

## Aplicación de parámetros geoelectrónicos en el estudio de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas

### Application of geoelectric parameters in the study of vulnerability for groundwater contamination

Rosa María Valcarce-Ortega<sup>1\*</sup>, Willy Roberto Rodríguez-Miranda<sup>1</sup>, Zaida Jorge-Díaz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.

\*Autor para la correspondencia: [rosy@tesla.cujae.edu.cu](mailto:rosy@tesla.cujae.edu.cu)

#### Resumen

En Cuba las aguas subterráneas representan el 33% de los recursos hídricos disponibles; sin embargo, estos recursos se encuentran amenazados por la sobreexplotación y sufren degradación debido al impacto de actividades antrópicas. El acuífero Arenas Algabaes es una potencial fuente de abasto a la ciudad de Trinidad, Cuba. En el presente artículo se evalúa la vulnerabilidad a la contaminación de este acuífero a partir de la cartografía de la conductancia longitudinal de la zona no saturada. El mapa obtenido permite identificar zonas desde muy baja vulnerabilidad, con valores de conductancia longitudinal mayores de 0,3 Siemens, hasta zonas de muy alta vulnerabilidad con valores de conductancia longitudinal menores de 0,06 Siemens. El desarrollo de estos mapas contribuye a la planificación responsable del uso del suelo y a establecer estrategias para la protección de las aguas subterráneas.

**Palabras clave:** agua subterránea; vulnerabilidad; conductancia longitudinal; método AVI.

#### Abstract

In Cuba, groundwater represents 33 % of the available water resources; however, these resources are threatened by overexploitation and suffer degradation due to the impact of anthropic activities. The Arenas Algabaes aquifer is a potential source of supply to Trinidad city in Cuba. Vulnerability

to contamination of this aquifer is evaluated in this article from the mapping of longitudinal conductance of the unsaturated zone. The map obtained allows us to identify areas from very low vulnerability, with longitudinal conductance values greater than 0,3 Siemens, to areas of very high vulnerability with longitudinal conductance values less than 0,06 Siemens. Developing these maps is a contribution to responsible planning of land use and to establish strategies for protecting groundwater.

**Keywords:** groundwater; vulnerability; longitudinal conductance; AVI method.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas son un elemento esencial del ciclo hidrológico y una de las principales fuentes para satisfacer las necesidades de abasto a la población y del desarrollo de las actividades socio económicas. Se estima que las aguas subterráneas abastecen de agua potable, al menos, al 50 % de la población mundial, y representan el 43 % de toda el agua utilizada para el riego (WWDR 2018).

El 20 % de los acuíferos mundiales está siendo sobreexplotado, lo que en muchos casos ya tiene graves consecuencias, como el hundimiento de los suelos y la intrusión salina. Otra problemática, no menos importante, es el deterioro creciente de la calidad del agua con impactos perjudiciales en la salud humana y los ecosistemas, debido al vertido de aguas residuales industriales y domésticas que se liberan al medio ambiente sin ningún tratamiento previo.

La situación descrita necesita de investigaciones que aporten la información suficiente para implementar acertadas políticas dirigidas a la protección de las aguas subterráneas. En tal sentido, el desarrollo de métodos para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos cobra cada vez mayor importancia a nivel mundial (Abdullah *et al.* 2016; Luoma, Okkonen y Korkka 2017; Zhang *et al.* 2018; Obiora y Ibuot 2019).

En Cuba, los recursos hídricos disponibles se estiman en 13 650 millones de metros cúbicos, de los cuales el 33 % (4 490 millones de m<sup>3</sup>) proviene de fuentes subterráneas, evidenciando la importancia de este recurso para el desarrollo socio económico del país (García y Gutiérrez 2015). Por otro lado, el bajo índice de recursos hidráulicos disponibles por habitante al año para todos los usos (1 200 m<sup>3</sup>/habitante/año) ubican a Cuba en la categoría de países con elevada intensidad en la presión sobre sus recursos hídricos, con situación de escasez (Díaz 2018).

García y Gutiérrez (2015) señalan que el insuficiente número de alcantarillado en comunidades, ciudades y pueblos, la existencia de industrias sin el tratamiento adecuado de sus residuales, provocan en Cuba que el caudal y la carga contaminante de las aguas residuales que ingresa a las aguas terrestres comprometen su uso. A lo anterior se unen los incrementos de los niveles de sales solubles de las aguas subterráneas por la intrusión salina presente en importantes acuíferos cársticos costeros.

Según Díaz (2018) "la combinación de los factores naturales y antrópicos que inciden en los recursos hídricos de Cuba, así como el agravamiento de sus impactos como consecuencia del cambio climático, ponen de manifiesto que el tema agua es un elemento determinante en el modelo cubano de sostenibilidad". Como factores naturales identifica el carácter insular del país, la disposición y estructura del relieve, la extensión del carso, el predominio de ríos de pequeña longitud y cuencas hidrográficas de poca extensión, así como la ubicación de los principales acuíferos en las zonas costeras con la amenaza permanente de la intrusión salina.

Por todo lo anterior, los estudios de vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas adquieren en Cuba cada vez mayor relevancia. Son varios los investigadores que han elaborado mapas de vulnerabilidad a la contaminación de los principales acuíferos cubanos, lo que se demuestra en los resultados publicados (Valcarce y Jiménez 2016; Blanco, Brown y Márquez 2018; Vázquez, Farfán y Guanche 2019; Suárez *et al.* 2019). Actualmente, el Proyecto Nacional "Elaboración del Mapa Hidrogeológico de Cuba a Escala 1: 100 000" planifica incluir el estudio de la vulnerabilidad intrínseca de las formaciones acuíferas.

La ciudad de Trinidad, ubicada en la provincia de Sancti Spíritus, Cuba, demanda volúmenes de agua potable cada vez mayores para satisfacer las necesidades de su población y de su acelerado desarrollo turístico. Sin embargo, las fuentes de abasto de agua a la ciudad de Trinidad se encuentran deprimidas y amenazadas por la intrusión salina, lo que obliga a buscar nuevas fuentes que garanticen el gasto requerido para el correcto desarrollo socio económico en los próximos años. Es por ello que se han desarrollado diferentes investigaciones hidrogeológicas en búsqueda de soluciones que permitan ampliar las fuentes de abasto, y en este sentido San Román (2019) y Jiménez y Rodríguez (2013) demuestran que el acuífero ubicado en los sedimentos aluviales próximos al poblado Algaba, puede proporcionar el volumen de agua que demanda la ciudad de Trinidad. Ahora se requiere evaluar la vulnerabilidad de este acuífero aluvial, ante el impacto de actividades antrópicas que puedan degradar la calidad de sus aguas.

A partir de estos antecedentes se plantea como objetivo del presente artículo, evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas del acuífero aluvial Arenas Algaba, empleando la conductancia eléctrica longitudinal (S) de las formaciones geológicas no saturadas.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

El término "vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación" apareció por vez primera en la década del 60 del pasado siglo, refiriéndose a la mayor o menor protección que ofrece el medio físico al agua subterránea contra las actividades antrópicas susceptibles de contaminar (Margat 1968). Desde entonces se han sucedido numerosas definiciones que aparecen resumidas en los trabajos de Aguilar y otros investigadores (2013) donde se recogen definiciones de diferentes investigadores, pero, en esencia, todas hacen referencia a los procesos de atenuación natural que pueden estar presentes en la zona no saturada, y a las características del medio físico que pueden facilitar la migración de los contaminantes hasta alcanzar el agua subterránea.

Partiendo de estos supuestos se han desarrollado y aplicado diferentes métodos para evaluar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los acuíferos. Cada método tiene sus ventajas y desventajas, y ninguno puede ser considerado el mejor para todas las situaciones, el uso de unos u otros depende de la información disponible y de las características hidrogeológicas del área de estudio.

La mayor parte de las estrategias de evaluación de la vulnerabilidad están basadas en Métodos Paramétricos de Rangos Ponderados, debido a restricciones en la calidad y disponibilidad de datos necesarios para desarrollar métodos determinísticos y estadísticos que permitan formular matemáticamente el proceso.

Los Métodos Paramétricos de Rangos Ponderados se basan en la selección de parámetros representativos para evaluar la vulnerabilidad del agua subterránea en cada celda o polígono en que se subdivide el área de estudio. Cada uno de estos parámetros tiene un rango de variación que se divide en intervalos jerárquicos discretos y a cada intervalo se asigna un valor que refleja el grado de sensibilidad del acuífero a la contaminación. A cada parámetro se asigna también un factor de peso que expresa su importancia en el análisis. Para obtener el valor numérico final que refleja la vulnerabilidad de cada celda o polígono en el área de estudio, se suman los rangos de cada parámetro multiplicados por el peso asignado.

Algunos de los Métodos Paramétricos de Rangos Ponderados más empleados a nivel internacional son DRASTIC, GOD, AVI, SINTACS, EPIK, RISK, PaPRIKa, COP, LEPT, GALDIT, según refieren algunas investigaciones (Aguilar *et al.* 2013 y Zhang *et al.* 2018).

### **2.1. Método AVI y poder resolutivo de la conductancia longitudinal en el estudio de la vulnerabilidad de acuíferos**

El método AVI (*Aquifer Vulnerability Index*) desarrollado por Stempvoort, Ewert y Wassenaar (1993) está basado en dos parámetros fundamentales: espesor de cada capa que sobreyace al acuífero, y conductividad hidráulica de cada una de estas capas. A partir de estos parámetros se realiza el cálculo de la resistencia hidráulica de la zona no saturada según:

$$C = \sum_{i=1}^n d_i K_i \quad (1)$$

donde:

C: resistencia hidráulica de la zona no saturada, expresada en días (d).

$d_i$ : espesor de cada capa que sobreyace al acuífero, expresado en metros (m).

$K_i$ : conductividad hidráulica de cada capa que sobreyace al acuífero, expresada en m/d.

El cálculo de C, o el logaritmo de C, es usado para generar mapas de resistencia hidráulica de la zona no saturada. Este parámetro se subdivide en rangos y a cada rango se asigna una clase de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del agua subterránea, ya sea extremadamente alta, alta, moderada, baja o extremadamente baja.

La determinación de la conductividad hidráulica de cada una de las capas que sobreyacen al acuífero es un parámetro de difícil determinación, lo que dificulta la aplicación de este método. En cortes intergranulares la resistencia hidráulica es función del contenido de arcilla (a mayor arcillosidad mayor resistencia hidráulica) y esta influye decisivamente en la resistividad eléctrica de los sedimentos granulares (a mayor arcillosidad menor resistencia eléctrica), por lo que Kalinski y demás colaboradores (1993) proponen como alternativa sustituir la resistencia hidráulica por la resistencia eléctrica, la que puede determinarse de forma relativamente fácil aplicando métodos de prospección geoelectrica.

En esencia, proponen el cálculo del segundo parámetro de Dar Zarrouk, o sea, de la conductancia eléctrica longitudinal unitaria, de forma que la

vulnerabilidad total se puede calcular a partir de la suma de la conductancia longitudinal de cada una de las capas suprayacentes al acuífero. Entonces, la conductancia eléctrica longitudinal de la zona no saturada se calcula como:

$$S = \sum_{Z=0}^{Z=WT} \frac{h_i}{\rho_i} \quad (2)$$

donde:

S: conductancia eléctrica longitudinal expresada en Siemens (S)

$h_i$ : espesor de cada capa que se encuentra desde la superficie hasta el nivel freático expresada en metros (m).

$\rho_i$ : resistividad eléctrica de las capas que se encuentran entre la superficie y el nivel freático (ohm-m).

En la literatura se reportan importantes estudios de vulnerabilidad de los acuíferos empleando la conductancia longitudinal de la zona no saturada, demostrando la eficiencia del método (de Oliveira *et al.* 2018; Chukwuma *et al.* 2015; Sendros 2016; Mosuro *et al.* 2017; Aweto y Ohwohere 2018; Obiora y Ibout 2019).

En Cuba se reportan las investigaciones de García, Sacasas y Díaz (2018) quienes evaluaron la vulnerabilidad a la contaminación de los horizontes acuíferos del sur de la provincia Pinar del Río, basándose en la conductancia eléctrica longitudinal de las capas superficiales, a partir de los indicadores deducidos por Kalinski.

## 2.2. Características del área de estudio

El acuífero Arenas Algaba se encuentra ubicado en la vertiente sur del macizo montañoso Guamuhaya, en el valle del río Agabama, a 2 km al este de la localidad de Condado y 28 km al noreste de la ciudad de Trinidad (Figura 1).

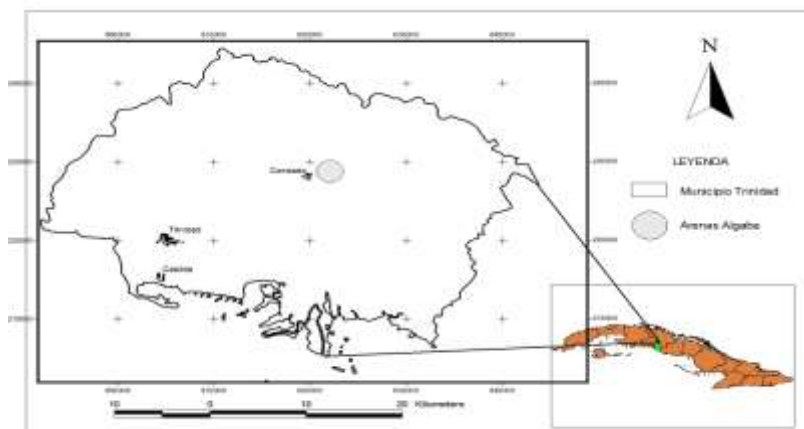


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

La composición geológica de la región se presenta en la Figura 2, destacándose que las principales formaciones geológicas en el área de estudio son:

Formación Condado ( $P_2^3 - P_3^1$  cd): Compuesta por areniscas, limolitas y conglomerados polimícticos, margas y calizas biodetríticas. Es la formación que bordea y contiene a los sedimentos aluviales que forman el reservorio en el área estudiada. Predomina en el área y contacta con los sedimentos aluviales a través de la argilita que constituye el sello del acuífero.

Depósitos Aluviales ( $Q_2$  al): Compuestos por limos, limos arenosos, arcillas arenosas con intercalaciones de gravas. Constituyen el reservorio acuífero propiamente dicho. Se presentan también de forma irregular y frecuente en la parte superior del corte.

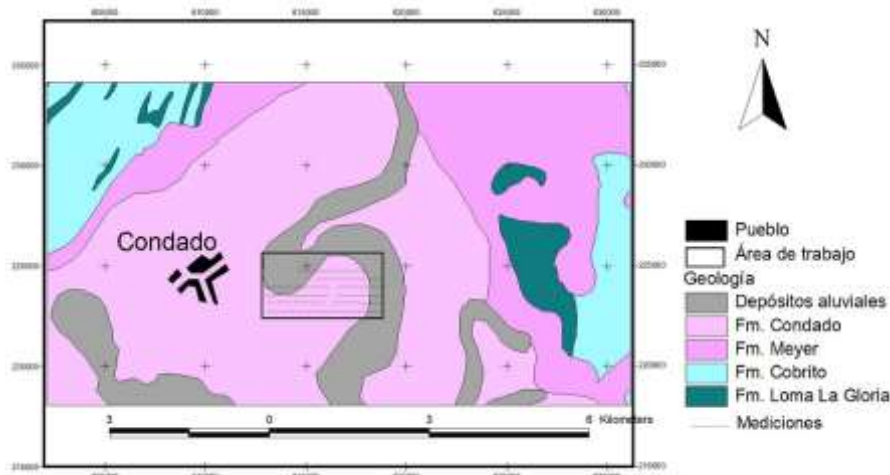


Figura 2. Mapa geológico del área de estudio (modificado de IGP 2016).

### 2.3. Método aplicado para evaluar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero

La tomografía eléctrica es una variante de los métodos de prospección geoelectrica que permite cartografiar la resistividad eléctrica del corte geológico empleando gran número de electrodos, separados a igual distancia unos de otros. El procesamiento e interpretación de estas mediciones brinda una sección bidimensional (distancia–profundidad) con la distribución de la resistividad eléctrica real del corte geológico.

Trabajos anteriores en el área de estudio permitieron disponer de siete perfiles de tomografía eléctrica que utilizaron la configuración Wenner–Schlumberger, con abertura entre electrodos de 5 m, distancia entre puntos de medición 50 m y distancia entre perfiles 150 m. La longitud de los perfiles estuvo entre 1 839 m y 2 069 m. La profundidad de investigación alcanzada fue de 50 m (San Román 2019; Jiménez y Rodríguez 2013).

A partir de estos perfiles de tomografía eléctrica, la vulnerabilidad del acuífero aluvial Arenas Algaba fue evaluada a través del parámetro geoelectrico conductancia longitudinal. Teniendo en cuenta que en la zona no saturada del acuífero bajo estudio la variabilidad de la resistividad eléctrica es función de la arcillosidad de las formaciones geológicas presentes, es posible afirmar que a mayor arcillosidad, menor resistividad eléctrica, mayor conductancia longitudinal y mayor resistencia hidráulica. Esto permite caracterizar la conductividad hidráulica de la zona no saturada y cartografiar la vulnerabilidad natural del acuífero a la migración vertical de contaminantes (Kalinski *et al.* 1993; Kirsch, Sengpiel y Voss 2003; Obiora y Ibut 2019).

Según Jiménez y Rodríguez (2013), en esta área los materiales aluviales gruesos y permeables presentan valores de resistividad eléctrica mayores de 100 ohm-m, los sedimentos areno-arcillosos tienen resistividad eléctrica entre 40 ohm-m y 100 ohm-m, mientras que los sedimentos de granulometría más fina y las arenas muy arcillosas presentan valores de resistividad eléctrica que oscilan entre 18 y 40 ohm-m, presentándose la arcilla y la argilita con resistividad eléctrica menor de 18 ohm-m. El nivel freático se encuentra aproximadamente a seis metros de profundidad.

En la presente investigación fue analizada estadísticamente la variabilidad de los valores de resistividad eléctrica de la zona no saturada, y fue calculada su conductancia longitudinal a lo largo de cada perfil de tomografía eléctrica hasta una profundidad de 6 m, según la Ecuación 2. Finalmente se estableció la relación entre los rangos de variación de la conductancia longitudinal de la zona no saturada y las clases de vulnerabilidad del acuífero.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

El análisis estadístico de los valores de resistividad eléctrica de la zona no saturada muestra una variación entre 4 ohm-m y 400 ohm-m, con media 80 ohm-m y desviación típica igual a 83 ohm-m. La Figura 3 presenta cómo se distribuyen estos valores. Se aprecia que el 43 % de los valores obtenidos son menores que 40 ohm-m, reflejando la presencia de sedimentos muy arcillosos en la zona no saturada.

A partir del comportamiento de la resistencia eléctrica y la conductancia longitudinal, y atendiendo a su correlación con el grado de arcillosidad y principales litologías presentes en la zona no saturada, se establecieron las clases de vulnerabilidad del acuífero, según se expresa en la Tabla 1.



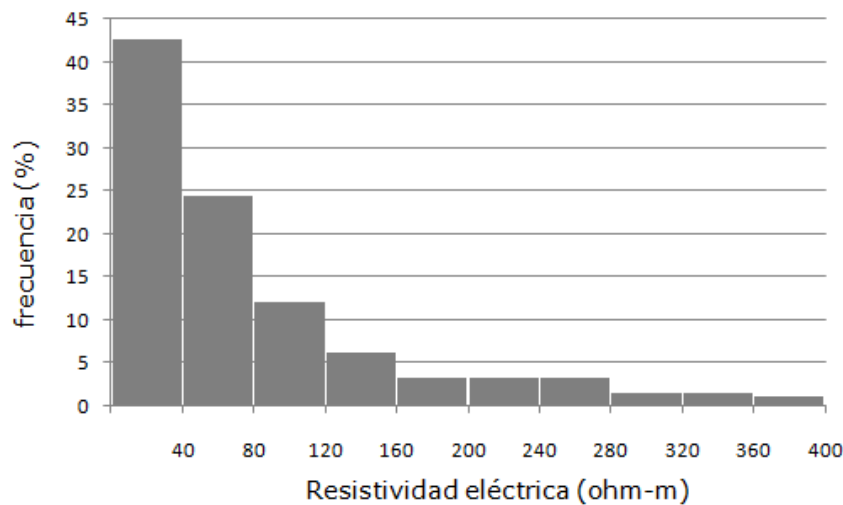


Figura 3. Distribución de los valores de resistividad eléctrica de la zona no saturada.

Tabla 1. Relación entre la conductancia longitudinal de la zona no saturada y las clases de vulnerabilidad del acuífero

<b>Conductancia longitudinal (S)</b>	<b>Clase de vulnerabilidad</b>
menores de 0,06	Muy Alta
0,2 a 0,06	Alta
0,3 a 0,2	Baja
mayores de 0,3	Muy Baja

La Figura 4 muestra el mapa de conductancia longitudinal de la zona no saturada, que fue elaborado interpolando por el método Kriggin los valores de conductancia longitudinal calculados para cada punto de medición. La Figura 5 presenta el mapa de vulnerabilidad obtenido al transformar los rangos de conductancia longitudinal en clases de vulnerabilidad, según los criterios establecidos en la Tabla 1.

En la Figura 4 se evidencia que en la zona oeste predominan altos valores de conductancia longitudinal, reflejando la elevada arcillosidad de estas litologías. Ello indica que las capas que sobreyacen al acuífero en este sector brindan una alta protección a las aguas subterráneas, pues la alta arcillosidad que presentan impone alta resistencia hidráulica a los contaminantes que pudieran migrar verticalmente desde la superficie hasta alcanzar el manto freático.

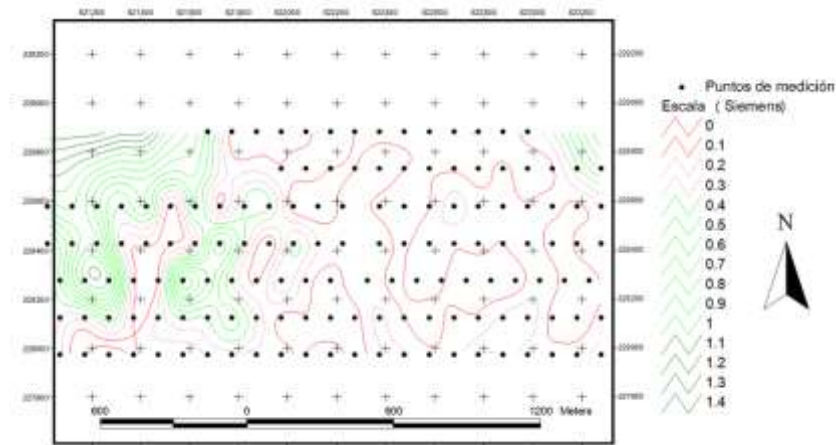


Figura 4. Mapa de conductancia longitudinal de la zona no saturada.

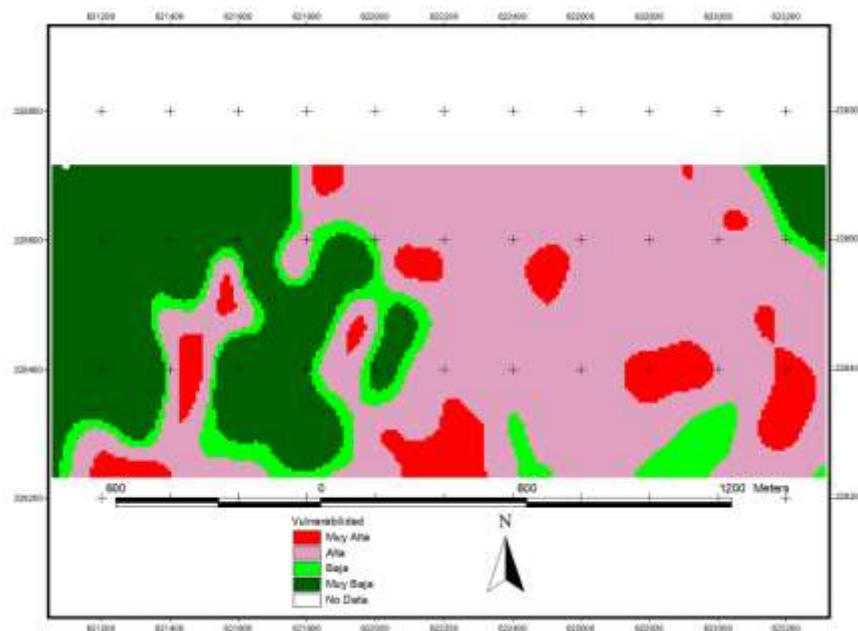


Figura 5. Mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero.

En la zona central y este del área estudiada predominan valores más bajos de conductancia longitudinal, característicos de sedimentos aluviales de granos más gruesos y mayor permeabilidad, así como de areniscas y conglomerados polimícticos de la formación Condado, que ofrecen baja resistencia hidráulica al paso de los fluidos. Se aprecian también que en estas zonas existen algunos sectores con incrementos en los valores de conductancia eléctrica longitudinal, debido a la alternancia de las areniscas con los depósitos aluviales arcillosos de la localidad de Algaba.

El análisis anterior se corrobora en la Figura 5, que muestra el mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero. Las zonas central y este del área estudiada son vulnerables a la mayoría de los contaminantes, los que llegarán rápidamente al acuífero, (excepto los que puedan ser fuertemente absorbidos

o fácilmente transformados). Las zonas ubicadas hacia el sector oeste solo serán vulnerables a contaminantes conservativos cuando sean descargados de forma difusa y durante largos períodos de tiempo.

#### 4. CONCLUSIONES

- El estudio de la capacidad protectora de la zona no saturada del acuífero aluvial Arenas Algaba, a partir de la relación entre el parámetro conductancia eléctrica longitudinal y resistencia hidráulica, permite evaluar las áreas más susceptibles a la contaminación de las aguas subterráneas; e identificar sectores de muy alta, alta, baja y muy baja vulnerabilidad.
- El mapa de vulnerabilidad obtenido constituye una herramienta de gran ayuda en la elaboración de planes de manejo del acuífero y de ordenación del territorio.
- El método puede ser aplicado a otros acuíferos cubanos donde sea posible asociar los bajos valores de resistividad eléctrica a incrementos de la arcillosidad de las formaciones geológicas en la zona no saturada.
- Se recomienda el desarrollo de investigaciones dirigidas a introducir el parámetro geoelectrico conductancia longitudinal para caracterizar las capas protectoras en los métodos paramétricos de rangos ponderados como DRASTIC, GOD, SINTACS, EPIK, RISK, PaPRIKa, COP y LEPT.

#### 5. REFERENCIAS

- Abdullah, T.; Ali, S.; Al Ansari, N. y Knutsson, S. 2016: Groundwater vulnerability using DRASTIC and COP models: Case study of Halabja Saidaq basin, Iraq. *Engineering*, 8(1): 741-760.
- Aguilar, Y.; Bautista, F.; Mendoza, M. y Delgado, C. 2013: Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 16(2013): 243-263.
- Aweto, K. y Ohwohere, O. 2018: Assessment of aquifer pollution vulnerability index at Oke-Ila, south-western Nigeria using vertical electrical soundings. *Journal of Geography, Environmental and Earth Science International*, 16(2): 1-11.
- Blanco, E.; Brown, E. y Márquez, R. 2018: Vulnerabilidad a la intrusión salina y la contaminación en la cuenca sur de Ciego de Ávila. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(1): 43-57.
- Chukwuma, E.; Orakwe, L.; Anizoba, D.; Amaefule, D.; Odoh, C. y Nzediegwn, C. 2015: Geo-electric groundwater vulnerability assessment of overburden aquifers at Awka in Anambra State, south-eastern

- Nigeria. *European Journal of Biotechnology and Bioscience*, 3(1).  
Consulta: 16/02/2020. Disponible en: [www.biosciencejournals.com](http://www.biosciencejournals.com)
- de Oliveira, A.; Fonseca, R.; Birelli, C. y Blanco, R. 2018: Application of longitudinal conductance in the estimation of the natural vulnerability of the Guarani Aquifer System in the Sao Paulo State. *Geociencias*, 37(4).  
Consulta: 16/02/2020. Disponible en:  
[www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/37/volume37\\_4.html](http://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/37/volume37_4.html)
- Díaz, J. A. 2018: El agua en Cuba: un desafío a la sostenibilidad. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(2): 46-59.
- García, J. y Gutiérrez, J. 2015: *La gestión de cuencas hidrográficas en Cuba*. La Habana: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. 95 p.
- García, J. A.; Sacasas, C. y Díaz, A. 2018: Vulnerabilidad a la contaminación en horizontes acuíferos del sur de Cuba occidental. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(1): 73-83.
- Instituto de Geología y Paleontología (IGP). 2016: *Mapa geológico de la República de Cuba*. La Habana: Servicio Geológico de Cuba.
- Jiménez, R. y Rodríguez, E. 2013: Geofísica aplicada a la búsqueda de agua subterránea en depósitos aluviales. Caso de estudio Arenas Algaba. En: V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS '2013. Memorias. La Habana, Cuba, 1-5 de abril.
- Kalinski, R. J.; Kelly, W. E.; Bogardi, I. y Pesti, G. 1993: Electrical resistivity measurements to estimate travel times through unsaturated ground water protective layers. *Journal of Applied Geophysics*, 30(3): 161-173.
- Kirsch, R.; Sengpiel, K. P. y Voss, W. 2003: The use of electrical conductivity mapping in the definition of an aquifer vulnerability index. *Near Surface Geophysics*, 1(1): 3-20.
- Luoma, S.; Okkonen, J. y Korkka, K. 2017: Comparison of the AVI, modified SINTACS and GALDIT vulnerability methods under future climate-change scenarios for a shallow low-lying coastal aquifer in southern Finland. *Hydrogeology Journal*, 25(2): 203-222.
- Margat, J. 1968: Vulnerabilité des nappes d'eau souterraines á la pollution. Bases de la cartoigraphie. BRGM No. 68. SLG 198 HYD. Orléans, France.
- Mosuro, G.; Omosanya, K.; Bayewa, O. y Laniyan, T: 2017: Assessment of groundwater vulnerability to leachete infiltration using electrical resistivity method. *Applied Water Science*, 7(5): 2195-2207.
- Obiora, D. e Ibuot, J. 2019: Geophysical assessment of aquifer vulnerability and management: a case study of University of Nigeria, Nsukka, Enugu State. *Applied Water Science*, 10(1): 29. Consulta: 22/03/2020.  
Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1113-7>

- San Román, N. 2019: *Evaluación de acuíferos aluviales para el abasto mediante la integración de un complejo de métodos de estudio. Caso: Arenas Algaba*. José Peñate Fleites (Tutor). Tesis de maestría. Universidad de Pinar de Río Hermanos Saíz Montes de Oca. 93 p.
- Sendros, A. 2016: *Aplicación de parámetros geoelectricos en el estudio de las aguas subterráneas (Cuenca de Valls Tarragona)*. Albert Casas Ponsatí (Tutor). Tesis doctoral. Universidad de Barcelona. 240 p.
- Stempvoort, D. V.; Ewert, L. y Wassenaar, L. 1993: Aquifer Vulnerability Index: A GIS – compatible Method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18(1). Consulta: 16/02/2018. Disponible en: <https://doi.org/10.4296/cwrj1801025>
- Suárez, O.; Fuentes, D.; Valcarce, R. M.; Vega, M. y Rodríguez, W. 2019: Aplicación de la metodología RISK modificada para evaluar la vulnerabilidad natural de la cuenca Almendares-Vento. En: VIII Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS '2019. Memorias. La Habana, Cuba, 1-5 de abril.
- Valcarce, R. M. y Jiménez, R. 2016: Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de la cuenca Dolores-Sagua La Chica, Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 38(3): 30-40.
- Vázquez, B.; Farfán, H. y Guanche, C. 2019: Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero cársico Vento, La Habana, Cuba. *Informin*, 11(1). Consulta: 16/02/2010. Disponible en: <http://www.infomin.co.cu>
- WWDR. 2018: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. Cifras y datos. Consulta 10/02/2020. Disponible en: [www.unesco.org/water/wwap](http://www.unesco.org/water/wwap)
- Zhang, Y.; Weissmann, G.; Fogg, G.; Lu, B.; Sun, H. y Zheng, Ch. 2018: Assessment of groundwater susceptibility to non point soured contaminants using three-dimensional transient indexes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(6): 1177. Consulta: 10/02/2020. Disponible en: [www.mdpi.com/journal/ijerph](http://www.mdpi.com/journal/ijerph)

## Información adicional

### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

**Contribución de los autores**

RMVO: Dirección de la investigación y su diseño; procesamiento de los datos y conclusiones de la investigación; redacción y revisión del manuscrito original y su versión final. WRRM: Colaboró con el diseño de la investigación. Asesoró en el procesamiento de los datos. Participó en la revisión del informe final. ZJD: Trabajó en el procesamiento, análisis e interpretación de los datos; revisión y aprobación de la versión final.

**ORCID**

RMVO, <https://orcid.org/0000-0001-9981-6832>

WRRM, <https://orcid.org/0000-0003-2938-6472>

ZJD, <https://orcid.org/0000-0002-9401-2648>

Recibido: 07/05/2020

Aceptado: 20/09/2020