

## Vulnerabilidad a la intrusión salina y la contaminación en la cuenca sur de Ciego de Ávila

Evelyn Blanco de la Paz e-mail: [evelyn@ingenieria.unica.cu](mailto:evelyn@ingenieria.unica.cu); [mabe@ced.cav.sld.cu](mailto:mabe@ced.cav.sld.cu)  
Asistente. Depto. de Ingeniería Hidráulica. Univ. Ciego de Ávila (Unica), Cuba.

Oscar Brown Manrique e-mail: [obrown@unica.cu](mailto:obrown@unica.cu)  
Profesor Titular, Centro de Estudios Hidrotécnicos (CEH). Univ. Ciego de Ávila (Unica), Cuba.

Raymundo Márquez Gurri e-mail: [rmarquezg@unica.cu](mailto:rmarquezg@unica.cu)  
Asistente, Depto. de Ingeniería Civil. Univ. Ciego de Ávila (Unica), Cuba.

### RESUMEN

En esta investigación se realizó una evaluación de la vulnerabilidad a la intrusión salina y la contaminación del agua subterránea en el sector hidrogeológico CA-II-1 de la cuenca sur de Ciego de Ávila, empleando análisis geofísico, el índice IVIS para la estimación de la vulnerabilidad a la intrusión salina y la elaboración del mapa de riesgo a la contaminación en el acuífero. Los resultados demostraron que el índice de vulnerabilidad a la intrusión salina se encuentra entre 37 hasta 667, clasificados desde insignificante hasta alta. Se obtuvo una alta vulnerabilidad a la contaminación en la zona central del área. Se identificaron 258 focos de contaminación, donde 19 presentan contaminación elevada y 112 moderada. En el mapa se destaca la zona de alta vulnerabilidad y de mayor riesgo a la contaminación.

**Palabras clave:** acuífero, estudio geofísico, foco contaminante, mapa de riesgo.

## Vulnerability to saline intrusion in the southern basin of the province of Ciego de Ávila

### ABSTRACT

In this research, an evaluation of the vulnerability to saline intrusion and groundwater contamination in the hydrogeological sector CA-II-1 of the southern basin of Ciego de Avila was carried out, based on the geophysical analysis, the IVIS index for the estimation of vulnerability to saline intrusion and the mapping of areas at risk of contamination in the aquifer. The results showed that the vulnerability index to saline intrusion is between 37 and 667, classified from insignificant to high. A high vulnerability to pollution was obtained in the central zone of the area. In addition, 258 sources of contamination were identified, where 19 had high contamination and 112 moderate. The map highlights the area of high vulnerability and greater risk to pollution.

**Keywords:** aquifer, geophysical study, contaminating focus, risk map.

## INTRODUCCION

El agua es uno de los principales recursos naturales, sin embargo, a pesar de ser renovable, su uso debe ser limitado, eficiente y racional, para mantener el equilibrio de los ecosistemas naturales, y no provocar pérdidas ni frenar el desarrollo económico de la sociedad. La sobreexplotación de los recursos naturales es una de las causas que trae como consecuencia el impacto negativo en la calidad de los suelos y los recursos hídricos. Por otra parte las presiones crecientes a que está sometida el agua debido al crecimiento de la población, el incremento en la actividad económica y la mejor calidad de vida provocan conflictos y una creciente competencia por los recursos limitados de agua dulce (FAO 2016).

Los recursos hídricos subterráneos proporcionan más de la mitad del agua de abastecimiento humano en la mayoría de los países del mundo; aunque este se considera un recurso protegido contra la contaminación, ha quedado demostrado que los acuíferos pueden ser afectados por actividades antrópicas y la protección de los mismos constituye uno de los problemas acuciantes para poder lograr el desarrollo sostenible de la sociedad (Carrasco et al. 2004).

En Cuba el agua subterránea es un recurso de extrema importancia debido a los considerables volúmenes de reservas y recursos existentes, a las facilidades de extracción por su poca profundidad y por ende a los bajos costos de instalación de las obras de captación y además a que en la mayoría de los casos su utilización para diversos fines no necesita tratamientos por la gran calidad de las mismas; sin embargo, la vulnerabilidad ante la contaminación en la cuenca norte de Ciego de Ávila es desde alta a muy alta, lo que indica que se trata de una zona de alto riesgo (Casanova et al. 2006a).

En España el servicio de proporcionar agua para la agricultura aumentó extraordinariamente y en algunas zonas se ha producido un acrecentamiento significativo de la superficie agrícola regada con aguas subterráneas, destacándose Andalucía donde se han convertido terrenos de secano en regadío mediante la explotación de aguas subterráneas. Este régimen de explotación en acuíferos costeros puede provocar el fenómeno de intrusión salina, debido al descenso de los niveles del agua subterránea y la penetración de agua del mar hacia la tierra (González et al. 2013).

Los efectos negativos del rompimiento del equilibrio hidrodinámico entre las aguas dulces drenadas del acuífero y las provenientes del mar, así como el deterioro de la calidad de las reservas subterráneas y su incidencia en los suelos producto de una irracional política fueron estudiados por Casanova et al. (2006a) con la utilización de técnicas geofísicas, en el sector CA-II-1 de la cuenca Sur de la provincia de Ciego de Ávila.

Las técnicas hidrogeoquímicas constituyen una herramienta complementaria para la hidrogeología dado que permiten responder las interrogantes que se presentan en sistemas complejos, como es el caso de los acuíferos costeros, donde la salinidad normalmente asociada con procesos de intrusión salina puede obedecer también a la conjunción con otros aspectos hidroclimatológicos e hidrodinámicos (Paredes y Vargas 2010).

La necesidad de contribuir a la gestión de los recursos hídricos subterráneos a partir de la realidad actual, caracterizada por la creciente escasez del agua debido a la sobreexplotación, el

bajo aprovechamiento de los recursos, la contaminación proveniente de fuentes puntuales y difusas; así como los efectos de la intensa sequía, condujo a proponer como objetivo del trabajo, evaluar la vulnerabilidad a la contaminación por intrusión salina y focos contaminantes superficiales en la cuenca sur de la provincia de Ciego de Ávila, que contribuya al aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos subterráneos por parte de los diferentes consumidores de esa zona en particular la agricultura.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el sector hidrogeológico CA-II-1 de la provincia de Ciego de Ávila, perteneciente a la cuenca Sur (figura 1), el cual se localiza en la parte más occidental del acuífero, con un recurso explotable de 118 hm<sup>3</sup> y una extensión territorial de 509 km<sup>2</sup>, lo que lo sitúa como el de mayor extensión superficial de la provincia.

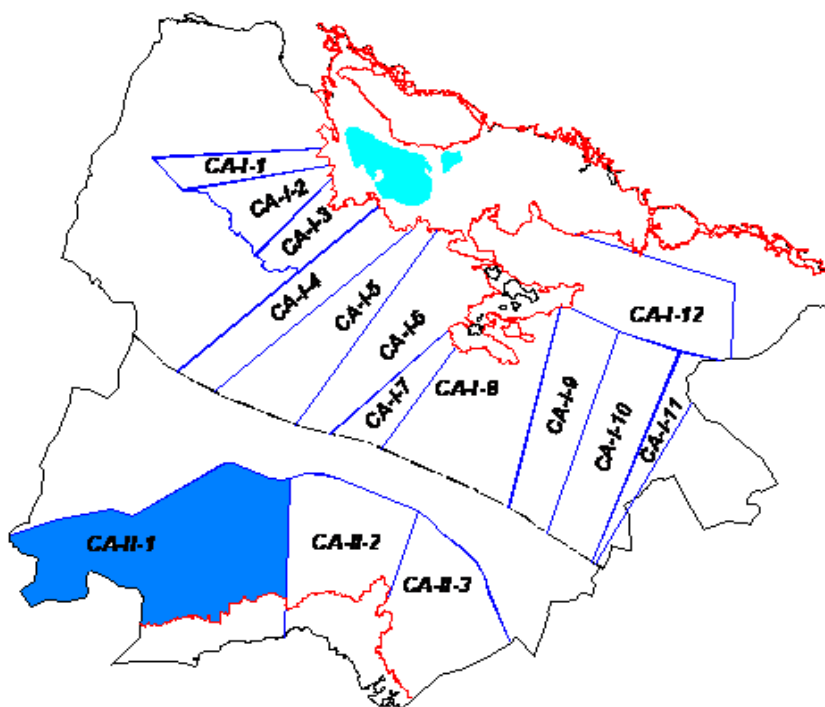


Figura 1. Localización del sector CA-II-1 en la provincia Ciego de Ávila

### Análisis de la intrusión salina en el sector

Para detectar la zona con intrusión en el sector se realizó un estudio geofísico mediante el tomógrafo eléctrico (figura 2) que pertenece al método de resistividad basado en el principio de la creación de un campo eléctrico artificial, el cual influye en el tipo de formación geológica del subsuelo.

En este caso se realizó un monitoreo de la variación vertical y horizontal de la resistividad en el acuífero a partir del levantamiento de una línea perpendicular a la costa, con una longitud de 320 m. Se escogió la porción más al sur del área sujeta a estudio debido a que previamente había sido localizada el agua salina en un pozo de explotación abandonado.



**Figura 2. Tomógrafo eléctrico**

Las mediciones realizadas se introdujeron de forma automática desde el equipo al software RES2DINV el cual usa una técnica de inversión de los cuadrados mínimos para reproducir el modelo 2D de la subsuperficie con solamente los datos de resistividad aparente. Los resultados de este monitoreo fueron publicados por Casanova et al. (2006b).

### **Evaluación de la vulnerabilidad a la intrusión salina**

La evaluación de la vulnerabilidad a la intrusión salina se realizó mediante el método DARLE propuesto por Blanco (2013) el cual permite evaluar de manera cualitativa la susceptibilidad del acuífero ante la intrusión salina, fenómeno este de gran significación en la contaminación de acuíferos libres costeros. Este tiene en cuenta que la intrusión salina es un fenómeno de migración lateral y que los métodos comúnmente utilizados para evaluar la vulnerabilidad de acuíferos ante la contaminación como GOD y DRASTIC sólo toman en cuenta la migración vertical de los contaminantes. Para la obtención del método se adoptó lo considerado en el método DAL, el cual consiste en el estudio de tres parámetros: distancia de la línea de costa hasta el punto a evaluar = D; altura piezométrica en cada punto a evaluar = A; litología o formación geológica de cada punto a evaluar = L.

Para el método DARLE se incluyeron dos nuevos parámetros: recarga neta hiperanual y el caudal de extracción o explotación, los cuales son de esencial importancia en la posición de la interfaz agua dulce-agua salada. El método propuesto, como se ha dicho, permite evaluar la vulnerabilidad a la intrusión salina lateral, teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- La distancia a la costa: se toma en lugar de la distancia vertical al agua subterránea que se considera en el GOD. Se valora que la parte del acuífero más alejada de la costa es menos vulnerable a la contaminación por intrusión salina.
- La altura piezométrica: se utiliza en lugar del grado de confinamiento hidráulico del GOD. Este factor es de considerable importancia, porque esa altura se convierte en una barrera natural contra el avance de la intrusión marina.

- La litología, que se conserva del método GOD: es un factor que en dependencia del tipo de formación geológica el agua salada o salobre va a tener menor o mayor resistencia a la contaminación del acuífero.
- La recarga neta hiperanual: es un factor que expresa una relación directa con las precipitaciones, pues a mayores precipitaciones, mayores serán las recargas en el manto acuífero, y dependiendo de su valor se confirma si el acuífero está o no influenciado por la explotación, indicando un alto peligro a la contaminación.
- Extracción del caudal: es un factor que cuando ocurre la sobreexplotación del acuífero influye en el descenso de los niveles de agua indicando que es un factor de inminente peligro a la contaminación del acuífero por intrusión salina, por lo que dependiendo de su valor se provocará o no el agotamiento del acuífero, y por lo tanto el avance de la cuña de intrusión salina.

A partir de la interpretación de cada uno de los parámetros anteriores y en consideración de las condiciones de los acuíferos en Cuba; así como el criterio de numerosos autores fue posible proponer las siguientes variables que conforman el método DARLE:

- Distancia de la línea de costa hasta el punto a evaluar ( $D$ ).
- Altura piezométrica en cada punto a evaluar ( $A$ ).
- Recarga neta hiperanual en cada punto a evaluar ( $R$ ).
- Litología o formación geológica de cada punto a evaluar ( $L$ ).
- Extracción del caudal en cada punto a evaluar ( $E$ ).

Los pozos de explotación ubicados en el área de estudio se muestran en la figura 3.

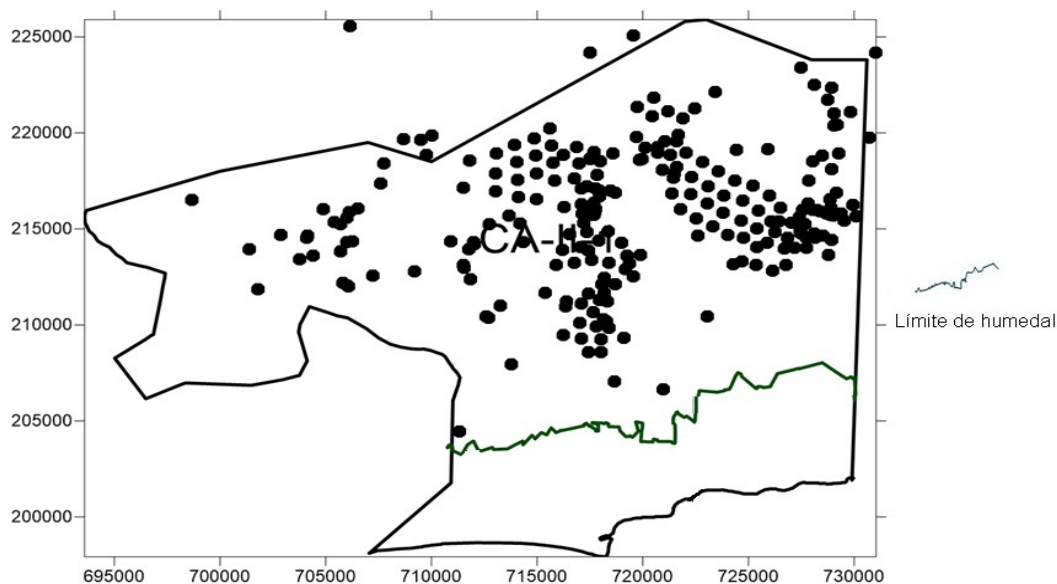


Figura 3. Mapa de ubicación de los pozos de explotación del área de estudios

La recarga neta hiperanual se obtuvo en los pozos que se encuentran en el área de estudio, mediante el método de balance, con la utilización del software Balance de los Recursos Hídricos Subterráneos (BARHIS), versión 1.0 desarrollado por Casanova et al. (2006b).

La determinación de los valores del parámetro litológico se basó en los perfiles litológicos de las calas existentes en el área de estudio y los correspondientes al parámetro de extracción del caudal se determinaron a partir de la información obtenida de la red básica nacional y la red informativa de los archivos de la Empresa de Aprovechamientos Hidráulicos (EAH) de la provincia. Se utilizó el valor más alto de explotación con el propósito de obtener el valor más crítico en la estimación de este parámetro considerado uno de los más importantes en la ocurrencia del fenómeno de intrusión salina en acuíferos costeros.

El índice de vulnerabilidad a la intrusión salina (*IVIS*) se determinó multiplicando cada una de las variables antes mencionadas en cada punto evaluado; por lo que su expresión queda representada por la ecuación (1) siguiente:

$$IVIS = DARLE \quad (1)$$

Con el método DARLE es posible obtener una vulnerabilidad a la intrusión salina en un rango desde insignificante hasta extrema. A cada una de las variables se le asignan valores entre 1 y 10 adaptados del método DAL (Blanco 2013), donde para el máximo será la condición más crítica a la contaminación y consecuentemente el más desfavorable para el acuífero. En la tabla 1, tabla 2, tabla 3 y tabla 4 se indican los valores asignados para este índice en cada variable del método DARLE.

**Tabla 1. Valores del índice de la distancia de la costa hasta el punto a evaluar**

<b>Distancia de la línea-costa hasta el punto a evaluar (km)</b>	<b>Índice</b>
> 30	1
25 – 30	2
20 – 25	3
15 – 20	4
10 – 15	5
8 – 10	7
4 – 8	8
1 – 4	9
≤ 1	10

**Tabla 2. Valores del índice del rango de la altura piezométrica**

<b>Altura piezométrica en cada punto a evaluar (m)</b>	<b>Índice</b>
> 30	1
25-30	2
20-25	3
12-20	5
8-12	7
4-8	8
1-4	9
≤ 1	10

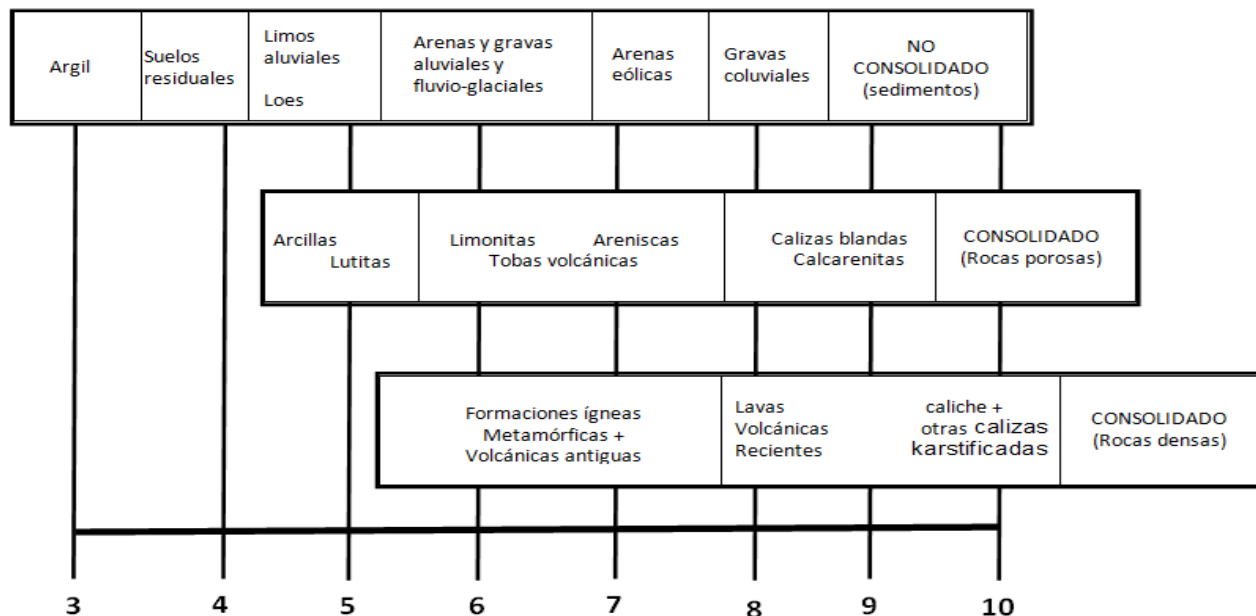
**Tabla 3. Valores del índice del rango de la recarga neta hiperanual**

Recarga neta hiperanual en cada punto a evaluar (mm)	Índice
0-50	10
50-100	9
100-150	8
150-200	7
200-300	6
300-1500	3
1500-3500	2
> 3500	1

**Tabla 4. Valores del índice del rango de la extracción del caudal**

Extracción anual del caudal (hm <sup>3</sup> )	Índice
0	1
1-3	3
4-6	5
7-9	6
10-11	7
12-13	8
13-15	9
>15	10

En la figura 4 se muestra el esquema de los valores asignados por Blanco (2013) para el parámetro de la litología o formación geológica del substrato. En este caso se utilizó la misma representación del método GOD, pero considerando valores enteros para su ponderación.



**Figura 4. Esquema de los valores del índice de la litología**



La utilización de herramientas geomáticas es de gran importancia para el estudio de la vulnerabilidad (Bocanegra et al. 2013). La confección del mapa de vulnerabilidad ante la contaminación por intrusión salina se realizó mediante los softwares Mapinfo Profesional 15.8 y el sistema Surfer 8.1. Se consideraron los valores obtenidos del índice de vulnerabilidad. En la tabla 5 se especifican los rangos formulados para la clasificación cualitativa de los valores del índice de vulnerabilidad a la intrusión salina (*IVIS*). La realización del mapa se basó en la interpolación de los valores del *IVIS* que van desde 5 hasta  $10^5$  (el índice 5 indica la mínima vulnerabilidad a la intrusión salina, mientras que el  $10^5$  la máxima), de acuerdo con las características y el comportamiento de las variables consideradas en el acrónimo DARLE, utilizando los colores indicados en dicha tabla 5.

**Tabla 5. Rangos de clasificación por el DARLE y colores de representación**

Valor del índice de intrusión salina ( <i>IVIS</i> )	Clasificación	Representación por colores
< 150	Insignificante	Verde
150 - 249	Muy baja	
250 - 399	Baja	
400 - 499	Moderada	Amarillo
500 - 699	Alta	Rojo
700 - 899	Muy alta	
900 - 1000	Extrema	

### Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea

Para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación se aplica el método DRASTIC propuesto por Arcega et al. (2014).

Para la determinación del puntaje de la profundidad del agua en el acuífero, se determinó el nivel estático medio (período seco) de cada uno de los pozos que se encuentran en el área y alrededor de ella.

Los valores del peso de puntaje del parámetro de la recarga ( $R_r$ ), se obtuvieron mediante el cálculo de la recarga neta hiperanual de los pozos que se encuentran en el área de estudio.

El parámetro de la litología del acuífero ( $A_r$ ) se determinó a partir de los perfiles litológicos existentes en el área.

El parámetro de la topografía ( $T_r$ ), se obtuvo a través del mapa del modelo digital de elevación del terreno del área que propició la determinación de valores de pendientes para cada zona en el acuífero y el correspondiente puntaje para la topografía.

La permeabilidad media de cada uno de los puntos del área estudiada se obtuvo a partir del mapa de permeabilidad.

### Inventario de las fuentes potenciales de contaminantes del área

La investigación realizó el inventario de un total de 258 focos contaminantes, entre los cuales se encuentran las categorías domésticas, biológicas, industriales y agropecuarias. Se contó con



una información actualizada sobre las fuentes de contaminación presentes en el área del Sector CA-II-1 y sus alrededores que comprendió focos que se encuentran en el inventario nacional del CITMA, los consumidores de agua y la disponibilidad de alcantarillado según la Empresa de Acueducto y Alcantarillado provincial.

Para determinar la categoría en la que se encuentra cada uno de los focos, se utilizó la clasificación cualitativa de los focos contaminantes según el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.

### **Elaboración del mapa de riesgo a la contaminación del agua subterránea**

Para la obtención del mapa de riesgo se siguieron los siguientes pasos:

1. La obtención del sentido y dirección del flujo de agua subterránea, necesario para conocer cómo sería el comportamiento a seguir por el contaminante en el acuífero. Logrado esto a través del mapa de hidroisohipsas hiperanual medio del sector.
2. La superposición del mapa de vulnerabilidad a la intrusión salina (obtenido por el método DARLE), el mapa de vulnerabilidad a la contaminación por focos contaminantes superficiales (obtenido por el método DRASTIC) y el resultado de la clasificación de los focos contaminantes.
3. La construcción del mapa de riesgo del área de estudio, como resultado de la determinación del sentido y dirección del agua en el acuífero, la clasificación de los focos contaminantes y la evaluación de la vulnerabilidad.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Aplicación práctica en la zona de estudio del método DARLE**

Los resultados obtenidos del índice para el parámetro de la distancia de la línea de costa hasta cada punto a evaluar, indican que los valores de mayor índice se corresponden con los puntos que se encuentran a una menor distancia de la costa y representan las zonas de mayor susceptibilidad a la contaminación por intrusión salina, lo que concuerda con estudios realizados por Paredes y Vargas (2010) en un acuífero costero de Urabá en Colombia.

En relación con el parámetro de la altura piezométrica de cada uno de los puntos del área estudiada, los índices calculados por el método empleado oscilan entre 7 y 9 e indican que en el acuífero predominan zonas vulnerables al avance de la intrusión salina, pues existe una menor barrera natural (altura del agua) contra el avance de la cuña de intrusión marina.

Los valores de índice del parámetro de la recarga obtenido mediante la recarga neta hiperanual muestran que la mayoría de los puntajes se encuentran entre 6 y 10, lo que indica que se trata de una zona de baja recarga neta al acuífero, es decir sus valores son bajos.

El índice correspondiente al parámetro de la litología obtuvo el máximo valor de 10 para todos los puntos evaluados, según lo propuesto por la metodología utilizada. Esto se debió a que la roca predominante es la caliza karstificada.

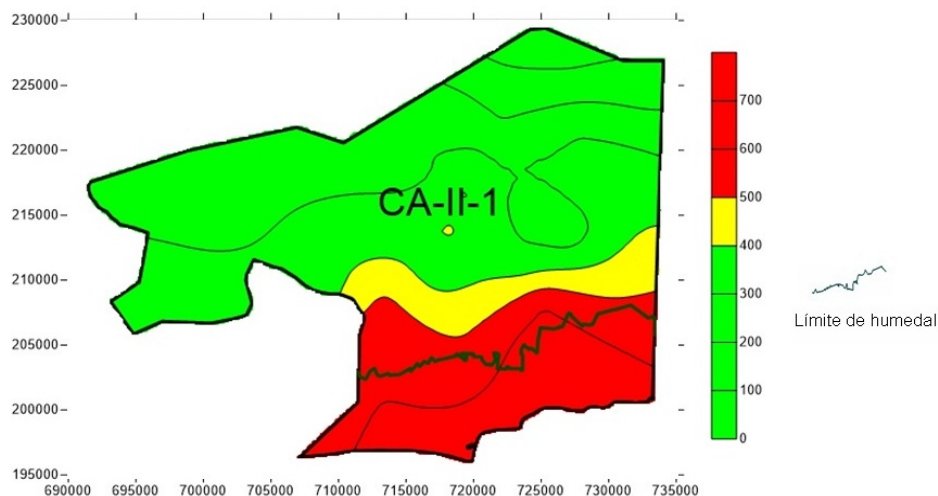
La localización espacial de cada uno de los pozos de explotación, ubicados en el área de estudio (figura 3) permitió comprobar que una gran mayoría de los pozos de explotación se encuentran situados en la zona de recarga (muy al norte del sector) y almacenamiento (al centro) del acuífero, y otra parte en la zona de descarga (al sur) del acuífero. El valor más elevado de caudal de explotación obtenido en la zona de estudio es de 20 000 m<sup>3</sup> día<sup>-1</sup> que al ser utilizado en la metodología indicó que la evaluación de la vulnerabilidad a la intrusión salina es afectada por el mayor valor de explotación obtenido.

Los valores alcanzados del índice IVIS y su clasificación cualitativa, según los rangos de la metodología empleada, permiten expresar que existe una vulnerabilidad desde insignificante hasta alta, oscilando los valores desde 37 hasta 667.

Este resultado presenta una tendencia similar a la encontrada por Paredes (2010) quien encontró una relación directa entre el nivel de contaminación y la vulnerabilidad del acuífero, en investigaciones realizadas en la Universidad de Medellín referidas a la susceptibilidad frente a la contaminación salina en el acuífero con la utilización de técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas.

En la figura 5 aparece el mapa construido a partir del resultado de la evaluación de la vulnerabilidad a la intrusión salina por el índice IVIS. En el mismo se pueden distinguir dos franjas que indican una baja y moderada vulnerabilidad con predominio del color verde y amarillo respectivamente, donde la tercera franja señalada con el color rojo, que se encuentra muy próxima a la costa en posición paralela a esta, es la zona de muy alta vulnerabilidad; lo que confirma que es esta el área de mayor susceptibilidad al fenómeno de la contaminación marina.

Este mapa permite además determinar las zonas de eminente peligro a la contaminación por intrusión salina, teniéndose en cuenta la migración lateral y vertical del contaminante. Se observa en este caso la existencia de alta vulnerabilidad próxima a la costa para este caso de estudio.



**Figura 5. Mapa de Vulnerabilidad a la intrusión salina**

### **Análisis de la vulnerabilidad a la contaminación por el método DRASTIC**

El análisis de la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación demostró que los mayores valores de peso de puntaje del parámetro de la profundidad del agua corresponden a los pozos que se encuentran próximos a la zona de descarga o en ella misma, al contrario de los que se encuentran entre los valores 1 y 3 que son los correspondientes a la zona de alimentación o recarga.

Lo propuesto por Árcega et al. (2014) para la evaluación de la vulnerabilidad presenta una gran correspondencia con este estudio pues cuando el nivel de agua es más próximo a la superficie, existe un mayor riesgo a la contaminación del mismo, es decir el valor de peso de puntaje de este parámetro es mayor.

Los valores de peso de puntaje del parámetro recarga se encuentran entre 8 y 9, lo que nos indica que es una zona de recarga al acuífero, variable esta que incide en la alta vulnerabilidad de la zona de estudio a la contaminación.

En la zona de estudio existe un predominio en todos los puntos evaluados del parámetro de la litología de las calizas biodetríticas, asignándole un valor de peso de puntaje de 10 y en menor grado las margas arcillosas correspondiéndole un valor de 2.

En el área de estudio predominan los suelos ferralíticos, dentro de ellos los ferralíticos rojos y amarillentos.

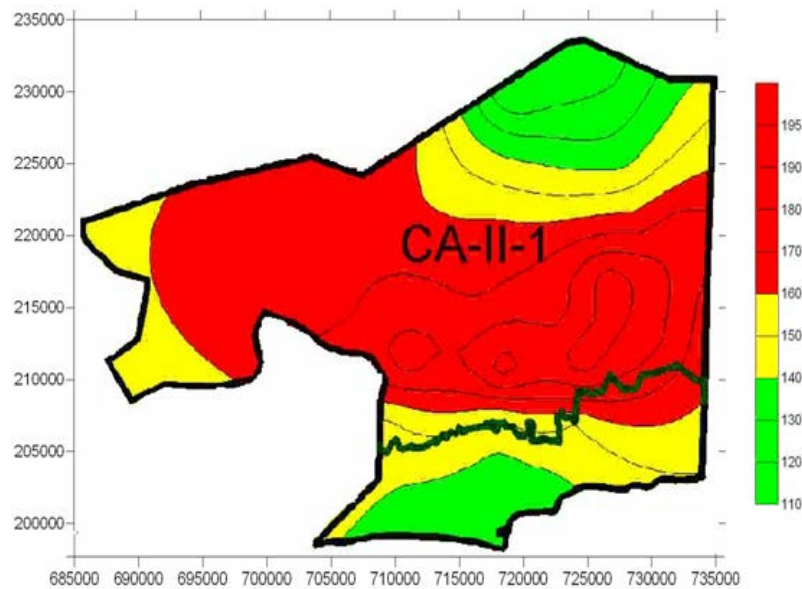
Para todas las zonas del acuífero: alimentación, almacenamiento y descarga corresponden el mismo valor del peso de puntaje de la topografía del acuífero, teniendo en cuenta que el rango de pendiente se encuentra entre 0 y 0,02.

El parámetro del impacto de la zona vadosa (Ir) se corresponde con la propia litología del acuífero por tratarse de un acuífero libre existente en el área. La roca predominante es caliza karstificada correspondiéndole en este caso un peso de puntaje de 6, según lo propuesto por la metodología utilizada.

Los valores obtenidos del peso de puntaje de la variable de permeabilidad se encuentran entre 2 y 10 respectivamente.

A continuación en la figura 6 se muestra el mapa logrado de la vulnerabilidad a la contaminación del área de estudio. Como se puede observar se aprecian dos pequeñas franjas indicando una baja y moderada vulnerabilidad con predominio del color verde y amarillo, al norte y al sur del acuífero.

En el centro del área de estudio existe una marcada susceptibilidad a la contaminación, con predominio del color rojo indicando una alta vulnerabilidad, y es precisamente donde se encuentra la zona de almacenamiento, lo que demuestra que es una zona de eminente peligro y susceptibilidad a la contaminación del agua subterránea.



**Figura 6. Mapa de Vulnerabilidad a la contaminación del área de estudio**

**Análisis de las fuentes potenciales de contaminantes del área**

En la tabla 6 se puede observar la cantidad total de focos según el origen de la fuente contaminante y el porcentaje que representan del total de los mismos, donde el 94% de los focos contaminantes obtenidos son de origen domésticos y el 6 % restante se dividen en 4% industrial, 1% biológicos y 1% agropecuarios. En este último caso se investiga actualmente la cantidad de área dedicada a los diferentes cultivos y los fertilizantes químicos utilizados, que son fuentes importantes de contaminación.

**Tabla 6. Cantidad de focos según el origen de la fuente**

Origen de las fuentes	Cantidad de focos	% que representa del total
Domésticos	243	94
Biológicos	3	1
Industrial	9	4
Agropecuarios	3	1
Total	258	100%

**Clasificación de la carga potencialmente contaminante por el método POSH**

Los resultados del estudio de las fuentes potenciales de contaminantes en el área de estudio permitieron la clasificación de las actividades contaminantes en Difusas y Puntuales, agrupadas en grados elevado, moderado y reducido.

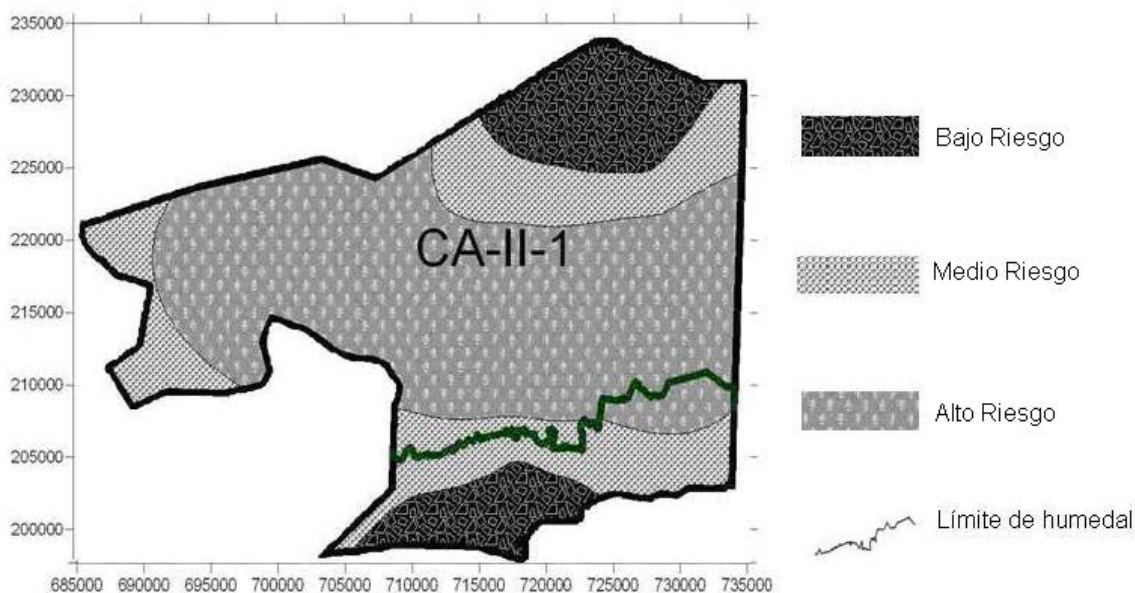
En la tabla 7 se puede observar un resumen del total de focos y la clasificación realizada según el grado de la carga contaminante y el porcentaje que representa del total de los mismos. Se comprueba que más de la mitad de los focos estudiados en el área presentan un grado de carga contaminante elevado y moderado, lo cual representa un peligro para el acuífero desde el punto de vista sanitario.

En este sentido Foster and Hirata (1988) demostraron la importancia del estudio de los riesgos de contaminación del agua subterránea a partir de los datos obtenidos de forma directa en cada área evaluada.

**Tabla 7. Cantidad de focos según el grado de la carga contaminante.**

Potencial de generación	Cantidad de focos	% que representan del total
Elevado	19	8%
Moderado	112	43%
Reducido	127	49%
Total	258	100%

En la figura 7 se muestra el mapa de riesgo del área, donde puede observarse que en la zona central existe una extensa área de alto riesgo a la contaminación del agua subterránea, la cual coincide precisamente con la misma zona de alta vulnerabilidad, donde se encuentran ubicados la mayoría de los focos de elevado potencial de contaminación que representan un eminente peligro para la calidad del agua subterránea.



**Figura 7. Mapa de riesgo a la contaminación del agua subterránea del área**

Este mapa de riesgo reviste una extrema importancia pues permite orientar programas de monitoreo a la calidad del agua subterránea, planear el uso del suelo y mantener un adecuado control de los focos contaminantes en la zona de alto y medio riesgo a la contaminación, para garantizar la protección medioambiental de los acuíferos.

### CONCLUSIONES

- El método DARLE contribuye a la evaluación de la vulnerabilidad a la intrusión salina en acuíferos costeros.

- En el área existe una gran susceptibilidad a la contaminación marina muy próxima a la costa, indicando una zona de eminente peligro y riesgo a la contaminación. Oscilando los valores de forma general del IVIS entre 37 y 667, lo que representa un rango amplio que va desde insignificante hasta alta vulnerabilidad a la intrusión salina.
- El mapa obtenido de vulnerabilidad ante la intrusión salina permite identificar las zonas de eminente peligro a la contaminación por intrusión salina del acuífero, teniendo en cuenta la migración lateral y vertical del contaminante.
- La evaluación de la vulnerabilidad ante la contaminación por focos contaminantes superficiales indica que el índice de vulnerabilidad del acuífero del área de estudio se encuentra entre 110 y 195, clasificados según la metodología DRASTIC de muy baja y muy alta vulnerabilidad.
- En el centro del área de estudio se aprecia una gran susceptibilidad a la contaminación, con predominio del color rojo revelando una alta vulnerabilidad, y es precisamente donde se encuentra el área de almacenamiento del acuífero indicando una zona de eminente peligro y riesgo a la contaminación del agua subterránea por focos contaminantes superficiales.
- Se identificaron 258 focos de contaminación, de los cuales 19 presentan contaminación elevada, 112 contaminación moderada y 127 de contaminación reducida, considerándose un área de alto riesgo a la contaminación del agua subterránea.
- La construcción del mapa de riesgo permitió identificar la existencia de una extensa área de alto riesgo a la contaminación del agua subterránea, la cual coincide con la zona de alta vulnerabilidad a la contaminación por focos contaminantes superficiales, con el área de moderada y alta salinidad; además con la ubicación de los focos de elevado y moderado potencial de contaminación, lo que representa un eminente peligro a la afectación de la calidad del agua subterránea.

## RECOMENDACIONES

- Mantener una actualización sistemática de los parámetros que intervienen en este tipo de estudio para lograr alertas tempranas sobre posibles riesgos de contaminación.
- Establecer un programa de monitoreo de la calidad del agua en las zonas identificadas como de alta susceptibilidad a la contaminación.
- Definir la influencia del uso de fertilizantes químicos en la contaminación del acuífero.

## REFERENCIAS

**Árcega I.; Otazo E.; Galindo E.; Acevedo O. y Romo C. (2014):** “Determinación del índice de vulnerabilidad mediante el método DRASTIC modificado, caso: Acuífero del Valle de Tulancingo, Hidalgo”, Memorias del XIII Congreso Internacional y XIX Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, ISBN: 978-607-9232-19-1, Instituto Tecnológico del Mar, Mazatlán, México.



- Blanco E.** (2013). “Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en un sector de la cuenca sur de Ciego de Ávila”, Tesis de Maestría en Ingeniería Hidráulica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría (Cujae), La Habana, Cuba.
- Bocanegra E.; Custodio E.; Manzano M.; Cardoso G. y Montenegro S.** (2013). “Gestión de acuíferos urbanos en zonas costeras: experiencias en Iberoamérica”, Primera edición, Editorial de La Universidad Nacional de La Plata (Edulp), ISBN: 978-987-1985-03-6, pp.15-22, Mar del Plata, Argentina.
- Carrasco H.; Jiménez S. y Valcarce R. M.** (2004). “Evaluación de la vulnerabilidad de la cuenca sur de La Habana”, II Seminario-Taller Protección de acuíferos frente a la contaminación, La Habana, Cuba, extraído de: <http://tierra.rediris.es/> en noviembre 2016.
- Casanova D.; García K. y Blanco K.** (2006a). “Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero norte de la provincia Ciego de Ávila”, Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 27 (2): 55-58, ISSN: 1680-0338, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.
- Casanova D.; Blanco E.; Camejo L. E.; Dassira E. y Vafidis A.** (2006b). “Utilización de método geofísico en el estudio de la intrusión salina en áreas de la empresa Juventud Heroica”, Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 27 (2): 81-85, ISSN: 1680-0338, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.
- FAO** (2016). “Afrontar la escasez de agua: un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria”. Informe sobre temas hídricos 38, Naciones Unidas, ISBN: 978-92-5-307304-7, Roma, Italia.
- Foster S. and Hirata R.** (1988). “Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data”. Technical manual, WHO-DAHO/HPE-CEPIS. ISSN: 1020-4393, pp.81, Lima, Perú.
- González N.; Kruse E.; Trovatto M. M. y Laurencena P.** (2013). “Temas actuales de la hidrología subterránea”, Editorial de la Universidad de La Plata (Edulp). ISBN: 978-987-1985-03-6, pp.450, La Plata, Argentina.
- Paredes V.** (2010). “Determinación de la susceptibilidad a la contaminación salina en el acuífero del eje bananero de Uraba con técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas”, Revista Geológica de América Central, 45: 123-139, ISSN: 0256-7024, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Paredes V. y Vargas I.** (2010). “Hidrogeoquímica en el acuífero costero del eje bananero de Urabá”, Revista Ingenierías, Vol. 9, No. 17, pp. 51-62, ISSN: 1692-3324, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.