

Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero cársico Vento, La Habana, Cuba



Evaluation of the vulnerability and risk of pollution of the underground waters of the karst aquifer Vento, Havana, Cuba

<http://opn.to/a/pt8yf>

Betsy Vázquez Gainza ^{1*}, Hermes Farfán González ², Carlos Díaz Guanche ³

RESUMEN: La vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas es una valiosa herramienta para la planificación del uso del suelo y el agua. En síntesis, las metodologías pretenden definir áreas con propiedades hidrogeológicas con comportamiento homogéneo ante la acción de cualquier agente contaminante, y se representan en clases, para la mejor comprensión de los tomadores de decisión. Particularmente para los acuíferos cársicos, recientemente se han desarrollado varias metodologías, pues sus particularidades hidrogeológicas y de transporte de contaminantes le imprimen rasgos muy particulares. En el presente trabajo, se aplica el método PC, que es una simplificación de la Aproximación Europea adaptada a las condiciones de Cuba. Además, fue evaluado el peligro y el riesgo de contaminación, pues la vulnerabilidad solo es útil, cuando no se han desarrollado actividades antrópicas en el área de estudio. El área de estudio seleccionada fue el acuífero cársico Vento, que satisface casi la mitad de la demanda de agua de la Habana. Los resultados muestran que, en general, la vulnerabilidad es moderada y presenta un bajo riesgo. Sin embargo, existen sectores críticos sobre los cuales se debe actuar para minimizar impactos.

Palabras clave: Aguas subterráneas, Contaminación, Acuíferos cársicos, Vulnerabilidad, Peligro, Riesgo.

ABSTRACT: Groundwater Vulnerability is a valuable tool for land and water use planning. In synthesis, methodologies try to define areas with hydrogeological properties with homogeneous behavior against of the action of any pollutants, and are represented in classes, for the better understanding of the decision makers. Particularly for karst aquifers, several methodologies have been developed recently, as their hydrogeological and pollutant characteristics give them very particular features. In the present work, the PC method is applied. PC is a simplification of the European Approach adapted to the conditions of Cuba. In addition, the hazards and the risk of contamination were assessed, since vulnerability is only useful when no anthropic activities have been developed. The selected study area was the Vento karst aquifer, which satisfies almost half of Havana's water demand. The results show that, in general, the vulnerability is moderate and presents a low risk. However, there are critical sectors on which action must be taken to minimize impacts.

Keywords: Groundwater, Pollution. Aquatic karst, Vulnerability, Danger, Risk.

Recibido: 02/01/2019

Aprobado en su forma original: 30/04/2019

¹Instituto de Geología y Paleontología Vía Blanca 1002, San Miguel del Padrón, CP 11 000, La Habana, Cuba.

²Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales ECOVIDA, Cuba.

³Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes De Oca", Avenida José Martí No. 270, Pinar del Río, Cuba. CP 20100.

*Autor para correspondencia: Betsy Vázquez Gainza. E-mail: betsy@igp.minem.cu

INTRODUCCIÓN

El desarrollo humano en muchas ocasiones está acompañado de la alteración y contaminación de los recursos naturales. El agua es uno de los recursos que más frecuentemente es afectado en su calidad. En relación con las aguas terrestres, esta alteración se presenta de la siguiente manera:

El agua superficial por estar en contacto inmediato con los residuos o desechos ve alterada su situación original casi de forma rápida.

El agua subterránea, la contaminación se retrasa y en ocasiones el paso de los contaminantes se impide (capacidad de autodepuración) debido a que entre el nivel de saturación de los materiales que conforman a un acuífero y la superficie del terreno, se presentan materiales que limitan o retardan el paso de los fluidos.

El agua es un recurso natural esencial del cual depende la vida en la Tierra. Del total de agua existente a nivel mundial, menos del 3% es agua dulce. De ese 3%, más de dos tercios está inmovilizada en los glaciares; el 30% constituye las reservas de agua subterránea y sólo el 0,4% se encuentra en ríos y cuerpos de agua superficiales ([World Water Assessment Programme, 2012](#)).

La escasez de agua es una amenaza significativa y creciente para el ambiente, la salud humana y el abastecimiento mundial de alimentos. Los ecosistemas que aportan bienes y servicios que sustentan la vida están sujetos a múltiples presiones entre las que se incluye, la necesidad de agua de calidad adecuada y en la cantidad necesaria en el momento apropiado (Comisión Técnica Especial de Medio Ambiente, COMTEMA-OLACEFS, 2014).

El agua subterránea, como recurso hídrico, presenta una garantía en su favor, debido a que éste es menos vulnerable que el recurso hídrico superficial, al estar “protegido” naturalmente por su propia condición de yacencia y ocurrencia, con un régimen hiperanual más estable. El papel del recurso agua subterránea, hoy en día, es preponderante en el planeamiento hidráulico y socioeconómico de cualquier país, pues es un elemento vital, para lograr el desarrollo sostenible. El reto es evitar o mitigar las contradicciones entre el necesario desarrollo

socio-económico y la conservación de estas importantes reservas naturales.

El territorio de Cuba comprende una superficie de 106 728 km², de los cuales el 67% corresponde rocas carbonatadas, en gran medida carsificadas en las que se han desarrollado complejos acuíferos un alto grado de acuosidad, entre 10-300 l/s. (Molerio, 1984).

En el caso particular de Cuba, el carso se extiende sobre una superficie de 66 500 km², esto es, aproximadamente el 66 % del área total del país, por lo que el archipiélago cubano puede clasificarse como un territorio eminentemente cársico. Este se ha desarrollado sobre unidades litológicas de tipo carbonatado, carbonatado-terrágeno, carbonatado-metamórfico, terrígeno-carbonatado y salino; clastocarso se ha encontrado sobre series terrígenas, y pseudocarso, en general sobre unidades metamórficas, cuya edad varía de pre-Jurásica a Cuaternario (Molerio, 1981).

Desde el punto de vista hidrogeológico, el carso cubano presenta características especiales, que lo ubican en el principal sistema acuífero del país. En Cuba se calculan unas 165 cuencas subterráneas, y de ellas, 151 son acuíferos cársicos y fisurado-cársicos. De ellos se extrae la mayor parte del agua utilizada para el abastecimiento humano de la mayoría de las ciudades y cabeceras provinciales (Pinar del Río, la Habana, Matanzas, Artemisa, Güines, Ciego de Ávila entre otras), y para el regadío de plantaciones agrícolas y agropecuarias. La contaminación de los acuíferos cársicos es un problema latente y que requiere de una atención urgente. [Molerio & Parise \(2009\)](#) definieron 5 tipos principales de fuentes de contaminación de las aguas cársicas de Cuba. Estas son: intrusión marina, agricultura, vertido de residuales, industria y minería.

Lo antes expuesto, es una evidencia del creciente interés en el estudio de los procesos que tienen lugar en los acuíferos cársicos, ya que su estudio integral es de vital importancia, porque sobre este, se desarrolla toda la actividad económica y social de nuestro país.

La Cuenca Almendares-Vento es una de las cuencas prioritarias de Cuba, pues es la principal abastecedora de agua potable a la Ciudad de La

Habana, por lo que su intensa y ya tradicional explotación, la eleva a un alto orden jerárquico de interés por los especialistas en los temas del agua, gestores ambientales, entre otros, vinculados con la provincia y con la ciudad capital. La cuenca subterránea de Vento es un acuífero cársico libre (no confinado), muy heterogéneo y anisótropo; un holocarso bien evolucionado, que se extiende sobre una superficie de 370 km². Sus recursos hidráulicos subterráneos, estimados en 278 Hm³/año, exhiben una elevada vulnerabilidad a la contaminación de todo tipo que, de hecho, se ha manifestado en el deterioro sistemático de la calidad de sus aguas ([Farfán, 2003](#))

La situación ambiental de la cuenca es crítica, debido a la contaminación de sus aguas por el vertimiento de residuales líquidos y sólidos (urbanos e industriales) deficientemente tratados o sin tratamiento alguno, manejo inadecuado de los residuos sólidos, deforestación además de problemas con la erosión de los suelos, así como otros. De esta manera, la vulnerabilidad a la contaminación emerge como una herramienta muy útil para la gestión, protección y planificación del uso del agua y el suelo del acuífero.

Este es un concepto básicamente cualitativo, pues la vulnerabilidad *per se* no puede ser medida directamente en el terreno, lo que imprime en gran medida un grado de subjetividad. Sin embargo, estos mapas se pueden validar adecuadamente, si se cuenta con registros históricos de lluvia-caudales; lluvia-niveles; ensayos con trazadores, etc. En caso de no contar con estos datos, los modelos matemáticos distribuidos y los de transporte de contaminantes son muy útiles. Estos métodos se han incluido en las normativas a nivel de nacional en muchos países, especialmente en Europa ([Ravbar, 2007](#)).

El objetivo principal de estos métodos es diferenciar áreas o zonas que, debido a sus particularidades hidrogeológicas, son más o menos vulnerables a contaminarse, lo cual es una herramienta de muchísimo valor para la gestión del acuífero y la planificación territorial en general. En tal sentido, la vulnerabilidad se resume a la elaboración de mapas que presentan de manera comprensible las diversas propiedades

de las hidrogeológicas complejas integradas, en áreas simbolizadas por diferentes colores. Estas áreas representan los diversos grados de vulnerabilidad (o protección natural), por lo que se hace más tangible la interpretación, y puede ser usado como una herramienta práctica para la planificación del uso de la tierra, basado en la división en zonas de protección y valoración del riesgo. La ventaja de tales definiciones cualitativas y descriptivas es que el término vulnerabilidad es a menudo entendido intuitivamente, particularmente por los tomadores de decisión en el proceso de la planificación ([Zwahlen, 2004](#)).

Sin embargo, la vulnerabilidad por sí sola, es útil para aquellas áreas donde no exista acción humana, y se pretenda planificar alguna actividad. Si en esta área, ya existe actividad antrópica, estas se definen como peligros de contaminación, que no es más que: una fuente de contaminación potencial resultado de las actividades humanas que tienen lugar principalmente en la superficie ([Zwahlen, 2004](#)), y que por consiguiente tiene el potencial para degradar la calidad de esta.

Su relación con la vulnerabilidad es directa, ya que su evaluación involucra la consideración de la interacción entre los contaminantes y la vulnerabilidad intrínseca del acuífero, lo cual se realiza mediante la superposición de los resultados del inventario de cargas contaminantes al subsuelo con el mapa de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos. La preocupación más grave surgirá donde se presentan o son proyectadas actividades capaces de generar carga contaminante elevada en un área de alta o extrema vulnerabilidad del acuífero ([Foster, 1987](#)).

Esta relación se manifiesta como los escenarios de riesgo de contaminación, que es usado para establecer las consecuencias de un evento potencialmente contaminante. La posible extensión espacial de un evento contaminante, basado en las direcciones y velocidades del flujo, también como los valores económicos del agua subterránea son factores que deben ser tomados en consideración en la estimación del riesgo ([Zwahlen, 2004](#)).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se aplicó el **método PC** donde los factores definidos se agrupan en Protección natural del acuífero (P) y Concentración del flujo (C), que es una simplificación de la Aproximación Europea (Origen-Target-Source) ([Daly et al., 2002](#); [Zwahlen, 2003](#)) adaptada a las condiciones de Cuba. El método es muy flexible, pues permite utilizarlo a cualquier nivel de información y aplicable a todo tipo de acuífero, mostrando varias variantes que permiten la diferenciación espacial del campo de propiedades físicas de los acuíferos. También permite cartografiar la vulnerabilidad a diversas escalas, desde la nacional (menor escala y diferenciación) a escala local (mayor escala y diferenciación) ([Farfán, 2010](#)).

La protección natural del acuífero (**factor P**), permite caracterizar la zona no saturada de un acuífero ante cualquier evento de contaminación, indicando su capacidad natural, por medio de varios procesos, de atenuar la acción de cualquier contaminante. Los datos se obtienen por los mapas de suelo, de geología y trabajo de campo. Dos elementos son considerados: el suelo y el medio acuífero. La protección del suelo está definida por la profundidad, la textura y estructura del mismo, que definen la capacidad y velocidad de infiltración, así como la posibilidad de atenuación de contaminantes en la vertical. El medio acuífero se caracteriza mediante la litología del acuífero, que se han agrupado en cinco complejos tectonofaciales, que responden a su morfología y sus comportamientos hidrogeológicos respectivos ([Farfán et al., 2013](#)). Las condiciones de confinamiento fueron asumidas tal y como se describen en los métodos COP y la Aproximación Eslovena.

El valor final del cálculo entre las variables utilizadas expresado y distribuido mediante un ajuste logarítmico fue reducido al Factor P a un ajuste lineal, debido a que los métodos originales consideran tres factores, y en este caso hemos obviado uno (factor precipitación) por los criterios antes expuestos. En este caso, al ajustar los valores a esta expresión lineal, se eliminan los errores debidos a subvaloración o sobrevaloración de la vulnerabilidad matizados por otro elemento reductor.

La concentración del flujo (**factor C**), es un indicador que reduce la capacidad de Protección Natural de Acuífero (P), y permite la diferenciación de zonas de recarga difusa y concentrada, y fue desarrollado específicamente para acuíferos cársicos ([Zwahlen, 2004](#); [Vias, 2005](#); [Nguyen & Goldsheiger, 2006](#); [Ravbar & Goldsheider, 2007](#)). Sin embargo, algunos elementos le son comunes a todo ambiente hidrogeológico, como lo son las pendientes y la vegetación. La pendiente fue dividida de acuerdo a los tipos de escurrimiento, siguiendo los criterios del flujo Hortoniano. En este sentido, tres tipos han sido planteados, que definen el flujo superficial, subsuperficial y la infiltración. Las pendientes elevadas de la superficie del terreno, favorecen la escorrentía superficial y hacen que disminuya la infiltración, y viceversa para pendientes suaves. La vegetación influye en la interceptación de la precipitación permitiendo mayor o menor recarga, y dependiendo de su tipo y densidad afecta los procesos de escurrimiento. En este caso, ha sido escogida la densidad de vegetación como variable a utilizar ([Farfán, 2010](#)).

Definidos estos factores comunes, es necesario definir los específicos de los ambientes cársicos. Se asumieron la distancia a las corrientes y el desarrollo de morfologías cársicas. El primero para definir la recarga alóctona concentrada, y subdividida de acuerdo con su funcionamiento hidrológico, adaptando los criterios de [Ravbar & Goldsheider \(2007\)](#), y el segundo para las áreas con recarga autóctona generalmente difusa. Se ha obviado su subdivisión por las capas superficiales, pues se asume que este factor ya está definido en el factor P. Los datos pueden ser obtenidos mediante mapas topográficos, imágenes de satélite, fotografía aérea, y trabajo de campo. Luego se definen las clases de vulnerabilidad intrínseca mediante la multiplicación de los mapas de los dos factores con ayuda del Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGis.

Están referidos al proceso o naturaleza del peligro (producción, almacenaje, líquido, sólido, etc.), clase de sustancia peligrosa, cantidad de sustancia que puede ser vertida y edad o estado de las instalaciones.

Evaluación y cartografía de los peligros de contaminación de las aguas subterráneas. Índice de peligrosidad HI (*hazard index*)

La evaluación de los peligros según la metodología planteada por De Keteleare *et al.*, (2004) en el marco de la Acción COST 620, se resume en cinco puntos:

- inventario de peligros
- nocividad de la fuente o actividad contaminante: factor H
- intensidad de la contaminación: factor Q_n
- probabilidad de ocurrencia de un evento de contaminación: factor R_f
- índice de peligro HI

Entre el inventario y la evaluación de cada factor hay que seleccionar los parámetros a utilizar para el cálculo del índice. Los parámetros característicos de cada tipo de peligro están referidos al proceso o naturaleza del peligro (producción, almacenaje, líquido, sólido, etc.), clase de sustancia peligrosa, cantidad de sustancia que puede ser vertida y edad o estado de las instalaciones.

Inventario de Peligros

El primer paso para la evaluación de los peligros es la recopilación de las actividades y elementos potenciales de contaminación de las aguas subterráneas. La [tabla 1](#) recoge una relación de las fuentes potenciales de

contaminación agrupadas en 15 clases y éstas, a su vez, se concentran en tres categorías, en función de la actividad humana con la que están relacionados: **infraestructuras de desarrollo urbano, actividades industriales y agropecuarias.**

A la hora de realizar el inventario de peligros hay que tener en cuenta que la fuente de la contaminación no tiene por qué estar localizada sobre la superficie del acuífero. Una fuente de contaminación puede tener su origen en una zona retirada y ser transportado el contaminante por el agua o por el viento ([Vías, 2005](#))

Nocividad del contaminante: Factor H

De acuerdo con [Drew & Hotzl \(eds\) \(1999\)](#), el impacto de un peligro potencial sobre un acuífero queda definido por su toxicidad, extensión y duración. El método HI (*Hazard Index*) permite definir el impacto sobre la calidad del agua subterránea mediante el factor H (nocividad de un contaminante). Este factor es función de la carga tóxica, solubilidad y movilidad del contaminante, propiedades que determinan tanto la toxicidad del contaminante como la duración del mismo.

El factor H expresa la nocividad del contaminante o de una actividad humana potencialmente contaminante. En total, en el marco de la Acción COST 620, se han diferenciado 96 peligros potenciales, de los cuales 42 están ligados a infraestructuras de

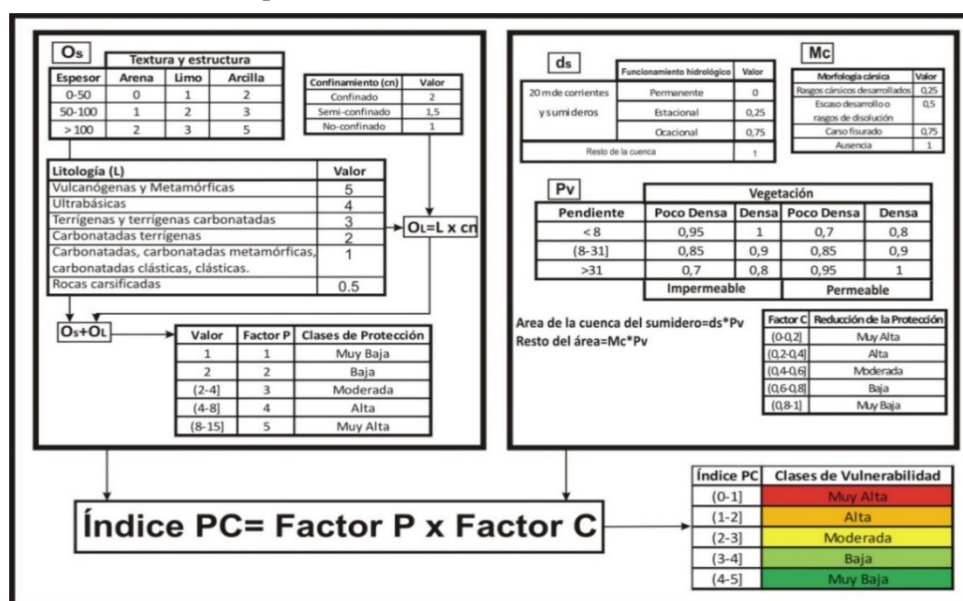


Figura 1. Método PC para la cartografía de la vulnerabilidad de acuíferos ([Farfán, 2010; 2013, 2014](#)).

desarrollo urbano, 41 a la industria y 13 a la actividad agropecuaria. La nocividad se indica mediante la asignación de un valor numérico a cada uno de los peligros inventariados (Anexo 1). Los valores se expresan en forma de puntuaciones, valores ordinales, y varían entre 10 (mínima nocividad) y 100 (máxima nocividad).

La nocividad de las fuentes y actividades potencialmente contaminantes puede tener dos lecturas. Por un lado, la nocividad potencial asociada al funcionamiento diario de la actividad potencialmente contaminante (o simplemente su existencia) que emite de forma continua sustancias nocivas al medio, pero sin superar los límites establecidos en la legislación vigente, lo que las caracteriza como peligros con un carácter difuso. Por otro lado, la nocividad de cada elemento o actividad humana puede ser derivada de las consecuencias de un accidente, por lo que adquiere un carácter concentrado. La nocividad asignada a cada elemento o actividad humana es el resultado de una caracterización del peligro de forma difusa o concentrada. Por ejemplo, una central nuclear es un elemento que no contamina salvo caso de accidente, cuando se transforman en un peligro de nocividad muy elevada. En cambio, la agricultura es una actividad poco nociva en comparación con una central nuclear, pero emite contaminantes en continuo de forma difusa, por lo que llega a provocar eventos de contaminación de forma más usual.

Intensidad de la contaminación. Factor Q_n

El factor Q_n indica la cantidad de sustancia que puede ser vertida en caso de accidente, es decir, la intensidad de un evento de contaminación. Para ello se relaciona la cantidad susceptible de ser vertida con el tamaño de la fuente contaminante (De Keteleare *et al.*, 2004).

En función de la intensidad o cantidad, puede variar la peligrosidad de la fuente en un 20 %. Esta variación del 20 % se manifiesta tanto por exceso como por defecto.

Los valores que puede tomar Q_n varían entre 0,8 y 1,2. Una actividad humana que utilice una gran cantidad de contaminante incrementa su peligrosidad al multiplicarse por 1,2 y, en caso contrario, si es muy pequeña, se multiplica por 0,8.

El factor intensidad de contaminación permite diferenciar la peligrosidad de las fuentes contaminantes, no solo entre fuentes de distinta categoría, sino también dentro de una misma tipología. Su caracterización se realizó siguiendo a (Ravbar, 2007).

Probabilidad de ocurrencia: Factor R_f

El factor R_f se refiere a la probabilidad de que ocurra un evento de contaminación (De Keteleare *et al.*, 2004) y los valores pueden variar entre 0 y 1. El valor 0 expresa una probabilidad nula de que ocurra una catástrofe, mientras que el valor 1 indica la certeza de que puede llegar a ocurrir un suceso de contaminación. Para medir la probabilidad de ocurrencia, se puede utilizar el estado de conservación o mantenimiento de cualquier fuente potencial emisora de contaminación. Igualmente, se puede utilizar la seguridad de las instalaciones o de la actividad. De Keteleare *et al.*, (2004) aconsejan utilizar valores cercanos a 1, de lo contrario se podría eliminar fácilmente la peligrosidad de actividades que utilizan materiales altamente tóxicos y sólo utilizar valores cercanos a cero para actividades humanas muy seguras.

Índice de peligrosidad: HI

El producto de los tres factores anteriores tiene como resultado el índice de peligro HI (De Keteleare *et al.*, 2004):

$$HI = H \cdot Q_n \cdot R_f$$

El índice final de peligro de contaminación puede variar entre un valor mínimo de 0 y un máximo de 120. Los valores del índice de peligrosidad se agrupan en clases cualitativas de peligro mediante intervalos regulares, con un recorrido de 24 unidades cada uno. De esta manera, se obtienen cinco clases para diferenciar el índice de peligro (Tabla I).

Tabla 1. Clases del índice de peligro (De Keteleare *et al.*, 2004)

Intervalos del índice HI	Clase de peligro
[0 - 24]	Muy Bajo
[24 - 48]	Bajo
[48 - 72]	Moderado
[72 - 96]	Alto
[96 - 120]	Muy Alto

Evaluación del riesgo

Para la creación del mapa de riesgos, es necesario reclasificar los intervalos de HI. En este sentido, se siguió la metodología de [Ravbar \(2007\)](#), que evalúa la intensidad del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas ([figura 2](#)).

Coefficiente de determinación

La relación entre los factores que compone el método y el índice final de vulnerabilidad y el riesgo del agua subterránea a la contaminación se puede obtener estadísticamente utilizando los coeficientes de correlación ([Kufs, 1992](#)).

En el presente trabajo, el coeficiente de determinación (el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson) ha sido utilizado para medir la relación entre el índice de vulnerabilidad y el riesgo con la puntuación de cada factor. Este coeficiente ya ha sido utilizado de forma análoga por ([Vías et al., 2010](#)).

Para conocer el coeficiente de determinación se ha utilizado la herramienta de ArcGIS *Band collection* que permite calcular algunos parámetros estadísticos mediante un análisis multivariable de un conjunto de raster. Con esta herramienta se conocen las matrices de correlación y de covarianza, así como los parámetros estadísticos básicos, tales como los valores de mínimo, máximo, media y desviación

estándar de cada capa. El coeficiente de determinación se estima a partir del cuadrado de los valores de la matriz de correlación obtenida con ArcGIS.

Parámetro de Vulnerabilidad Global

El parámetro de Vulnerabilidad Global (G_v) ([Vías et al., 2010](#)) permite conocer un valor medio de la vulnerabilidad del área de estudio. De este modo es posible comparar de forma rápida y simple la vulnerabilidad de diferentes áreas de estudios y/o evaluada mediante distintos métodos. El G_v se calcula a partir de la representatividad de cada clase de vulnerabilidad, es una media ponderada como indica la ecuación:

$$G_v = \frac{\sum cl.w}{100}$$

Dónde:

- G_v - parámetro de Vulnerabilidad Global
- cl - valor de la clase de vulnerabilidad ([tabla 4](#)).
- w - porcentaje de superficie ocupada por cada clase de vulnerabilidad

El valores de G_v varía entre 5 (máximo valor) y 1 (mínimo valor).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el área de estudio se aplicó por primera vez el método PC, para la cartografía de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos cársicos, debido a que los métodos antes descritos en la literatura no han mostrado

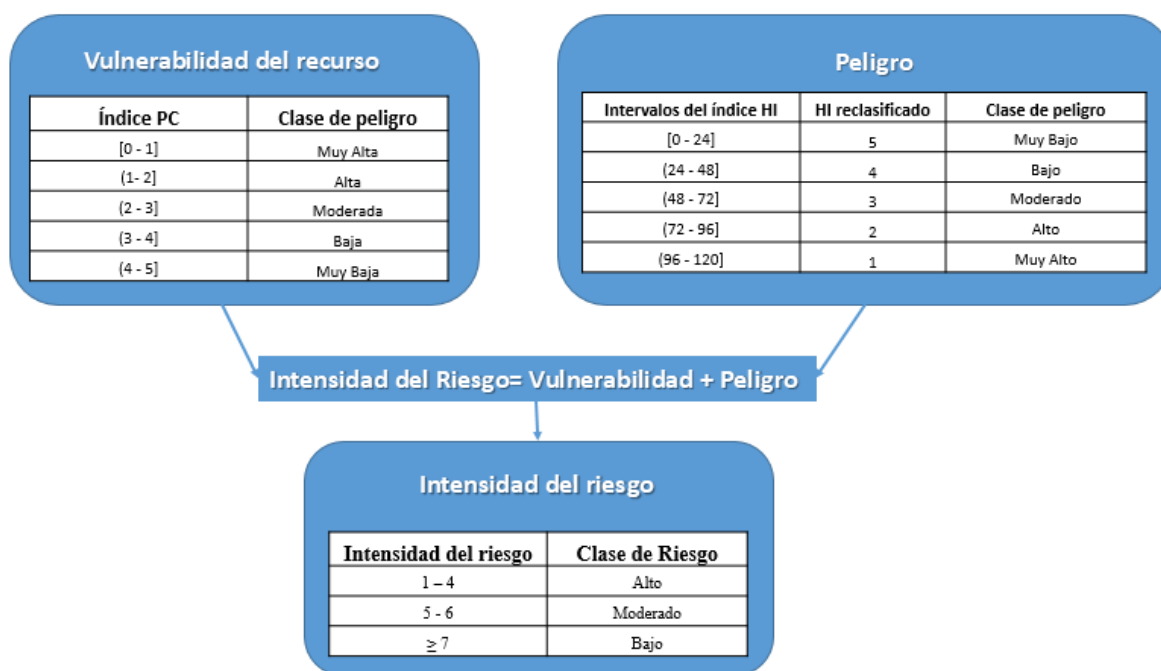


Figura 2. Esquema de estimación del riesgo (Modificado de [Ravbar, 2007](#))

resultados alentadores, además no toman en consideración las propiedades de los acuíferos cársicos y en muchos casos, los escasos de datos requeridos para su aplicación, no ha permitido su extensión a toda el área. A partir de la combinación de los dos factores anteriores, se obtiene el índice PC, que corresponde a la vulnerabilidad intrínseca del acuífero cársico.

El 14 % del área analizada tiene una vulnerabilidad Muy Alta, el 25 % Alta, el 50 % Moderada, el 6 % Baja y el 5 % Muy Baja (Figura 11). La vulnerabilidad media según el Parámetro de vulnerabilidad Global (Gv) es 3.37, lo cual representa una Moderada Vulnerabilidad.

Según el coeficiente de determinación, ambos factores se correlacionan con el mapa final de vulnerabilidad de manera similar, con coeficientes de determinación de 0.62 y 0.61 para la protección y la concentración del flujo respectivamente. Esto implica que ambos ejercen

una influencia muy similar en las clases de vulnerabilidad definidas (tabla 2).

La vulnerabilidad Muy Alta se asocia a los acuíferos carbonatados cársicos con espesores de suelo que no sobrepasan los 50 cm y son de material limo-arcilloso.

En estas zonas se encuentran desarrolladas dolinas de diversas dimensiones y estadios de desarrollo, así como las canteras, las presas y demás cuerpos de agua y otros sectores asociados con principalmente con protecciones naturales bajas y muy bajas.

La vulnerabilidad Alta se encuentra hacia las partes exteriores del acuífero, se encuentra principalmente asociada sectores de desarrollo de carso fisurado, que le ofrecen una capacidad de reducción de moderada a baja. Esta zona tiene un amplio desarrollo del suelo, donde predominando los sedimentos arcillosos y limo arcillo-arenoso con espesores que varían de

Tabla 2. Relación entre valor de las clases de vulnerabilidad (cl) y el índice de vulnerabilidad (Vías *et al.*, 2010)

Valor PC	Clase de vulnerabilidad	Valor de la clase (cl)
0-1	Muy Alta	5
1-2	Alta	4
2-3	Moderada	3
3-4	Baja	2
4-5	Muy Baja	1

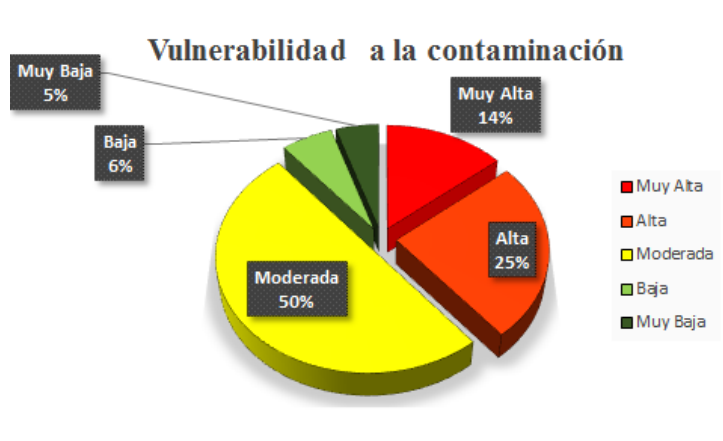


Figura 3. Porcientos de cada clase de vulnerabilidad.

Tabla 3. Coeficiente de determinación entre los factores que componen el método y el índice final de vulnerabilidad (PC)

Coeficiente de determinación			
Capa	Factor P	Factor C	Vulnerabilidad
Factor P	1	0.19	0.62
Factor C	0.19	1	0.61
Vulnerabilidad	0.62	0.61	1

(0-50) -(50-100) cm, donde la densidad de vegetación es alta, debido a un complejo de vegetación de pastos y comunidades herbáceas secundarias y en menor tamaño arboretun y bosque semidecidual secundario.

La vulnerabilidad Moderada ocupa la mayor extensión en el área, desarrolladas mayormente en la parte central del acuífero. Se caracteriza por presentar suelos de material arcilloso con espesores mayores de 100 cm donde predominan las rocas carbonatadas y carbonatadas terrígenas pertenecientes a las formaciones geológicas Cojimar y Colon, y evidencias de depósitos terrígenos, que debido a sus propiedades acuíferas tienen una protección alta, y los procesos de concentración de flujo son moderados a bajos.

La zona de baja vulnerabilidad presenta muy poca extensión del área. Existe un predominio de las rocas carbonatadas-terrígenas y terrígenas-carbonatadas, que se encuentran cubiertas por potentes capas de suelos que sobrepasan los 100 cm, confiriéndole una protección alta. Debido a esto, el desarrollo del carso es totalmente nulo, y

los procesos de concentración del flujo no ofrecen reducción de la protección. Además, una alta densidad en cuanto a la vegetación se evidencia en esta área predominando por varios cultivos.

En las zonas con clases de Muy Baja de vulnerabilidad están asociados a rocas terrígenas y terrígenas carbonatadas donde la protección es alta, debido a sus suelos son predominantemente limosos y/o arcillosos con espesores entre (50-100 cm) y con pendientes que van de 31-138 %.

Evaluación y cartografía de los peligros de contaminación sobre el acuífero cársico de Vento

El inventario se llevó a cabo mediante la clasificación de las actividades antrópicas cartografiadas en el mapa de usos del suelo. En el acuífero de Vento se han localizado 19 actividades potencialmente contaminantes (tabla 9). Los peligros detectados se concentran de una forma u otra en toda la zona de estudio.

Los peligros localizados sobre el acuífero están mayormente relacionados con la actividad

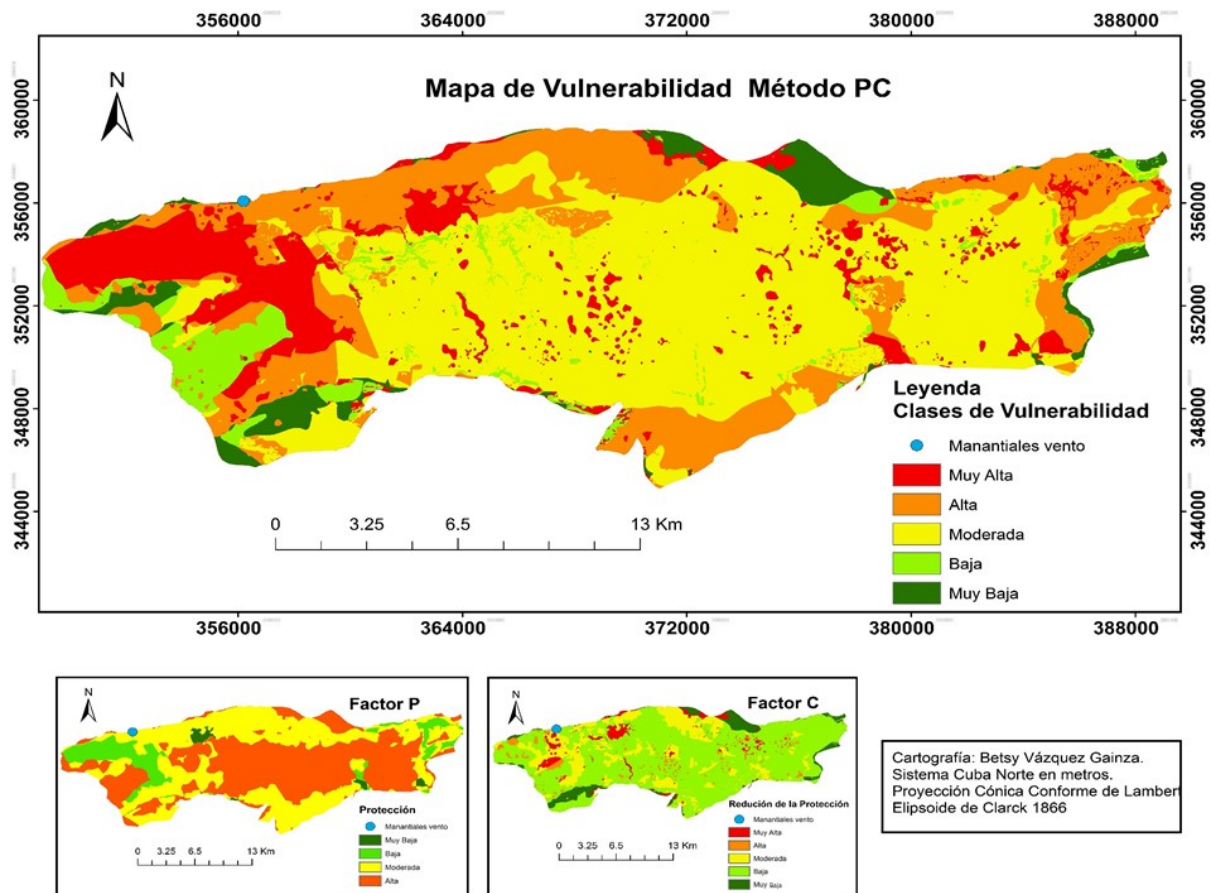


Figura 4. Mapa de vulnerabilidad del acuífero Vento. Método PC.

agropecuaria, concretamente, 13 actividades de un total de 19 están relacionadas con este grupo. Sólo se ha observado 1 actividades de tipo industrial y 5 relacionadas con infraestructuras del desarrollo urbano.

Como ese explica en el acápite III.2.3 de la presente tesis, las actividades potencialmente contaminantes se expresan en forma de puntuaciones, valores ordinales que varían entre 10 (mínima nocividad) y 100 (máxima nocividad) según los criterios de Keteleare *et al.*, (2004).

De esta manera, la nocividad de las actividades potencialmente contaminantes en el acuífero de Vento puede catalogarse como baja debido a que las actividades y peligros potenciales, que se han detectado en el acuífero son inferiores a la media de los valores.

La mayor nocividad se encuentra ligada a las actividades industriales, concretamente las áreas industriales o en explotación minera y la hidrografía representan un peligro potencial de contaminación relativamente elevado. Vale la pena resaltar que su nocividad se debe a la estrecha relación que existe entre las aguas superficiales y subterráneas (presas que funcionan como recarga, como es el caso de Ejército Rebelde) y el carácter permanente de gran parte de sus corrientes superficiales.

[Cuevas *et al.*, \(2011\)](#), analizan las fuentes contaminantes que afectan a la red hídrica de la cuenca Vento. Los autores la dividen en 3 zonas: parte alta (presenta afectaciones debido a la insuficiencia de alcantarillado y ausencia de tratamiento para los residuales domésticos, industriales y agropecuarios que se vierten al río), parte media (contiene aguas residuales domésticas crudas, generadas por insuficiencias del alcantarillado y Plantas de Tratamiento. Los aportes industriales vertidos al río también contribuyen a empeorar su situación sanitaria) y parte baja (recibe aportes de aguas residuales domésticas crudas por la insuficiencia en los servicios de alcantarillado).

Sin embargo, es bueno destacar que en las diferentes partes del río (alta, media y baja) aún se presentan condiciones de gran contaminación debido a que los cuerpos receptores superficiales reciben aún vertimientos de diferente origen que a veces deterioran sus condiciones sanitarias.

Entre las causas de estas afectaciones se encuentran la ausencia o deterioro de sistemas de tratamientos de residuales domésticos, industriales y agropecuario, e insuficiencias en el sistema de alcantarillado. Todo esto provoca que llegue materia orgánica, bacterias y nutrientes hacia algunos embalses y corrientes superficiales provocando condiciones de eutrofización por los elevados contenidos de nitrógeno y fósforo, trayendo esto como consecuencia la presencia de algas y vegetación acuática superior como es el Jacinto de Agua.

El factor Qn presenta, en general, valores bajos para todos los peligros de contaminación. Dentro de la categoría agropecuaria se encuentran el café, la caña de azúcar, cítrico, frutales, otros cultivos temporales, pastos y forrajes que son generalmente cultivos de secano, la superficie de uso forestal, áreas de apoyo a la producción agropecuaria, áreas de producción agropecuaria, granos, tubérculos y raíces, y superficie no apta para la agricultura todas estas actividades fueron puntuadas con un valor de 0.8 porque es mínima la cantidad de contaminantes que pueden ser vertidos en comparación con otras zonas y otras actividades.

El área ociosa o deficientemente explotada y otras instalaciones o inmuebles son actividades en las cuales no se ha observado característica alguna que induzca a una modificación del factor y que reduzca o incremente la cantidad de contaminantes susceptibles de ser vertidos con respecto a una actividad estándar. Estas actividades presentan un rendimiento normal en su sistema productivo y han sido evaluadas con un valor 1.

Las áreas industriales o en explotación minera, viales e instalaciones de transporte y arroz han sido estimadas con un valor 0.9, donde el grado de peligrosidad es moderado es decir no implican ningún caso de un aumento significativo de la peligrosidad.

Los asentamientos poblacionales, la hidrografía y otros cultivos permanentes son actividades realizadas con gran cantidad de contaminantes los cuales incrementan su peligrosidad estimados con un valor de 1.2.

La probabilidad de que ocurra un evento de contaminación en el acuífero de Vento es elevada (otra cosa es que esa contaminación sea

Tabla 4. Clasificación de los peligros, nocividad (H), intensidad (Qn) y probabilidad de ocurrencia (Rf) para las actividades antrópicas inventariadas del acuífero Vento.

Categorías	Tipos de Peligros	HI	Qn	Rf
Actividades Industriales	Área industrial o en explotación minera	70	0.9	0.9
	Área ociosa o deficientemente explotada	30	1	0.3
Infraestructuras del desarrollo urbano	Hidrografía	45	1.2	1
	Otras instalaciones o inmuebles	30	1	0.8
	Viales e instalaciones del transporte	20	0.8	0.3
	Asentamientos poblacionales	40	0.9	0.8
	Áreas de apoyo a la producción agropecuaria	35	1.2	1
	Áreas de producción agropecuaria	30	0.8	0.7
	Arroz	30	0.8	0.8
	Café	30	0.9	1
	Caña de Azúcar	25	0.8	0.8
	Cítrico	25	0.8	0.7
Agropecuaria	Frutales	25	0.8	0.7
	Granos, Tubérculos y Raíces	25	0.8	0.3
	Otros cultivos temporales	30	0.8	0.6
	Otros cultivos permanentes	25	0.8	0.7
	Pastos y Forrajes	30	1.2	0.9
	Superficie no apta para la agricultura	25	0.8	0.4
	Superficie de uso Forestal	15	0.8	0.3

peligrosa) y solamente 6 de las actividades catalogadas puede decirse que tengan una baja probabilidad de contaminación, concretamente, el área ociosa o deficientemente explotada, superficie de uso forestal, frutales, granos, tubérculos y raíces, pastos y forrajes, y superficie no apta para la agricultura por lo que han sido evaluados con un valor que va desde 0.3 hasta 0.6.

Otras de actividades que se ha evaluado con un valor 0.7 para áreas de apoyo a la producción agropecuaria, caña de azúcar, cítrico y otros cultivos temporales; para los valores de 0.8 se encuentran otras instalaciones o inmuebles, viales e instalaciones del transporte, áreas de producción agropecuaria y café; y para valores de 0.9 se agrupan dentro de área industrial o de explotación minera y otros cultivos permanentes estas actividades tienen una mayor probabilidad de ocurrencia de contaminación.

El valor 1 indica que las medidas de protección o bien son inexistentes, como ocurre en el caso de la hidrografía, en los asentamientos poblacionales y en el arroz o bien no presentan un sistema de control que garantice su

funcionamiento correcto frente a un evento de contaminación de aguas subterráneas.

Interpretación del índice de peligrosidad: HI

El mapa de peligrosidad se obtuvo a partir de la multiplicación de los tres factores (H, Qn y Rf). En el mismo se observan zonas de Moderada, Baja y Muy Baja peligrosidad.

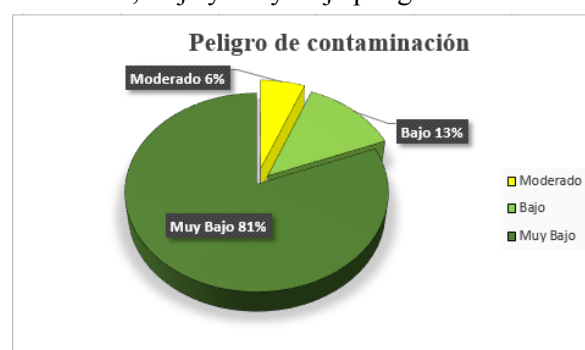


Figura 5. Porcentaje que ocupa cada clase del índice de peligro en el acuífero Vento.

En el área, predominan los peligros muy bajos (81 %) y en esta clase se agrupan las áreas ociosas o deficientemente explotadas, otras instalaciones o inmuebles, superficie de uso forestal, áreas de apoyo a la producción agropecuaria, áreas de producción agropecuaria,

arroz, café, caña de azúcar, cítrico, frutales, granos, tubérculos y raíces, otros cultivos temporales, pastos y Forrajes, superficie no apta para la agricultura, donde el grado de nocividad de los contaminantes es inferior a la media. En el caso de área ociosa o deficientemente explotada y otras instalaciones o inmuebles la probabilidad de que ocurra un evento de contaminación es baja.

Las zonas donde las clases de peligrosidad son Bajos (13 %) están representados por infraestructura del desarrollo urbano, mayormente por los asentamientos poblacionales y en menor área por viales e instalaciones de transporte y cultivos permanentes. La probabilidad de ocurrencia de un evento de contaminación en los asentamientos poblacionales es elevada, así como la cantidad de contaminantes que podrían ser vertidos. En el caso de viales e instalaciones de transporte la probabilidad de ocurrencia de un evento de contaminación es media y el principal factor que influye en la reducción de la peligrosidad es la intensidad; en los cultivos permanentes la intensidad del contaminante incrementa el grado de peligrosidad donde la probabilidad de ocurrencia de un evento de contaminación es alta. La nocividad de los contaminantes es superior a la media para los asentamientos poblacionales y para viales e instalaciones de transporte; y los cultivos permanentes se encuentran inferior a la media.

Los peligros Moderados (6 %) se encuentran con muy poca distribución en la zona de estudio, representados por las áreas industriales o explotación minera y la hidrografía. Las áreas industriales o explotación minera y la hidrografía presentan una mayor peligrosidad que el resto de actividades como consecuencia de la mayor nocividad de los compuestos orgánicos. La elevada nocividad o toxicidad de esta fuente motiva que la peligrosidad no se reduzca en función de la intensidad.

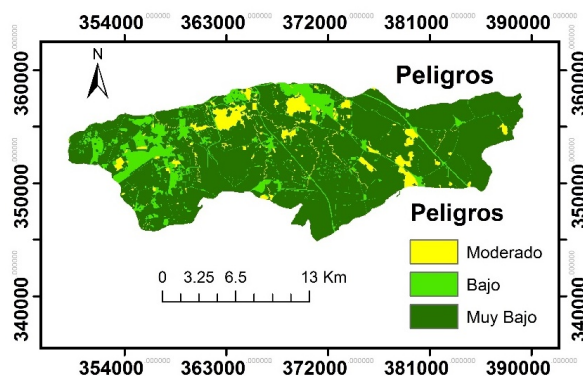


Figura 6. Mapa de Peligros de contaminación del acuífero Vento.

Evaluación del Riesgo de contaminación del Acuífero cársico de Vento

El mapa de escenarios de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero cársico de Vento se realizó mediante la suma del mapa de vulnerabilidad y el de peligro de contaminación. De esta manera, se obtuvo un mapa que muestra el estrés a que están sometidas las aguas subterráneas en una región.

El coeficiente de determinación, muestra que el riesgo de contaminación del acuífero Vento está influenciado por su vulnerabilidad intrínseca, pues las clases de riesgo presentan un muy bajo coeficiente de determinación. Esto implica que, para planificar cualquier actividad en el área, sea cual sea el potencial contaminante que esta genere, se debe tomar en consideración la vulnerabilidad que presenta el área donde se pretende desarrollar (tabla 6).

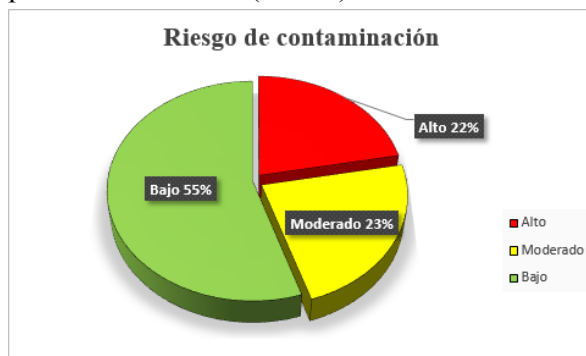


Figura 7. Porcientos de cada clase de riesgo.

Tabla 5. Coeficiente de determinación entre el peligro, la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación.

Coeficiente de determinación			
Capa	Vulnerabilidad	Peligro	Riesgo
Vulnerabilidad	1.00	0.20	0.74
Peligro	0.20	1.00	0.58
Riesgo	0.74	0.58	1.00

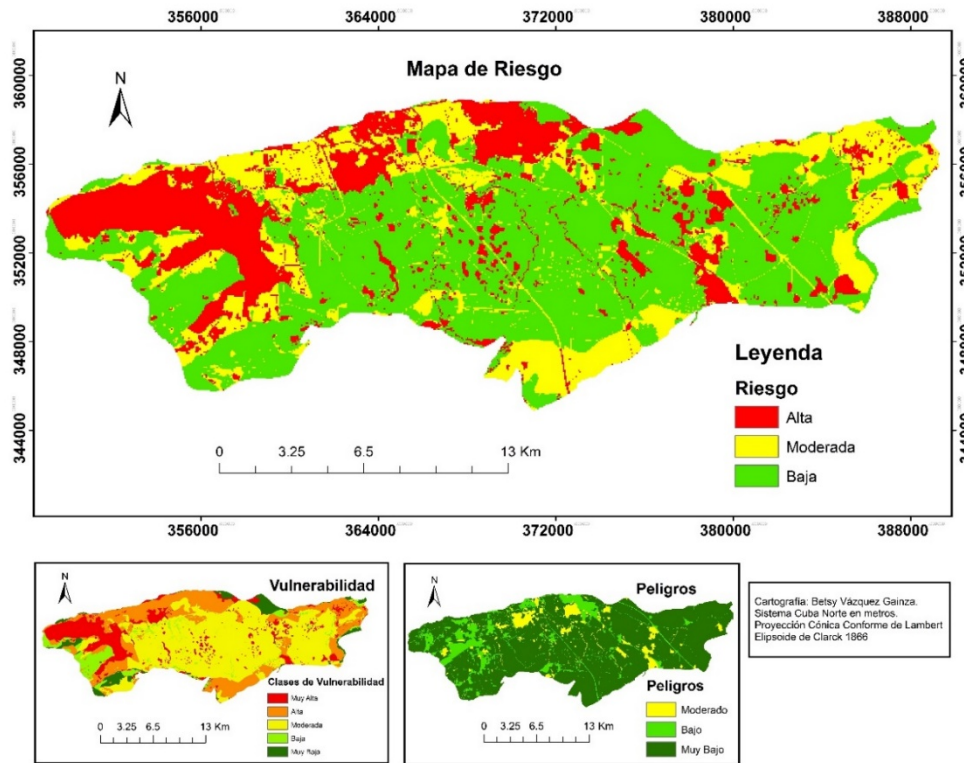


Figura 8. Mapa de Riesgos de contaminación del acuífero Vento.

El Alto riesgo de contaminación abarca un área de (22 %) y se encuentra en zonas donde una alta y muy alta vulnerabilidad, asociado a actividades que generan peligros moderados a bajos. Estas actividades son generalmente áreas industriales o explotaciones mineras e hidrográficas.

Las zonas Moderadas abarcan un área de (23 %) representada, donde las clases de vulnerabilidades son altas y el grado de peligrosidad es de bajo a muy bajo donde hay un predominio del desarrollo de los asentamientos poblacionales y superficies de uso forestal.

La zona con Bajo riesgo de contaminación se encuentra representando la mayor parte del área de estudio con un (55 %) donde existen clases de vulnerabilidades de moderadas a muy bajas y un grado de peligrosidad muy bajo con desarrollo generalmente de las actividades agropecuaria.

CONCLUSIONES

1. El 75 % del acuífero Vento presenta vulnerabilidades Moderadas y Altas (50 y 25 respectivamente) distribuyéndose principalmente en la zona central del polje y las zonas de descarga del acuífero. Vulnerabilidades muy altas se encuentran asociados a los cuerpos de agua (embalses y

ríos) y a los campos de dolinas. Las vulnerabilidades muy bajas están asociadas a complejos principalmente de tipo terrígeno, sobre los cuales se desarrolla principalmente suelos arcillosos.

2. La evaluación de los peligros muestra que en el área no se desarrollan actividades muy contaminantes, pues predominan los usos agrícolas, lo cual le manifiestan un Muy Bajo peligro de contaminación (81 %). Los peligros bajos se encuentran asociados a infraestructuras humanas, especialmente redes de transporte, algunos sectores residenciales y zonas ociosas. Los peligros Moderados se relacionan a los cuerpos de agua superficial y el resto de las infraestructuras de desarrollo urbano, especialmente con deficiente sistema de alcantarillado y de gestión de residuales.
3. Poco más de la mitad del acuífero tiene un Bajo riesgo de contaminación (55%), sin embargo, en zonas cercanas a la fuente de abasto, los riesgos son Moderados (23 %) y Altos (22 %).
4. El análisis estadístico aplicado a los mapas resultantes muestra que el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas

depende directamente de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero Vento y que es independiente de la naturaleza del contaminante, esto implica que, para planificar cualquier actividad antrópica, es necesario disponer de un mapa de vulnerabilidad debidamente validado para proteger adecuadamente sus recursos hídricos subterráneos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, D. Y.; Bautista, F. & Delgado, C. 2013. Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos Tropical and Subtropical Agroecosystems. 16 (2): 243-263.
- Albinet, M.; Margat, J. 1970. Cartographie de la vulnerabilité a la pollution des nappes d'eau souterraines. Bull BRGM 2e me serie 3(4):13-22.
- Aldana, C.; Farfán, H.; Molerio, L.; Parise, M. 2007. Self-purification capability of the course or underground water in tropic humid karst mountain. Result of a tracer experiment in the Gran Caverna de Santo Tomás. Geophysical Research Abstracts, EGU Assembly, Viena, Vol.9, 01841.
- Andreo, B.; Ravbar, N.; Vías, J.M. 2009. Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers by extension of the COP method: application to pilot sites. Hydrogeol J 17:749-758.
- Colectivo de autores. 2013. Léxico Estratigráfico de Cuba. La Habana, Cuba: Instituto de Geología y Paleontología.
- Cuevas-Ojeda, J. L. *et.al.* 2011. Una aproximación al estado actual del medio ambiente en la cuenca hidrográfica Almendares - Vento. SIG. IX CONGRESO CUBANO DE GEOLOGÍA (GEOLOGIA '2011), pp. 19.
- Daly, D. *et al.* 2002. Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. Hydrogeol J 10:340-345.
- Díaz-Guanche, C.; Aldana-Vilas, C.; Farfán-González. 2013. Mapping groundwater vulnerability in Guanahacabibes National Park, western of Cuba. En: / Farfán H; Corvea J. L.; de Bustamante I; LaMoreaux J. W. 2013. Management of water resources in protected areas. Springer-Verlag. Heidelberg/Berlin. 87-94p.
- Drew & Hötzl (eds). 1999. Karst Hydrogeology and human activities. Impacts consequences and implications. International contributions to Hydrogeology N° 20. Balkema/Rotterdam/Brookfield. 322 p.
- Ducci, D. 2000. Intrinsic vulnerability of the Alburni karst system (southern Italy). Geol Soc Lond Spec Publ 279:137-151.
- Evaluación de Recursos Naturales, SA (EVREN). 1998. Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas por actividades urbanísticas en la comunidad Valenciana. Valencia, 70p., ISBN: 84-482-1621-0.
- Farfán, H. 2003. Régimen de flujo y sus dominios temporales en el acuífero cársico Vento. *Facultad de Geografía, Universidad de La Habana*
- Farfán, H.; Rodríguez, Y. & Díaz, J.E. 2009. Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas de la cuenca del Arroyo de Santo Tomás, Viñales, MAPPING No. 137: 60-64.
- Farfán, H. 2010. Evaluación de los recursos hídricos del Parque Nacional Viñales, Cuba. Tesis de Maestría, Universidad de Alcalá.
- Farfán, H.; Corvea, J.L. & De Bustamante, I. 2010. Zonas de Protección de las aguas subterráneas de la cuenca del arroyo de Santo Tomás, Parque Nacional Viñales, Cuba. En: Goy JL.; Cruz R.; González, A.; Graña, A.; Cabero A (eds). Geomorfología y geología ambiental aplicadas a la gestión de espacios naturales protegidos. Dpto. Geología. Univ. Salamanca, España: (113-117).
- Farfán, H.; Corvea, J.L. & Martínez, Y. 2011. El uso de la teledetección y el análisis SIG en la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación de los acuíferos del Parque Nacional Viñales, Cuba. En: Las aguas subterráneas: desafíos de la gestión para el siglo XXI. Zaragoza, España.
- Farfán, H.; Corvea, J. L.; De Bustamante, I. & LaMoreaux J. W. 2013. Management of water

- resources in protected areas. Springer-Verlag. Heidelberg/Berlin. ISBN 978-3-642-16329-6. ISBN 978-3-642-16330-2 (eBook). DOI 10.1007/978-3-642-16330-2.
- Farfán, H.; Corvea, J. L.; de Bustamante, I.; LaMoreaux, J. W. & Molerio L. F. 2013. Management of water resources in protected areas: An Introduction. En: / Farfán, H; Corvea J. L; de Bustamante I; LaMoreaux J. W .2013. Management of water resources in protected areas. Springer-Verlag. Heidelberg/Berlin. v-viii.
- Farfán, H.; Corvea J.L. & De Bustamante, I. 2013. Assessment of Groundwater Protection Zones at the Viñales National Park, Cuba. En: / Farfán H ; Corvea J. L ; de Bustamante I ; LaMoreaux J. W . 2013. Management of water resources in protected areas. Springer-Verlag. Heidelberg/Berlin. 103-111.
- Farfán-González. & Plagnes, V. 2013. First Outcomes in the Application of PaPRIKA Method to Assess Aquifer Vulnerability in Tropical Karst Mountain: Santo Tomás Watershed: Viñales National Park, Cuba. En: / Farfán H ; Corvea J. L ; de Bustamante I ; LaMoreaux J. W . 2013. Management of water resources in protected areas. Springer-Verlag. Heidelberg/Berlin. 95-102.
- Farfán, H.; Corvea, J.L. & De Bustamante, I. 2014. First outcomes in the definition of groundwater protection zones at the Viñales National Park (Cuba) and surrounding area. Environmental Earth Sciences. (71)1: 3-11.
- Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. En W. Van Duijvenbooden and H.G. Van Waegeningh (Eds), Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. Proceedings and information n° 38, TNO Committee on hydrological research. The Hague, pp. 69-86.
- Foster, S.; Hirata, R. & Andreo, B. 2013. The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? Hydrogeol J 21:1389-1392.
- González, G. I.2014. Contribución a la hidrogeología del manantial “La Pimienta” (Minas de Matahambre) mediante la aplicación de trazadores naturales. Tesis de Pregrado, Departamento de Geología. Universidad de Pinar del Rio, 88p.
- Jiménez, R.R. 2011. Estudio de la vulnerabilidad natural de acuíferos de la Región Acuífera noreste de Villa Clara. IX CONVENCION CUBANA DE CIENCIAS DE LA TIERRA, (GEOCIENCIAS'2011), pp.4.
- Kufs, P.G. 1992. Statistical models of hydrogeologic data e part 1: regression and AANOVA models. Groundwater Monitoring Review 12 (2), 120-130.
- Molerio, L.F. & Parise, M. (2009): Managing environmental problems in Cuban karstic aquifers. Env. Geology. 58 (2): 275-283.
- Nguyet, T.M. & Goldscheider, N. (2006). A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk, and its first application in a tropical karst area, Vietnam. Hydrogeol J 14:1666-1675.
- Ravbar, N. 2007. The protection of karst waters: a comprehensive Slovene Approach to vulnerability and contamination risk mapping. Karst Research Institute at ZRC SAZU. Carsologica 6, Ljubljana, 254 p.
- Ravbar, N. & Goldscheider, N. 2007. Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. Acta Carsol 36:397-411.
- Ravbar, N. & Goldscheider, N. 2009. Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment. Hydrogeol J 17:725-733.
- Vías, J.M. 2002. Preliminary proposal of a method for contamination vulnerability mapping in carbonate aquifers. En: Carrasco, F.; Durán, J.J. y Andreo, B. (Eds.), *Karst and Environment*. Fundación Cueva de Nerja, Málaga, pp. 75-83.
- Vías, J.M. 2005. Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del sur de España. Tesis Doctoral, España: Universidad de Málaga.

- Vías, J.M.; Andreo, B.; Perles, M.J. & Carrasco, F. 2005. A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions. *Environ Geol* 47:586-595.
- UNESCO. 2012. WWAP (World Water Assessment Programme). The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. Paris: pp.866.
- Vías, J.M. 2006. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. *Hydrogeol J* 14:912-925.
- Zwahlen, F. 2004. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, final report (COST action 620). European Commission, Directorate-General XII Science, Vol 297.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.
Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)