnerabilidad específica o vulnerabilidad ambiental, producto de las acciones antrópicas y por cambios climáticos.

De este modo, se presenta una propuesta metodológica integradora, compuesta de tres etapas: 1) búsqueda y procesamiento de la información, 2) cálculo de la vulnerabilidad hidrogeológica aplicando el método GOD (*Groundwater confinement, Overlaying strata and Depth groundwater*)²⁵ y 3) cálculo de la vulnerabilidad global por exposición y fragilidad ambiental que permiten el análisis de influencias del uso del suelo sobre el acuífero.

En la primera etapa se recopilan los documentos, informes técnicos, cartografías, mapas y bases de datos necesarios para el análisis cualitativo, aplicando el mé-

²⁰. Rizo, 2017.

²¹. Alarcón et al., 2019, 241.

²². Calderín et al., 2019

²³. Auge, 2007.

²⁴. Rizo, 2017.

²⁵. Rizo, 2017. Gómez et al., 2019.

todo de análisis de documentos y los métodos de análisis-síntesis e inducción-deducción en todo el proceso de determinación de las vulnerabilidades y análisis de influencias²⁶.

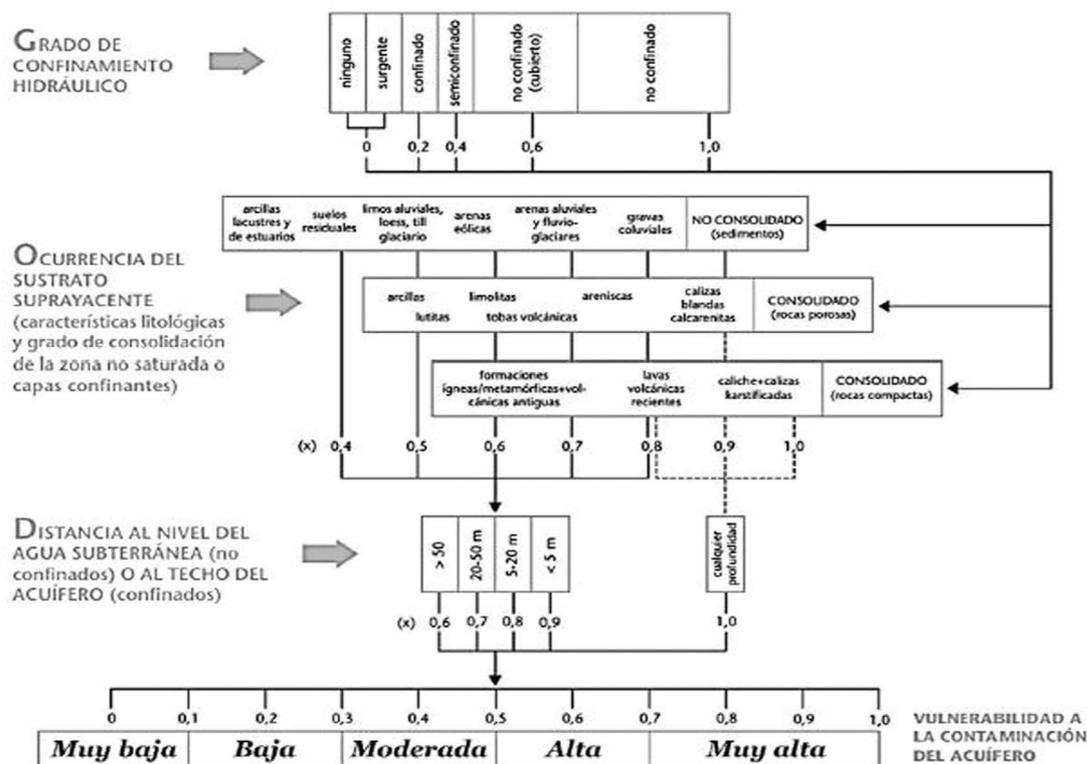
En la segunda etapa se calcula la vulnerabilidad hidrogeológica a través del método GOD, relativamente sencillo de aplicar con escasez de datos, pero que es tan efectivo como otros métodos más complejos. El método como su nombre indica tiene en cuenta tres variables: grado de confinamiento del acuífero (G), en inglés (*Groundwater confinement*), la litología de la zona no saturada (O) (*Overlaying strata*) y la profundidad del nivel freático (D) (*Depth groundwater*). Su índice se calcula $GOD = G \cdot O \cdot D$ y se obtiene un valor de índice de vulnerabilidad, comprendido entre 0 y 1 (clase muy baja a clase muy alta, respectivamente). Estas variables tienen un punteo establecido²⁷, como puede observarse en la Figura 1.

En la tercera etapa se tomaron en consideración aspectos e indicadores de la metodología de Vera y Albarracín (2017) y se adaptaron a este estudio; estos

determinan la vulnerabilidad global a través de la vulnerabilidad por exposición y por fragilidad ambiental. La determinación de la vulnerabilidad se realizó particularizando el estudio por subcuencas²⁸.

En el cálculo de la vulnerabilidad por exposición se tienen en cuenta dos variables. La primera es la exposición por sistemas de producción, en la cual se hizo una adaptación en sus indicadores, los que tienen en cuenta el vertido de residuales de los asentamientos y hospitales, convenios porcinos, fábricas e industrias, talleres de transporte, elementos que influyen altamente en la contaminación de los recursos hídricos y que afectan al acuífero. La segunda variable es la exposición por población, en la que se considera como base la localización de las viviendas en el área de estudio y se tiene en cuenta el porcentaje de área de terreno que ocupan. Y en la tercera, en la determinación de la vulnerabilidad por fragilidad ambiental, se tienen en cuenta las variables: conflictos por uso del suelo, los niveles de deforestación y los impactos estimados del cambio climático.

Figura 1. Diagrama con la asignación de valores de las variables del método GOD



Fuente: Rizo, 2017.

26. Hall y Steiner, 2020.

27. Rizo, 2017.

28. Vera y Albarracín, 2017.

Como resultado final, se obtiene la vulnerabilidad global por una relación aritmética simple, la cual fue escogida por su simplicidad y la capacidad de esquematizar el proceso en general y los criterios de aplicación, como se muestra en la Tabla 1.

A continuación, se muestra el sistema de indicadores para la estimación y ponderación de las variables (Tabla 2).

Una vez obtenidos los resultados de los mapas espaciales de la vulnerabilidad hidrogeológica y la vul-

nerabilidad global por exposición y fragilidad, con el comportamiento de sus variables, se procede a hacer el análisis de integración y comparación de resultados a través de la superposición de mapas y el método de análisis-síntesis, para detectar las zonas y variables vulnerables, con el objetivo de obtener los elementos científicos necesarios para la toma de decisiones, en la evaluación y selección de medidas puntuales que permitan prevenir o reducir los efectos de la contaminación en acuíferos. Esta es una herramienta que admite el control y moni-

Tabla 1. Funciones para la estimación de las variables y sus componentes

| Tipo de vulnerabilidad | Función |
|------------------------------------|--|
| Vulnerabilidad global (V) | $V = (VE + VF) / 2$ |
| Vulnerabilidad por exposición (VE) | $VE = \frac{VESP + VEP}{2}$ |
| | Vulnerabilidad por exposición de los sistemas de producción (VESP) Vulnerabilidad por exposición de la población (VEP) |
| Vulnerabilidad por fragilidad (VF) | $VF = VFA = (CPUS + NDEF + IECC) / 3$ |
| | Conflictos por uso del suelo (CPUS) Nivel o grado de deforestación (NDEF) Impacto estimado del cambio climático (IECC) |

Fuente: adaptado de Vera y Albarracín, 2017.

Tabla 2. Componentes, variables y criterios de evaluación para determinación

| Componente | Variables de medición | Criterios |
|--|--|---|
| Vulnerabilidad por exposición de población (VEP) | Localización Viviendas | <ul style="list-style-type: none"> Más del 20 % del total de los elementos expuestos en zonas de nivel de amenaza alta, vulnerabilidad alta (3 puntos). Menos del 20 % del total de los elementos expuestos en zonas de nivel de amenaza alta y más del 30 % en amenaza media, vulnerabilidad moderada (2 puntos). Menos del 20 % de elementos en amenaza alta y más del 60 % del total de los elementos expuestos se encuentran en zonas de nivel de amenaza baja, vulnerabilidad baja (1 punto). |
| Vulnerabilidad por exposición de sistemas de producción (VESP) | Aportación de residuales Puntos de vertido de asentamientos y hospitales, convenios porcinos, fábricas e industrias, talleres e industrias de transporte | <ul style="list-style-type: none"> Combinación de vertido de residuales de industrias, talleres, hospitales, asentamientos, porcinos con más de tres unidades, vulnerabilidad alta (3 puntos). Combinación de vertido de residuales de industrias, talleres, hospitales, asentamientos, porcinos entre una o tres unidades, vulnerabilidad moderada (2 puntos). Combinación de algunas variables que no presenten gran impacto, vulnerabilidad baja (1 punto). |
| Vulnerabilidad por fragilidad ambiental (VFA) | Equilibrio en la relación sociedad-naturaleza (degradación de base ecosistémica y prácticas productivas inadecuadas, efectos estimados del cambio climático) | <ul style="list-style-type: none"> Área en conflicto > 40 %, vulnerabilidad alta (3 puntos). Área en conflicto 20,1 a 40 %, vulnerabilidad moderada (2 puntos). Área en conflicto < 20 %, vulnerabilidad baja (1 punto) |
| | Nivel de deforestación | <ul style="list-style-type: none"> Coberturas boscosas < 20 %, vulnerabilidad alta (3 puntos). Coberturas boscosas entre 20,1 y 50 %, vulnerabilidad moderada (2 puntos). Coberturas boscosas > 50 %, vulnerabilidad baja (1 punto). |
| | Variaciones de temperatura, precipitación, pérdida de suelo, etc. | <ul style="list-style-type: none"> Impacto estimado alto, vulnerabilidad alta (3 puntos). Impacto estimado medio, vulnerabilidad moderada (2 puntos). Impacto estimado bajo, vulnerabilidad baja (1 punto). |

Fuente: adaptado de Vera y Albarracín, 2017.

toreo del comportamiento ambiental, de vulnerabilidad intrínseca y específica para la protección de los acuíferos en la gestión integrada de cuencas hidrográficas.

Es necesario aclarar que esta metodología es general y, por su simplicidad y la capacidad de esquematizar el proceso y los criterios de aplicación, la misma está diseñada para que se pueda aplicar a cualquier situación y condición ambiental de una determinada área geográfica, en especial en análisis de zonas con menor información, como es el caso de Latinoamérica.

Descripción del área de estudio

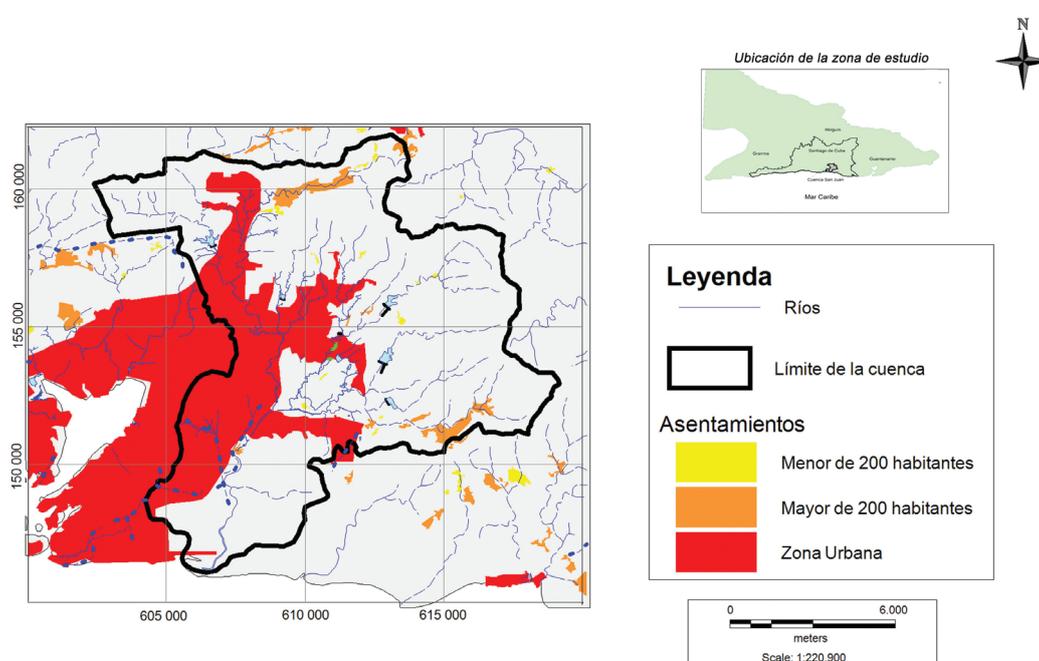
La cuenca hidrográfica San Juan se ubica en el municipio de Santiago de Cuba en su sector Este, con una superficie de 138,3 km². Limita al norte con las alturas de Boniato y el Bonete, al sur con las mesetas litorales y el Mar Caribe, al este con las alturas de Ochoa y las Guásimas y al oeste con las alturas de Puerto Pelado y la Ciudad de Santiago de Cuba, desembocando en la zona conocida como Aguadores, con un caudal medio anual de 1,17 m³/s,

un volumen total de 37,2 hm³ y con una densidad de drenaje (Dd) de 1,06 km/km². El principal tributario es el río San Juan y sus principales afluentes son los ríos Cocal, Seco, Zacateca, Dos Bocas y Maisí, por lo que la cuenca se subdivide en cinco sub-cuencas denominadas: San Juan, Chalons, Dos Bocas, Maisí-Zacatecas y Río Seco, que permiten la identificación y solución de problemas facilitando las acciones a realizar²⁹. Su relieve es heterogéneo, con zonas boscosas y se reconoce por su topografía en tres unidades: la alta, la media y la baja³⁰.

Está conformada por 21 asentamientos, con un sector edificado de la ciudad Santiago de Cuba y los 20 restantes son rurales. La población total de la cuenca (exceptuando la ciudad Santiago de Cuba) es de aproximadamente 9.990 habitantes, existiendo diez de los 20 asentamientos con poblaciones mayores de 200 habitantes³¹ (Mapa 1).

El potencial hidráulico total es de 42,4 hm³, en aguas superficiales de 30,4 hm³ y subterráneas de 12,0 hm³, evaluado en cuanto a escurrimiento medio hiper-anual hasta la desembocadura. En cuanto a las fuentes superficiales en la cuenca, se ubica el embalse Chalons y 5 micropresas, que almacenan 5,094 hm³ de agua³².

Mapa 1. Mapa de ubicación de la cuenca hidrográfica San Juan



Fuente: elaboración propia.

²⁹ Durán, 2017.

³⁰ Calderín et al., 2019

³¹ Calderín et al., 2019

³² Durán, 2017

El acuífero subterráneo, de 22,3 km² se clasifica como acuífero libre, no consolidado, contiene reservas de agua calculadas en 12 millones de m³ al año para abastecer a un sistema socio-económico localizado fuera de los límites de la cuenca hidrográfica y compuesto por alrededor de sesenta mil habitantes y 185 entidades económicas, socioculturales y recreativas³³.

Se encuentra formada por alrededor de trece formaciones geológicas, entre las que predominan las formaciones El Cobre, La Cruz, Río Maya, también por el miembro Santiago y los sedimentos cuaternarios representados por arcillas arenosas, arenas arcillosas y cantos rodados en las márgenes del río³⁴ (Mapa 2).

La formación El Cobre está ampliamente distribuida a través de la Sierra Maestra, forma una franja meridional y regular estrecha de extensión a lo largo de la costa sur de las provincias de Santiago de Cuba y Granma. Su mayor parte se halla representada por rocas andesíticas, tanto efusivas como volcánicas sedimentarias, aglomeradas, tobas en todas sus combinaciones, tufitas (mayormente calcáreas) y además por intercalaciones

en distintas partes de lentes y capas de calizas organogénicas y calizas tobáceas.

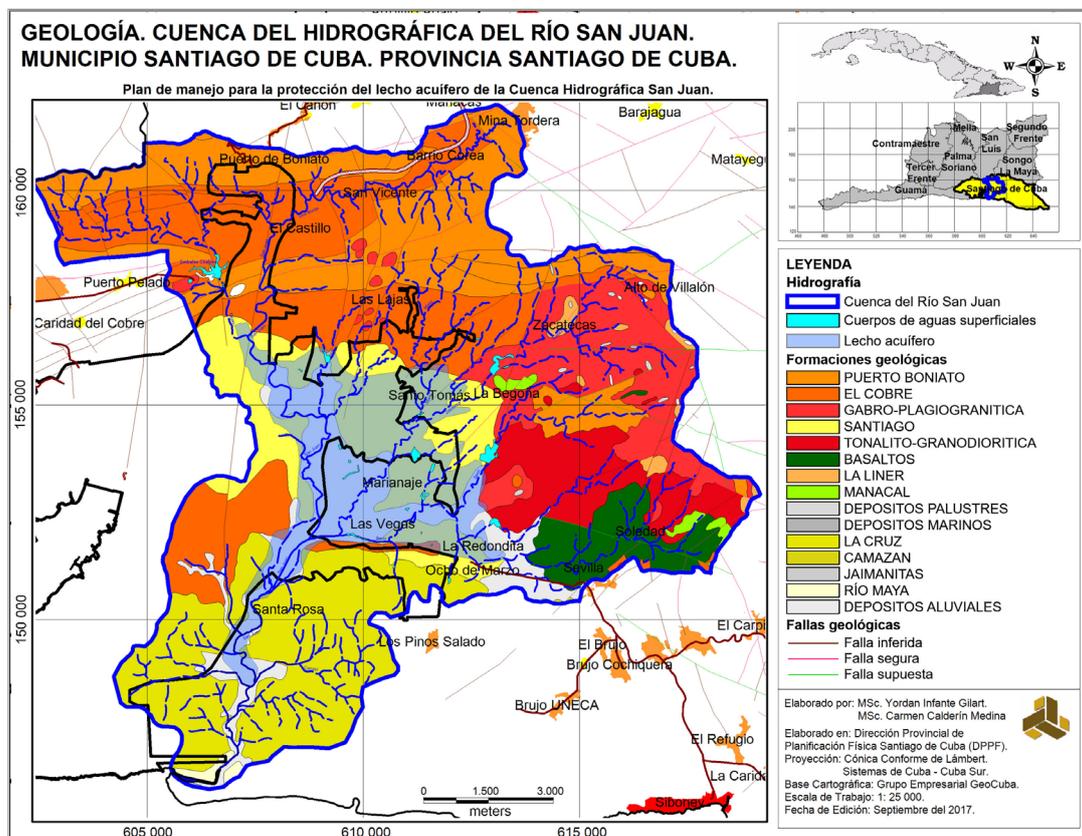
La formación La Cruz está compuesta por aleurolitas, areniscas y calcarenitas con intercalaciones de calizas órgano-detríticas y margas. Se ubica en la parte baja de la cuenca.

La formación Río Maya está compuesta por calizas coralinas duras, recristalizadas, intensamente calcificadas de colores entre blanco, amarillento y rosáceo con manchas de intemperismo de color rojizo. Se ubica en la desembocadura de la cuenca.

El miembro Santiago se desarrolla muy localmente en la provincia de Santiago de Cuba; son depósitos regresivos compuestos por argilitas calcáreas, limoso-arenáceas plásticas con interestratificaciones de aleurolitas polimícticas areno-arcillosas que contienen *Ostrea* y otros moluscos y calcilitas laminares y a veces nodulosas.

Las formaciones son de gabro y granodiorita y se extienden desde la parte centro oriental de la cuenca, coincidiendo con la parte de la cuenca media y alta, al igual

Mapa 2. Mapa geológico de la zona de estudio



Fuente: Calderín et al., 2019.

33. Durán, 2017.

34. Calderín et al., 2019.

que las formaciones El Cobre y Puerto Boniato, que se ubican hacia las elevaciones al norte del área de estudio.

El acuífero coincide con formaciones correspondientes a los depósitos aluviales, que se encuentran en la porción baja de la cuenca donde las pendientes poseen valores bajos, lo cual permite que se desarrollen los procesos acumulativos y de infiltración de las aguas superficiales.

En la cuenca hidrográfica San Juan predominan los suelos de tipo pardos sin carbonatos, que representan el 27,5% y los suelos esqueléticos con el 23,2% del área total, ambos distribuidos sobre la superficie media y alta de la cuenca. Aparecen, además, en menor medida, los suelos rendsinas rojas (2,7%) y los ferialítico pardo rojizo (0,04%). En la parte baja de la cuenca, coincidiendo con el lecho del acuífero, predominan los suelos pardos carbonatados (8,9%) y los aluviales (7,06%). Se debe aclarar que existe un 30,6% del área de la cuenca donde no se conoce información sobre los tipos de suelo. El drenaje se considera en un 37,3% bueno, coincidiendo con la parte baja de la cuenca y en un 32,2% moderado en la parte media y alta³⁵.

En la cuenca, el área forestal tiene una buena situación, siendo la parte alta y media de la misma la más forestada, con predominio de los bosques y frutales, con un área de superficie arbórea que representa el 39,2% de total de la cuenca, favoreciendo a la alimentación de los ríos que nutren al acuífero³⁶.

Usos del suelo

El uso del suelo en la cuenca San Juan se presenta en siete categorías: predomina la superficie arbórea con un total de 34,7%, secundada por el área urbanizada que representa el 30%, pastos 20,6%, cultivos 8,4%, instalaciones agro-industriales 0,74%, superficie acuosa 1% y superficies no aptas y ociosas 4,68%.

Dentro de las actividades económicas principales que se manifiestan en la cuenca, predominan las industriales, productivas y agropecuarias, con un total de 185 instalaciones distribuidas en toda el área, de las cuales se identifican 31 fábricas e industrias, 74 empresas agropecuarias, 34 talleres y otras instalaciones de transporte, 14 almacenes y 32 instalaciones con otros usos, siendo la sub-cuenca San Juan la de mayor uso productivo, con un total de 105 instalaciones, de las que

predominan 18 fábricas e industrias (alimentarias, carpinterías, plantas de asfalto) y 31 empresas agropecuarias (agrícolas, pecuarias, porcinas). También se puede plantear que se declaran once focos principales de vertimiento de residuales, producto de los asentamientos Aguadores, 30 de noviembre, Santa Rosa, El Sitio, Reparto Abel Santamaría, Cuabitas, Dos Bocas, San Vicente y del hospital clínico-quirúrgico Juan Bruno Zayas, el parque zoológico y la cárcel de Boniato³⁷. Estas instalaciones y asentamientos se encuentran ubicadas en gran representatividad sobre el lecho del acuífero, realizando el vertimiento libre sin tratamiento previo (Mapa 3).

Mapa de vulnerabilidad hidrogeológica

Se utilizó el método GOD para caracterizar la vulnerabilidad de los acuíferos en la zona de estudio. Para la obtención de los valores de vulnerabilidad en cada una de las capas de las que se compone el método, se hizo una revisión del mapa geológico de la zona de estudio³⁸. También se recopilaron los datos de perforación de los pozos para estimar el espesor de la zona no saturada y la profundidad del lecho del acuífero a partir de los informes de Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). Se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG) para integrar la información requerida para la estimación de los valores en cada capa del método GOD.

Las capas vectoriales referentes a cada variable (grado de confinamiento y tipo de roca) han sido puntuadas conforme a los valores establecidos por el método, según las características de la cuenca. El factor G ha sido considerado con el valor máximo ($G = 1,0$) por ser un acuífero libre y, por tanto, la capa resultante (GOD) únicamente representa la multiplicación de los factores o variables O y D, de acuerdo con la ecuación.

En el Mapa 4, se muestran los valores de los factores O y D. El factor O considera las características litológicas y el grado de consolidación del estrato no saturado, que en este caso es un acuífero no consolidado. Para su ponderación se utilizó el mapa geológico de la zona. El factor D considera la distancia al nivel del agua subterránea y en su ponderación se consideraron los datos de profundidad del nivel freático en la zona y los niveles estáticos en los pozos, ofrecidos por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, mostrando valores que fluctúan en un rango de 5 m hasta más de 50 m.

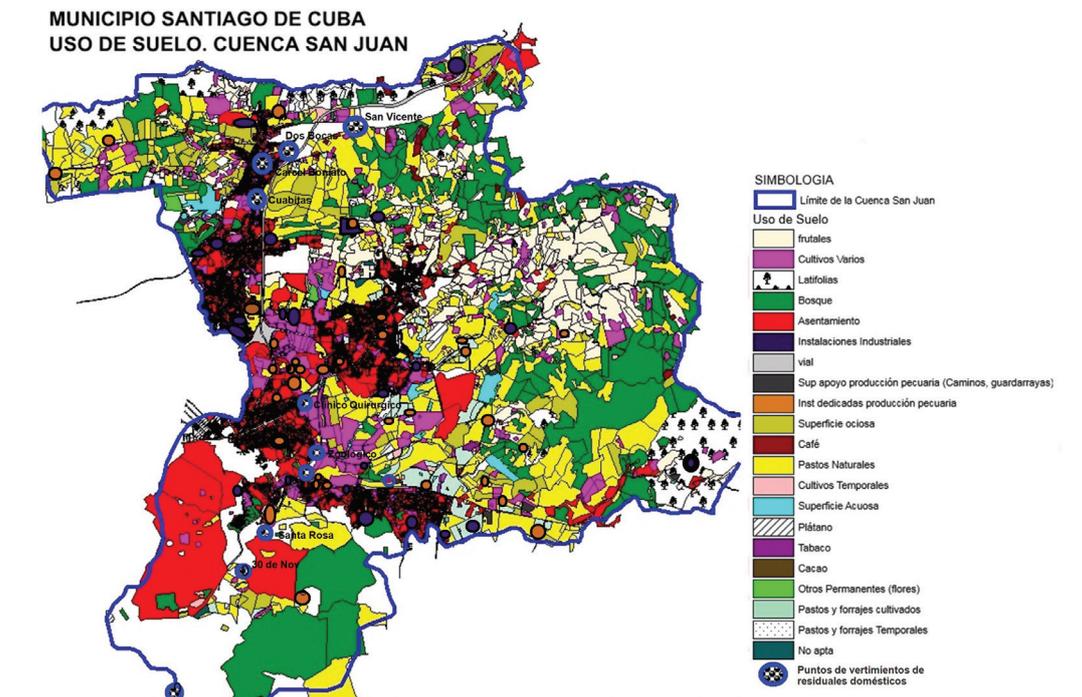
³⁵. Calderín et al., 2019.

³⁶. Calderín et al., 2019.

³⁷. Calderín et al., 2019.

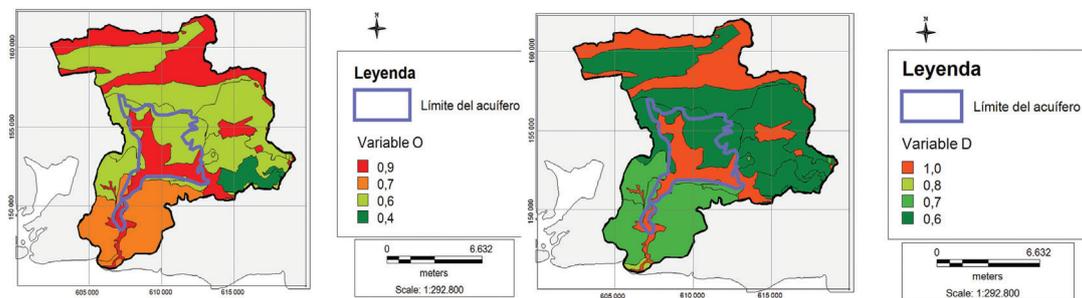
³⁸. Calderín et al., 2019.

Mapa 3. Mapa de uso del suelo en la zona de estudio



Fuente: Calderín et al., 2019.

Mapa 4. Mapa de puntuación de las variables tipo de litología (O) y profundidad del nivel freático (D)



Fuente: elaboración propia.

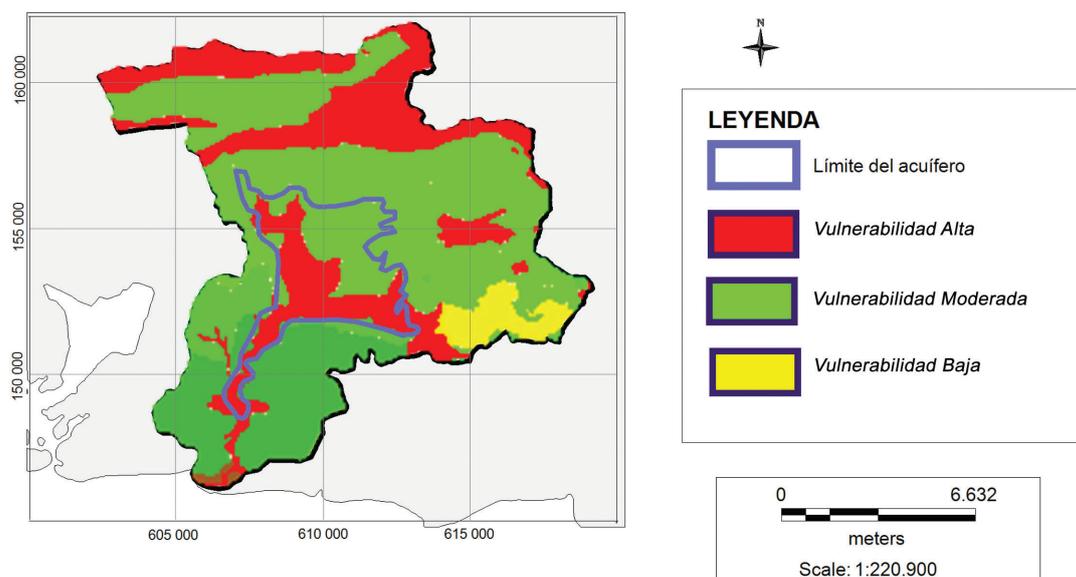
En el Mapa 5 de las vulnerabilidades hidrogeológicas se muestran las zonas vulnerables de la cuenca, en las cuales es factible que los vertidos de residuales puedan contaminar el agua subterránea. Asimismo, la cuenca en general muestra una vulnerabilidad en un 50% moderada, lo que representan 68,9 km² distribuidos en la parte norte y central de la misma, representada por las rocas andesíticas, tanto efusivas como volcánicas sedimentarias, aglomeradas, tobas en todas sus combinaciones y por argilitas calcáreas, limoso-arenáceas plásticas con interestratificaciones de aleurolitas polimícticas areno-arcillosas.

Encontramos que solamente un 4% (5,7 km²) del área de la cuenca presenta una vulnerabilidad baja, poco significativa, en la zona este de la misma, donde predomina la litología de basaltos.

El 46% del área de la cuenca presenta vulnerabilidad alta, distribuida un 30% en fragmentos de la parte alta de la cuenca, con una geología de alternancia de calizas y en la parte centro y baja con depósitos aluviales, representando un área de 40,6 km² y un 16% que se ubica en la desembocadura de la cuenca, con una geología de calizas biodetríticas, carsificadas y calizas, calcarenitas y margas, conglomerados y areniscas, para un área de 22,8 km². Estas dos distribuciones representan un área total de 63,7 km², donde se encuentra el núcleo urbano, con sus actividades que generan una gran carga potencial de contaminantes al lecho del acuífero.

Los resultados al analizar la vulnerabilidad sobre el área del lecho acuífero muestran que está sometido a valores de vulnerabilidad moderada en un 53% y alta en un 47% (que representan 10,5 km²), lo que implica que

Mapa 5. Mapa de vulnerabilidad hidrogeológica en la zona de estudio



Fuente: elaboración propia.

esta zona es muy vulnerable a cualquier contaminación por agentes antrópicos. Esta es un área que debe estar sometida a estricta protección y/o remediación por los tomadores de decisión y el Consejo de Cuencas Hidrográficas Provincial y Nacional.

Determinación de la vulnerabilidad por exposición de sistemas de producción y por exposición de población

Referente a la determinación de la vulnerabilidad por exposición de sistemas de producción es necesario especificar que se consideraron los puntos de vertidos existentes, asentamientos, convenios porcinos, fábricas e industrias y los talleres e industrias de transporte. Para su análisis se realizó un estudio sobre la cantidad existente y el impacto que implican cada uno por sub-cuenca de análisis, para así llegar a un criterio definitivo (Mapa 6A). Se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG) en la geo-referenciación de los datos para el estudio y determinación de las variables pertinentes, empleando los planos que representan la ubicación de los puntos de vertidos, las fábricas e industrias y los convenios porcinos existentes en cada sub-cuenca.

Evidentemente, con los resultados expuestos se demuestra que la sub-cuenca San Juan presenta un alto grado de residuales contaminantes, lo cual genera una vulnerabilidad alta, con la presencia de seis puntos

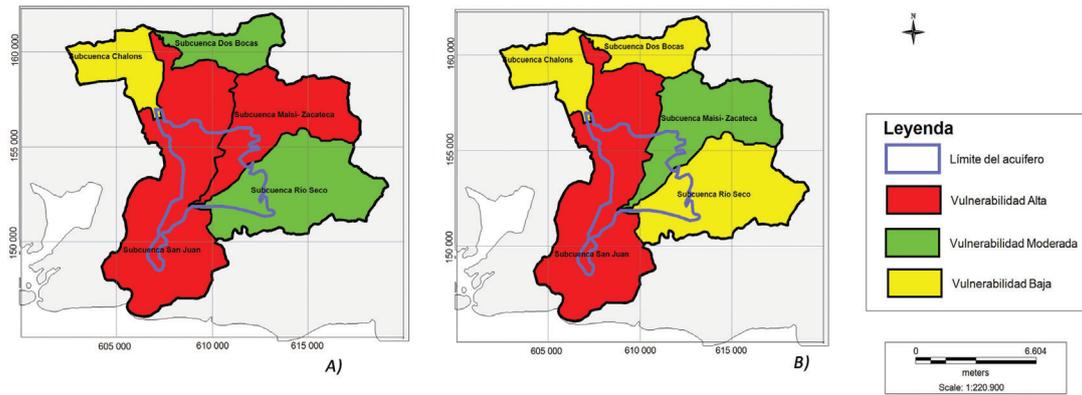
de vertido concentrados en su parte baja, en el lecho acuífero, como es el caso de los residuales domésticos de los repartos 30 de noviembre, El Sitio, Santa Rosa y Abel Santamaría, así como del hospital clínico-quirúrgico Juan Bruno Zayas y el parque Zoológico. También la sub-cuenca Maisí-Zacatecas presenta vulnerabilidad alta, aclarando que ambas ocupan alrededor del 77% del área del lecho acuífero. Por lo cual se demuestra que el acuífero en esta área tiene una carga alta de contaminantes y existe vulnerabilidad hidrogeológica muy alta.

Para la determinación de la vulnerabilidad por exposición de población, se consideró el nivel poblacional existente en cada sub-cuenca, relacionándolo con el porcentaje de área ocupada en cada caso, considerando los criterios expuestos en la metodología (Mapa 6B). Se pudo determinar que la de San Juan representa un 47,8% de zona de amenaza alta para el acuífero y la de Maisí-Zacatecas, un 10,5% de amenaza moderada para el acuífero, zonas ubicadas en el lecho acuífero.

Determinación de la vulnerabilidad por fragilidad ambiental

En el cálculo de la vulnerabilidad por fragilidad ambiental, se analizaron los conflictos por uso del suelo, el nivel de deforestación y el impacto estimado del cambio climático en esta zona, enfatizando cada uno de ellos dentro de cada sub-cuenca.

Mapa 6. Mapa de vulnerabilidad por exposición de sistemas de producción (A) y por población (B)



Fuente: elaboración propia.

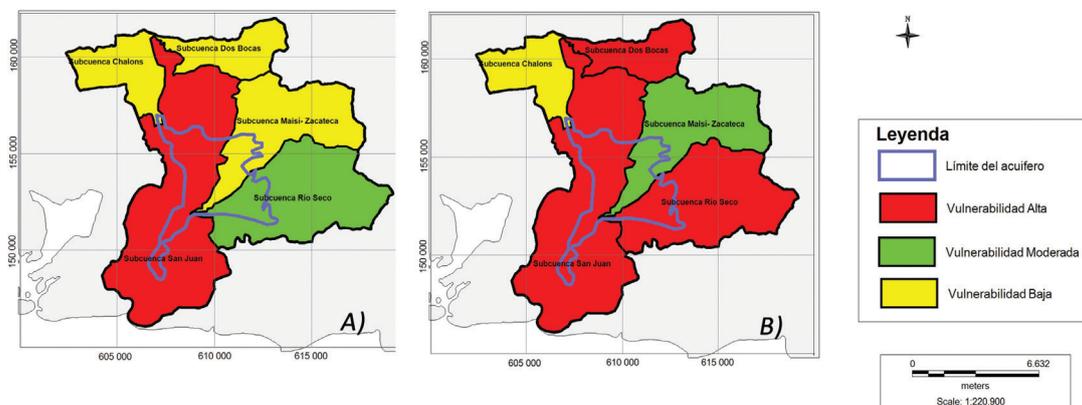
En el análisis del uso del suelo en toda la cuenca, se pudo determinar que existe un área de 45,1 km² (32,7%) de conflicto de usos, fundamentalmente por áreas urbanas y su vertido de residuales, cultivos varios, instalaciones industriales, áreas deportivas y recreativas, donde la sub-cuenca San Juan es la de mayor área de representación de conflictos con el 50,5% para una vulnerabilidad alta, la de Río Seco con 21,8% con vulnerabilidad moderada, la de Maisí-Zacatecas con 18,9% y vulnerabilidad baja, según el mapa de vulnerabilidad por conflicto de uso del suelo (Mapa 7A).

Analizando la influencia de los conflictos de usos del suelo en el área del acuífero, estos se manifiestan en un área de 18,9 km², lo que representa el 91,2% del área del acuífero.

Asimismo, en el análisis del impacto estimado del cambio climático en la cuenca hidrográfica se pudo obtener, según informe³⁹, que los desequilibrios en la zona por déficit de lluvia han provocado como factor más incidente la pérdida del suelo. En función de un estudio de vulnerabilidad de esta variable se realizó el mapa de vulnerabilidades (Mapa 7B), el cual muestra que las sub-cuencas más afectadas son San Juan, Dos Bocas y Río Seco con vulnerabilidad alta y Maisí-Zacatecas con vulnerabilidad moderada.

En cuanto a la vulnerabilidad por deforestación, esta es la variable que provoca mayores impactos, ya que se declaran en vulnerabilidad alta las sub-cuencas Dos Bocas, con un 44,6% de área deforestada, Río Seco con 29,1%, San Juan con 20,1% y Maisí-Zacatecas con el 17,1%, con vulnerabilidad moderada.

Mapa 7. Mapa de vulnerabilidad por conflicto de uso del suelo (A) y por pérdida del suelo y por nivel de deforestación (B)



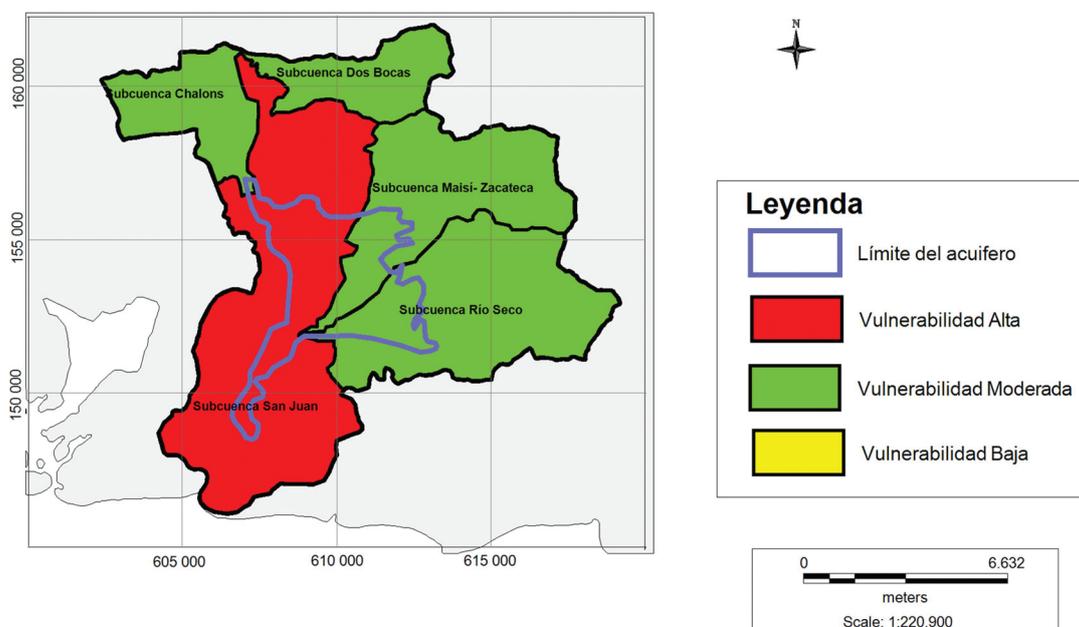
Fuente: elaboración propia.

³⁹ Calderín et al., 2019.

Como resultados significativos después de la determinación de estas variables se puede hacer referencia a que la sub-cuenca de mayor vulnerabilidad por fragili-

dad ambiental es San Juan, debido a que presenta grandes impactos en las tres variables analizadas, poniendo en riesgo el lecho acuífero (Mapa 8).

Mapa 8. Mapa de vulnerabilidad por fragilidad ambiental



Fuente: elaboración propia.

Determinación de la vulnerabilidad global

Al realizar el análisis de cada variable y obtener la vulnerabilidad global de la cuenca hidrográfica San Juan, la cual se pueden observar en el Mapa 9.

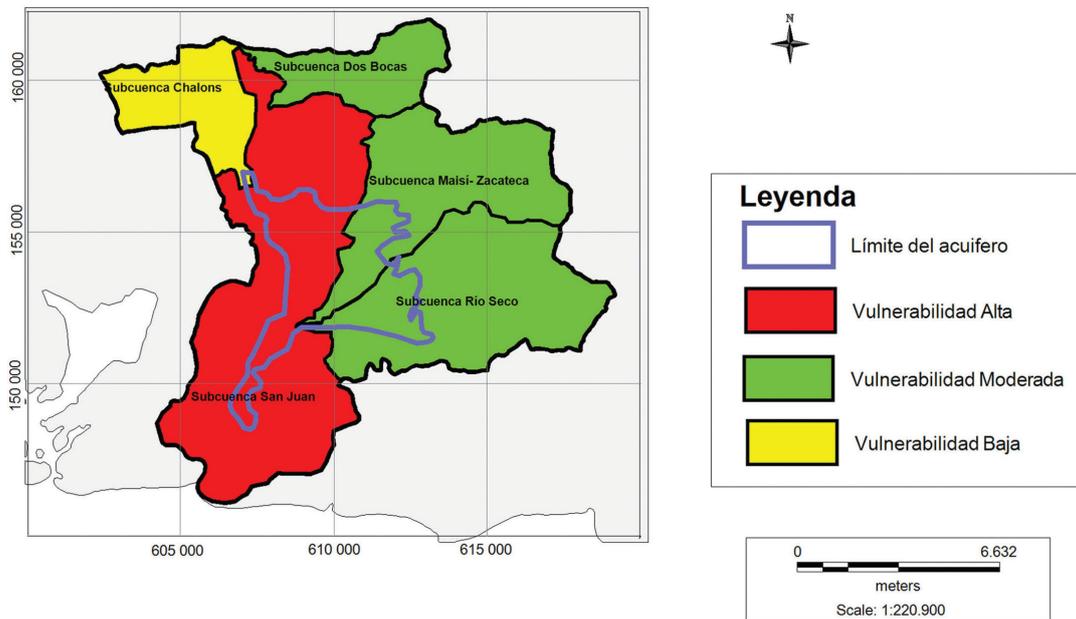
Se obtuvo como resultado final del estudio, que la sub-cuenca Chalóns presenta vulnerabilidad baja, las de Dos Bocas, Malsi-Zacateca y Río Seco moderada, siendo la San Juan la cual aparece como alta, lo que demuestra que el 50,5% que representa (11,26 km²) del área acuífera, se encuentra sometido a vulnerabilidad alta y el 49,5% (11,04 km²) a moderada. Es evidente que el acuífero se encuentra expuesto a una contaminación alta y moderada.

Argumentando este resultado, se puede resaltar que entre las dificultades detectadas se encuentran: el conflicto que existe entre los distintos usos del suelo en la cuenca, fundamentalmente en el lecho acuífero y en la sub-cuenca San Juan. Entre los principales conflictos que se generan del uso del suelo, se pueden plantear el uso desordenado del área para asentamiento poblacional, la cual ocupa casi el 50% del área

de dicha sub-cuenca. Además, se ubican en esta área seis puntos de vertido de aguas residuales, los cuales derraman directo al suelo sin sistemas de tratamientos, lo que incrementa la contaminación del acuífero. La circunstancia de que haya industrias y fábricas instaladas en el mismo lecho del acuífero junto a la urbanización implica un alto porcentaje de área pavimentada que reduce la recarga del acuífero. Por lo tanto, el acuífero en esta zona es muy vulnerable a la contaminación, lo que indudablemente está afectando a la calidad de sus aguas.

Es evidente que las dificultades que están produciendo escenarios de vulnerabilidad alta y moderada para el acuífero son consecuencia de las políticas de gestión erradas que se están aplicando en la cuenca, por lo que se necesita una toma de decisiones de inmediato, para acometer acciones y lograr buenas prácticas de gestión integrada. En función de estas dificultades, este trabajo aporta una herramienta que permite monitorear y tomar decisiones puntuales ante un escenario sumamente complicado como el de contaminación de un acuífero, y que puede agravarse aún más por los efectos del cambio ambiental global.

Mapa 9. Mapa de vulnerabilidad global



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

El acuífero está sometido a vulnerabilidad alta y moderada, lo que implica que esta zona es muy sensible a la contaminación, donde las variables de mayor incidencia son: sistemas de producción, conflictos en el uso del suelo y pérdida del suelo, siendo el área acuífera la zona de mayor conflicto de usos, con un crecimiento urbano desordenado, usos de contaminantes potenciales, como vertido de residuales domésticos, hospitalarios, industriales y agropecuarios sin previo tratamiento, lo que demuestra que el uso del suelo tiene una influencia negativa en la calidad de las aguas del acuífero.

Se demostró la utilidad de la metodología para la determinación de las afectaciones del uso del suelo al acuífero San Juan, ofreciendo el mapa de sus vulnerabilidades con las variables de mayor incidencia, lo que aporta una herramienta soportada en un SIG para la planificación, monitoreo y toma de decisión en el Plan de Gestión Integrada de esta cuenca hidrográfica, en función de la protección del acuífero.

Se validó que la metodología puede ser aplicada sin dificultad, que ofrece resultados coherentes y que la retroalimentación y simplicidad del proceso permite su adaptabilidad a otras zonas geográficas, en especial en América Latina.

BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón Borges, R. Y., Durán Silveira, M. T., García Tejera, R. y Pérez Montero, O. 2019: "Paradigmas jurídicos sobre gestión integrada de cuencas hidrográficas: Desafíos a partir del caso del río San Juan, Santiago de Cuba". *Revista Voluntad Hidráulica*, 84 (201), 241-257.
- Albornoz Euán, B. S. I. y González Herrera, R. A. 2017: "Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero yucateco bajo escenarios de cambio climático". *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4 (11), 275-286. <http://dx.doi.org/10.19136/era.a4n11.1037>
- Alfaro Jiménez, K. 2018: "Zonificación del conflicto de uso de la tierra en las áreas de protección de la red de drenajes de la cuenca del río Páez, Cartago, Costa Rica". *Geográfica de América Central*, 4 (61E), 81-99. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.61-4.4>
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J., Petty, R. & Hackett, G. 1987: *DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*. U.S. EPA /600/2-87-036: 1-455. Oklahoma (EE.UU.).
- Auge, M. 2007: *Vulnerabilidad de Acuíferos*. Buenos Aires (República Argentina), Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- Bayón Martínez, P. y Padilla y Sotelo, L. S. 2020: "Visión geográfica de la percepción de riesgos por peligros hidrometeorológicos extremos en Cuba". *Revista Geográfica de América Central*, 1 (64), 151-178. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.64-1.6>

- Calderín Medina, C., Salas Díaz, A., Ramírez Mogena, G., Durand Silveira, M. T. e Infante Gilart, Y.** 2019: *Propuesta de un plan de acción preliminar para la preservación del lecho acuífero Cuenca Hidrográfica San Juan. Santiago de Cuba.* Reporte técnico. Santiago de Cuba (Cuba), Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos.
- Civita, M.** 1994: *Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento.* Teoria & pratica (Aquifer vulnerability maps to pollution) (in Italian). Pitagora, Bologna (Italia).
- Doerfliger, N., Jeannin, P. Y. y Zwahlen, F.** 1999: "Water Vulnerability Assessment in Karst Environments: A New Method of Defining Protection Areas Using Multi-Attribute Approach and GIS Tool (EPIK Method)". *Environmental Geology*, 39, 165-172. <http://dx.doi.org/10.1007/s002540050446>
- Durán Silveira, M. T.** 2017: "Actualización del potencial hídrico de la provincia de Santiago de Cuba". *Revista Voluntad Hidráulica*, (121), 4-12.
- Foster, S. S. D.** 1987: "Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution, risk and protection strategy". *Researching Proceeding and Information*, (38), 69-86.
- García Galván, M. y Herrera Tapia, F.** 2019: "La Cuenca Hidrosocial Presa Huapango, México: Un análisis de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y la gobernanza en cuerpos de agua compartidos". *Agua y Territorio*, (14), 69-84. <http://dx.doi.org/10.17561/at.14.4639>
- Gárfias, J., Llanos, H., Franco, R. y Martel, R.** 2017: "Estimación de la vulnerabilidad del acuífero del valle de Toluca mediante la combinación de un método paramétrico y el transporte advectivo". *Boletín Geológico y Minero*, 128 (1), 25-42. <http://dx.doi.org/10.21701/bolgeomin.128.1.002>
- Gómez Cruz, A., Madrigal Solís, H., Núñez Solís, C., Calderón Sánchez, H. y Jiménez Gavilán, P.** 2019: "Vulnerabilidad hidrogeológica en la zona costera de Jacó, Pacífico Central, Costa Rica". *Revista Geográfica de América Central*, 2 (63), 141-163. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.63-2.5>
- Hall, D. M. y Steiner, R.** 2020: "Policy content analysis: Qualitative method for analyzing sub-national insect pollinator legislation". *MethodsX Scientific Journal*, 93, 118-128. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100787>
- Murillo Licea, D.** 2019: "Territorialidades indígenas y agua, más allá de las cuencas hidrográficas". *Agua y Territorio*, (14), 33-44. <http://dx.doi.org/10.17561/at.14.4509>
- Olivares Campos, B. O., López Beltrán, M. A. y Lobo Luján, D.** 2019: "Cambios de usos de suelo y vegetación en la comunidad agraria Kashaama, Anzoátegui, Venezuela: 2001-2013". *Revista Geográfica de América Central*, 2 (63), 269-291. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.63-2.10>
- Peña Cortés, F, Pincheira Ulbrich, J., Escalona Ulloa, M. y Rebolledo, G.** 2011: "Cambio de uso del suelo en los geosistemas de la cuenca costera del río Boroa (Chile) entre 1994 y 2004". *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 2, 1-20.
- Rizo Decelis, L. D.** 2017: *Consideraciones sobre la calidad del agua del río Santiago (México) y cartografía de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos de su cuenca para una adecuada gestión y planificación hidrológica*, tesis doctoral. Málaga (España), Universidad de Málaga.
- Yael Daga, D., Zulaica, L. y Vazquez, P.** 2020: "El periurbano de Mar del Plata (Argentina): clasificación digital de los usos del suelo y análisis de las transformaciones en el cinturón hortícola". *Revista Geográfica de América Central*, 2 (65), 175-205. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.65-2.7>
- Valcarce Ortega, R. M., Vega Carreño, M., Rodríguez Miranda, W. y Suarez González, O.** 2020: "Vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas en la cuenca Almendares-Vento". *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 41 (2), 33-47.
- Van Stempvoort, D., Evert, L. & Wassenaar, L.** 1993: "Aquifer vulnerability index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping". *Canadian Water Resources Journal*, 18 (1), 25-37. <https://doi.org/10.4296/cwrj1801025>
- Vera Rodríguez, J. M. y Albarracín Calderón, A. P.** 2017: "Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas". *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27 (2), 109-136. <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2309>