

Riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la cuenca Almendares–Vento, Cuba

Oscar Suárez González

e-mail: oasuarezg@gmail.com

Empresa Militar de Proyectos e Investigación, EMPI, La Habana, Cuba.

Rosa María Valcarce Ortega

e-mail: rosy@tesla.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE, La Habana, Cuba.

Marina Vega Carreño

e-mail: mvega@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE, La Habana, Cuba.

Willy Rodríguez Miranda

e-mail: willy@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE, La Habana, Cuba.

RESUMEN

Para la ciudad de La Habana la cuenca Almendares – Vento presenta gran importancia porque sus aguas subterráneas aportan el 47% del total de abasto de agua planificado. Por esta razón conocer el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en esta cuenca fue el objetivo principal de la investigación. Para ello, integrando el mapa de vulnerabilidad natural de esta cuenca obtenido por el método RISK, y el mapa de índice de peligrosidad de las fuentes contaminantes elaborado según la metodología desarrollada por el Grupo Acción COST 620, se obtuvo el mapa de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas a escala 1: 100 000. Los resultados mostraron que predomina un nivel de riesgo moderado y bajo, aunque se definieron sectores de alto y muy alto riesgo de contaminación.

Palabras clave: Acción COST 620, acuíferos cársticos, cuenca Almendares – Vento, riesgo de contaminación de las aguas subterráneas

Groundwater contamination risk in the Almendares–Vento basin, Cuba

ABSTRACT

The Almendares - Vento basin is of great importance for the Havana city, because its groundwater contributes 47% of the total planned water supply. For this reason, the main objective of the research was know the risk of groundwater contamination in this basin. It was make the map of contamination risk of groundwater at a scale of 1: 100 000, integrating the map of natural vulnerability of this basin obtained by the RISK method, and the map of the hazard index of polluting sources prepared according to the methodology developed by the COST Action 620. The results show that a moderate and low risk level predominates, although were defined sectors with high and very high risk of contamination.

Keywords: COST Action 620, karst aquifers, Almendares - Vento basin, risk of groundwater contamination.

INTRODUCCIÓN

El aumento sostenido de la población a nivel mundial, y con ello el incremento de la actividad agrícola e industrial, demanda el consumo de mayores volúmenes de agua. En este escenario no resulta casual que se incrementen las fuentes contaminantes y se precise el desarrollo de investigaciones dirigidas a evaluar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, las que en muchos lugares aportan un alto por ciento del volumen total del agua que se consume o, incluso, constituyen la única fuente de abasto.

En la ciudad de La Habana las aguas subterráneas representan el 68% de su potencial hídrico, y la cuenca Almendares – Vento aporta el 47% del volumen total del agua que se consume (Herrera et al. 2004). Estos datos evidencian la necesidad ineludible de prevenir la contaminación de sus aguas subterráneas y han sido el motivo de la presente investigación, que se ha planteado como objetivo general evaluar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas de la cuenca Almendares – Vento.

Según Zwahlen (2003), riesgo es un término usado para denotar la probabilidad de sufrir daño frente a un peligro. Con respecto al agua subterránea, el riesgo se refiere a la posible contaminación como resultado de un evento peligroso. Entonces, la evaluación del riesgo, o el análisis del riesgo, es un procedimiento para estimar el impacto potencial de un agente químico, biológico o físico en las aguas subterráneas. Ese procedimiento incluye identificar los peligros existentes o potenciales y las vías de exposición del acuífero a la contaminación, proporcionando la información necesaria para tomar medidas que permitan proteger este importante recurso.

Para evaluar el peligro es necesario tener en cuenta la toxicidad y la cantidad de sustancias nocivas de cada fuente de contaminación, por lo que resulta imprescindible elaborar, de la manera más detallada posible, el inventario de fuentes potencialmente contaminantes, lo que comprende su caracterización y ubicación espacial. Por otra parte, para analizar las vías de exposición a la contaminación, es necesario elaborar el mapa de vulnerabilidad natural del acuífero, el cual refleja la mayor o menor protección que ofrece el medio físico al agua subterránea contra las actividades antrópicas susceptibles de contaminar.

En Zwahlen (2003) se describe la metodología desarrollada por el Grupo Acción COST 620 para determinar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en acuíferos cársticos. Esta metodología ha sido aplicada con buenos resultados por varios investigadores en diferentes lugares del mundo, entre ellos, Jiménez et al. (2010) en los acuíferos carbonatados de la Sierra de Cañete, España, Palomino (2013) en Perú y González et al. (2018) en acuíferos carstificados de la Península de Yucatán, México.

La situación ambiental de la cuenca Almendares – Vento ha sido objeto de muchas investigaciones. Se reconoce que los principales cuerpos de agua superficiales en esta cuenca son receptores de la alta carga contaminante que generan la urbanización, el desarrollo agrícola e industrial, destacándose en este sentido la afectación a su principal río, el Almendares, y a sus afluentes, así como a los arroyos y embalses superficiales entre los que destaca la Presa Ejército Rebelde destinada a la recarga de la cuenca (Herrera et al. 2004), (Peralta et al. 2005).

Muy importantes son los resultados de Cuevas (2011), quien demuestra la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por el vertimiento de residuales líquidos y sólidos, tanto

urbanos como industriales, deficientemente tratados o sin tratamiento alguno; los problemas que ocasionan la deforestación y erosión de los suelos, unido a la insuficiencia de alcantarillado y de lagunas de oxidación, redes de drenaje en mal estado técnico y poca existencia de plantas de tratamientos. Esa investigación logra definir zonas de alta y muy alta contaminación por metales pesados a partir del estudio de las direcciones de los flujos por escurrimiento superficial y propone medidas para mitigar la vulnerabilidad al fenómeno de las inundaciones. Sin embargo, no se evaluó la vulnerabilidad intrínseca de la cuenca ni el riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas.

Díaz et al. (2019) mediante técnicas nucleares demuestran la elevada contaminación de las aguas y sedimentos del río Almendares y sus afluentes. También concluyen que en muchos sectores los suelos urbanos, agrícolas e industriales de la cuenca presentan contaminación por metales pesados entre mediana y severa. En tal sentido se destacan las investigaciones de Pedroso (2019) quien estudió la relación existente entre parámetros magnéticos y la concentración de siete elementos pesados (Cr, Fe, Ni, Mn, Cu, Zn y Pb) en muestras de suelo de esta cuenca, demostrando altos niveles de contaminación y en particular elevada toxicidad por contenido de Pb y de Cr, y en fincas que utilizan como fuente de riego las aguas del río Almendares, señaló la elevada concentración de Mn y Pb. Estos resultados se corresponden con la presencia en la cuenca de numerosas fuentes de contaminación industrial como fundiciones, siderurgia, fábrica de pintura, fábrica de baterías, vertederos de residuales municipales sólidos y líquidos, zonas agrícolas con uso de herbicidas y fertilizantes.

Se destacan también las investigaciones de Vázquez et al. (2019) quienes evaluaron el riesgo de contaminación del agua subterránea aplicando la metodología descrita en la Acción COST 620. Según estos autores, en la cuenca predomina una moderada vulnerabilidad intrínseca a la contaminación y un bajo riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, resultados que no se corresponden con los que se muestran en la presente investigación.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS E HIDROGEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca Almendares-Vento es una cuenca de interés nacional ubicada en las coordenadas planas X: 347850 - 391550 m e Y: 342649 - 367 686 m. En ella están presente diez municipios de la provincia La Habana: Playa, Plaza de la Revolución, Centro Habana, Habana Vieja, Cerro, Diez de Octubre, Marianao, Boyeros, Arroyo Naranjo y Cotorro; y tres municipios de la provincia Mayabeque: Bejucal, Jaruco y San José de las Lajas (figura 1).

Limita por su extremo norte con las Lomas de San Francisco de Paula y el Lomerío de Santa María del Rosario, por su extremo este con las Escaleras de Jaruco, por su lado sur con las Alturas de Bejucal-Madruga-Coliseo, y por el oeste con las cercanías de la desembocadura del río Almendares y las terrazas marinas emergidas del límite costero norte de los municipios Playa y Plaza de la Revolución.

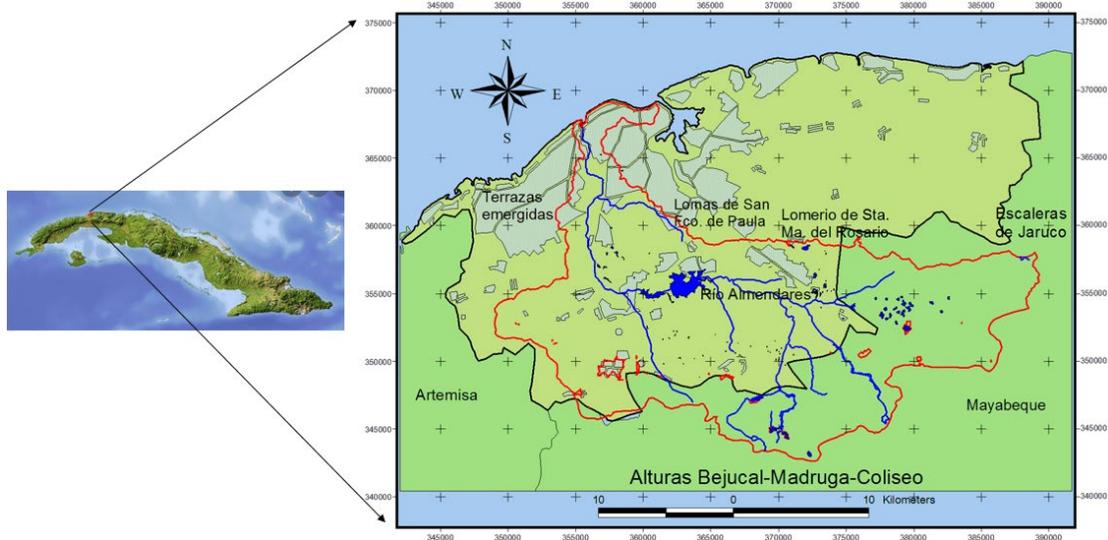


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca Almendares-Vento (elaborada por los autores)

La cuenca subterránea es de gran importancia para el abasto de agua a la ciudad capital. Está desarrollada fundamentalmente sobre las rocas de las formaciones Güines y Cojímar, que se caracterizan por presentar muy alta permeabilidad debido a su composición carbonatada y elevado desarrollo de procesos de carstificación, siendo las calizas de la formación Güines las que constituyen el acuífero.

Los recursos explotables de esta cuenca hidrogeológica están calculados en 287 millones de m³/año. La red hidrográfica está compuesta principalmente por el río Almendares y sus afluentes, los cuales transitan por su zona central. El territorio de la cuenca se puede dividir en dos grandes regiones, la cárstica y la no cárstica; su relieve está representado por llanuras fluviales acumulativas y erosivo acumulativas, ligeramente onduladas y planas. Las formas llanas del relieve constituyen la mayor parte de la cuenca, exceptuando las elevaciones periféricas que sirven de parteaguas generales (Cuevas 2011).

Más del 16% del área total de la cuenca está urbanizada, con una población aproximada de 823 129 habitantes. De acuerdo a las características urbanísticas de los municipios que la integran se distinguen tres áreas: una al norte, donde predomina la urbanización compacta (municipios Playa, Plaza, 10 de Octubre y Cerro); una intermedia caracterizada por urbanizaciones fragmentadas con un carácter mixto, donde existen tanto la urbanización compacta como asentamientos rurales (municipios Boyeros, Arroyo Naranjo, Cotorro y Marianao); y un área al sur perteneciente a la provincia Mayabeque (municipios San José de las Lajas, Jaruco y Bejucal), en los que predominan las áreas no urbanizadas a pesar de poseer en algunos casos un gran desarrollo industrial, como es el caso del municipio San José de las Lajas. Estos últimos municipios son fundamentalmente rurales con asentamientos poblacionales dispersos (Cuevas 2011).

En la cuenca existe un gran desarrollo de actividades industriales destacándose la industria química, farmacéutica, alimentaria y siderúrgica, así como actividades agropecuarias y múltiples servicios a la población, con varios hospitales, centros educacionales, parques, hoteles, centros

culturales y un importante desarrollo del transporte que incluye varias carreteras y al principal aeropuerto internacional del país.

El desarrollo urbano y la intensa actividad productiva y de servicios han provocado en la cuenca el incremento de su contaminación potencial, lo que unido a su gran importancia dicta la necesidad de su saneamiento y protección.

METODOLOGÍA DE TRABAJO EMPLEADA PARA EVALUAR EL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE LA CUENCA

Para evaluar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la cuenca Almendares - Vento fue empleada la metodología desarrollada por los investigadores europeos del Grupo Acción COST 620 (Zwahlen 2003). Para ello se desarrolla un procedimiento que integra el mapa de vulnerabilidad natural de la cuenca y el mapa de índice de peligrosidad de las fuentes contaminantes localizadas sobre su superficie. La figura 2 presenta un esquema de la metodología aplicada para la evaluación del riesgo de contaminación.

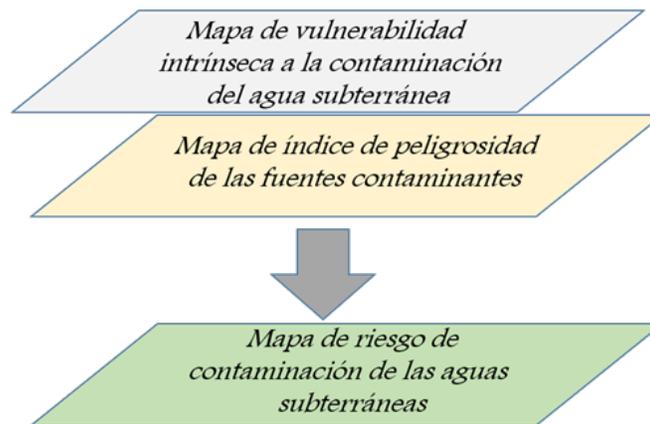


Figura 2. Esquema de la metodología aplicada para la evaluación del riesgo de contaminación en la cuenca Almendares – Vento (elaborada por los autores)

A continuación, se explican los pasos seguidos:

Paso 1: Se empleó el mapa de vulnerabilidad natural de la cuenca, obtenido por Valcarce et al. (2020), el que fue elaborado aplicando el método paramétrico de rangos ponderados RISK. Este método, desarrollado por Dörfliger et al. (2004), permite evaluar la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos cársticos empleando cuatro parámetros: roca del acuífero (R), condiciones de infiltración (I), cubierta o suelo protector (S) y karstificación (K). La tabla 1 resume los criterios para evaluar cada uno de estos parámetros.

Después de clasificados los parámetros se obtiene un índice global de vulnerabilidad para cada celda del mapa mediante la expresión (1).

$$RISK = 0.15R + 0.4I + 0.25S + 0.2K \quad (1)$$

Tabla1. Definición de cada criterio según el método RISK. [fuente: (Dörfliger et al. 2004)]

Parámetros	Definición
R	Roca del acuífero, refleja la naturaleza de las formaciones geológicas y su fracturación. Este parámetro tiene una gran influencia en el tipo de circulación subterránea y, por lo tanto, en la velocidad de transferencia de un contaminante en el acuífero. Se clasifica en cinco clases y se le asigna una puntuación entre 0 y 4 puntos, de menos a más vulnerable.
I	Condiciones de infiltración . Toma en cuenta la pendiente topográfica (a mayor pendiente topográfica predomina la escorrentía sobre la infiltración) y la presencia de formas kársticas superficiales que favorecen la infiltración directa. Considera también la presencia de fallas tectónicas como elementos que incrementan la permeabilidad de las rocas y la infiltración potencial de los fluidos. Se clasifica en cinco clases y se le asigna una puntuación entre 0 y 4 puntos, de menos a más vulnerable.
S	Suelo y cubierta protectora. Las formaciones que cubren las rocas del acuífero tienen un papel esencial en relación con su vulnerabilidad. El criterio S depende del espesor del suelo, su textura (guijarros, matriz, etc.), su composición (arcillas, limos, arenas). Se clasifica en cuatro clases y se le asigna una puntuación entre 1 y 4 puntos, de menos a más vulnerable.
K	Karstificación . Evalúa el desarrollo de la red kárstica subterránea. En las zonas de pérdida el índice K elegido es 4 porque se considera que los flujos superficiales infiltran fácilmente en una red kárstica muy desarrollada. Se clasifica en cinco clases y se le asigna una puntuación entre 0 y 4 puntos, de menos a más vulnerable.

La tabla 2 presenta la clasificación del índice de vulnerabilidad por el método RISK. A partir de los resultados obtenidos cada celda se elabora un mapa raster del índice RISK que refleja la vulnerabilidad intrínseca de la cuenca según estos parámetros.

Paso 2: Fue realizado el inventario de peligros que amenazan la calidad de las aguas subterráneas de la cuenca. Para ello se contó con el inventario de fuentes puntuales de contaminación realizado en el año 2018 por la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de La Habana. Este inventario identifica 71 fuentes contaminantes de tipo doméstico, industrial y agropecuario, presenta su ubicación geográfica, la categoría asignada según la intensidad del peligro que representa cada una y el cuerpo receptor de la contaminación. Se incluyeron las presiones que representan los asentamientos poblacionales con deficiente sistema de alcantarillado, las fuentes de contaminación lineales que representan las principales carreteras, las fuentes de contaminación difusas asociadas a las actividades agropecuarias y los cuerpos de agua superficiales que reciben residuales sólidos y líquidos con escaso o ningún tratamiento, como se recomienda en la Acción COST 620. Aunque pueden faltar algunas fuentes de contaminación aportadas por negocios particulares y actividades agropecuarias no formales, se

considera que las fuentes de contaminación más importantes han sido consideradas y la calidad de la información aportada por este inventario es adecuada y suficiente para cumplir los objetivos propuestos en esta investigación.

Tabla2. Clasificación del índice de vulnerabilidad por el método RISK.

[fuente: (Dörfliger *et al.* 2004)]

Rangos	Puntuación	Vulnerabilidad
0 – 0,79	0	Muy baja. Presencia de capas protectoras en las que el flujo vertical es insignificante.
0,8 – 1,59	1	Baja. Solo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados en forma amplia y continua durante largos períodos de tiempo.
1,6 – 2,39	2	Moderada. Vulnerable a algunos contaminantes solo cuando son continuamente descargados o lixiviados.
2,4 – 3,19	3	Alta. Vulnerable a muchos contaminantes excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados en muchos escenarios de contaminación
3,2 – 4,0	4	Muy alta. Vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación.

Paso 3: Cada fuente de contaminación fue evaluada según su grado de peligrosidad (H), asignando a cada una, valores entre 1 y 100 puntos. Esta puntuación fue asignada siguiendo los criterios del Comité de Expertos del Grupo Acción COST 620.

También para cada fuente de contaminación fue caracterizada la intensidad del peligro, o sea, la cantidad de sustancias nocivas que puede ser potencialmente descargada al acuífero. Para ello se asignó un factor de rango (Qn) que varía entre 0,8 y 1,2. El valor de Qn para cada fuente contaminante fue asignado según las categorías definidas por la Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos de La Habana, las cuales dependen del grado de solución al impacto provocado por la contaminación que cada fuente genera, según:

- Categoría I. Sin solución, que afecta gravemente y de manera comprobada a fuentes de abasto a la población, ocasionando el deterioro de la calidad del agua, ($Qn = 1,2$).
- Categoría II. Con solución, pero con peligro potencial demostrado, de alto o moderado riesgo de afectar fuentes de abasto a la población, ($Qn = 1$).
- Categoría III. Con solución o de escaso peligro. No necesita una vigilancia e inspección sistemáticas, solamente ocasionales, ($Qn = 0,8$).

Finalmente, a cada fuente de contaminación fue asignado un factor de reducción del peligro (Rf) para caracterizar la probabilidad de ocurrencia del evento de contaminación. Este factor varía entre cero y uno, y para su definición es necesario analizar el mantenimiento de las infraestructuras, el nivel técnico, medidas de seguridad en cada una de las fuentes contaminantes. En esta investigación, al no existir suficiente información, fue asignado $Rf = 1$ para todas las fuentes de contaminación, con el objetivo de no disminuir la peligrosidad de la actividad contaminante que pueden generar. Para el desarrollo de futuras investigaciones resulta necesario desarrollar estudios que permitan evaluar con precisión este parámetro para cada fuente de contaminación.

La tabla 3 presenta el inventario de peligros sobre la cuenca, grado de peligrosidad y factor de rango asignado a cada uno de ellos.

Tabla 3. Inventario de peligros presentes en la cuenca Almendares –Vento, grado de peligrosidad y factor de rango asignado (elaborada por los autores)

No.	Peligros	Grado de peligrosidad (H)	Factor de Rango (Qn)
1	Desarrollo de infraestructura		
1.1	Residuales líquidos		
1.1.1	Zona urbanizada	35	1,2
1.1.2	Descarga de aguas residuales en cursos de agua superficial	45	1,2
1.2	Residuos municipales		
1.2.1.	Rellenos sanitarios (vertederos)	50	1,2
1.3	Combustibles		
1.3.1	Tanques de almacenamiento de combustibles	55	1
1.4	Transporte		
1.4.1	Carreteras	40	1 – 1,2
1.4.2	Terminales de ómnibus	45	0,8 - 1
1.5	Instalaciones recreativas		
1.5.1	Parques (Zoológico Nacional, Jardín Botánico Nacional, Parque Lenin, EXPOCUBA)	45	1
2	Actividades industriales		
2.1	Plantas industriales		
2.1.1.	Hornos de fundición	40	0,8
2.1.2	Industria metalúrgica	50	1,2
2.1.3	Industria electrónica y galvanoplastia	50	1
2.1.5	Industria química y farmacéutica	65	1,2
2.1.6	Industria del caucho y neumáticos	40	1 – 1,2
2.1.7	Industria de alimentos	45	1,2
3	Actividad ganadera y agrícola		
3.1	Ganadería		
3.1.1.	Criaderos de cerdos	45	1,2
3.1.2	Granja industrial	30	1,2
3.1.3	Áreas de pastoreo	25	0,8
3.2	Agricultura		
3.2.1	Área agrícola	25	0,8
3.2.2	Superficies de uso forestal	15	0,8

Paso 4: Se calculó el índice de peligrosidad de cada fuente potencialmente contaminante (HI) según:

$$HI = H \times Q_n \times R_f \quad (2)$$

Donde:

HI: índice de peligrosidad de la fuente contaminante

H: grado de peligrosidad de la fuente contaminante

Q_n: intensidad del peligro o factor de rango de la fuente contaminante

R_f: factor de reducción del peligro

Este índice de peligrosidad calculado para cada fuente potencialmente contaminante puede variar entre un valor mínimo igual a cero y un valor máximo igual a 120, y fue clasificado según la tabla 4.

Tabla 4. Clasificación del índice de peligrosidad (HI) en categorías de peligrosidad.
[fuente: Zwahlen (2003)]

Índice HI	Clases	Denominación
0 - 24	1	Muy baja
25 - 48	2	Baja
49 - 72	3	Moderada
73 - 96	4	Alta
97 - 120	5	Muy alta

Paso 5: Fue realizada la representación espacial de todas las fuentes contaminantes con sus valores asignados de H y Qn (Suárez 2019) y fue aplicada la ecuación (2) para cada fuente contaminante para posteriormente generar en formato *ráster* el mapa de índice de peligrosidad (HI) en la cuenca (figura 3), empleando el sistema de información geográfico QGIS.

Paso 6: Se obtuvo el mapa de índice del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, multiplicando los mapas de índice de vulnerabilidad natural e índice de peligrosidad de las fuentes contaminantes, aplicándose la regla de decisión que se resume en la figura 3. Esta regla de decisión modifica ligeramente la propuesta por Zwahlen (2003).

		Índice de peligrosidad					Intensidad del riesgo	
		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto		
Clases de vulnerabilidad		1	2	3	4	5		
Muy baja	1	1	2	3	4	5		Muy bajo
Baja	2	2	4	6	8	10		Bajo
Moderada	3	3	6	9	12	15		Moderado
Alta	4	4	8	12	16	20		Alto
Muy alta	5	5	10	15	20	25		Muy alto

Figura 3. Combinación de las clases de vulnerabilidad e índice de peligrosidad para la evaluación de la intensidad del riesgo de contaminación (elaborada por los autores)

Se aprecia en esta figura, que para la combinación índice de peligrosidad bajo y clase de vulnerabilidad baja se clasifica la intensidad del riesgo moderada, lo cual es cuestionable. Sin embargo, considerando que a partir de los mapas de índice de peligrosidad y vulnerabilidad de la cuenca obtenidos no existen áreas donde esta combinación sea posible, se decidió asumir esta

regla de decisión que considera moderada la intensidad de riesgo entre 4 y 6. Ello se justifica porque para el resto de las combinaciones se logra evaluar la intensidad del riesgo de forma coherente, en correspondencia con el comportamiento de la vulnerabilidad del área de estudio y del índice de peligrosidad de las fuentes contaminantes. También en la selección de esta regla de decisión se tuvo en cuenta los daños que ocasionaría desde el punto de vista ambiental, social y económico, la degradación de la calidad de las aguas subterráneas en una cuenca que posee importancia de primer orden para el país.

ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD, PELIGROSIDAD DE LAS FUENTES CONTAMINANTES Y RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE LA CUENCA

Análisis de la vulnerabilidad natural de la cuenca

El mapa de vulnerabilidad natural obtenido al aplicar el método RISK (figura 4), muestra que solo el 1,6% de la cuenca presenta baja vulnerabilidad a la contaminación de sus aguas subterráneas. Existe un predominio de la alta vulnerabilidad que ocupa el 62,4% del área total y se localiza fundamentalmente en la parte central de la cuenca, lo que obedece a la existencia en esa zona de rocas carbonatadas karstificadas pertenecientes a la formación Güines, que le confieren un grado de vulnerabilidad mayor con respecto a otras zonas donde se describen formaciones carbonatadas más arcillosas. El 4% del área se clasifica de muy alta vulnerabilidad, coincidiendo con las zonas de infiltración directa (embalse Ejército Rebelde, dolinas, rocas fracturadas relacionadas con fallas tectónicas). El 32% restante se clasifica como de vulnerabilidad moderada y se ubica fundamentalmente al noroeste del área donde existen rocas con mayor grado de arcillosidad, y en zonas con pendientes topográficas elevadas que bordean la cuenca (parteaguas). No pudo ser evaluado un sector de la cuenca por ausencia de información en el mapa de suelos.

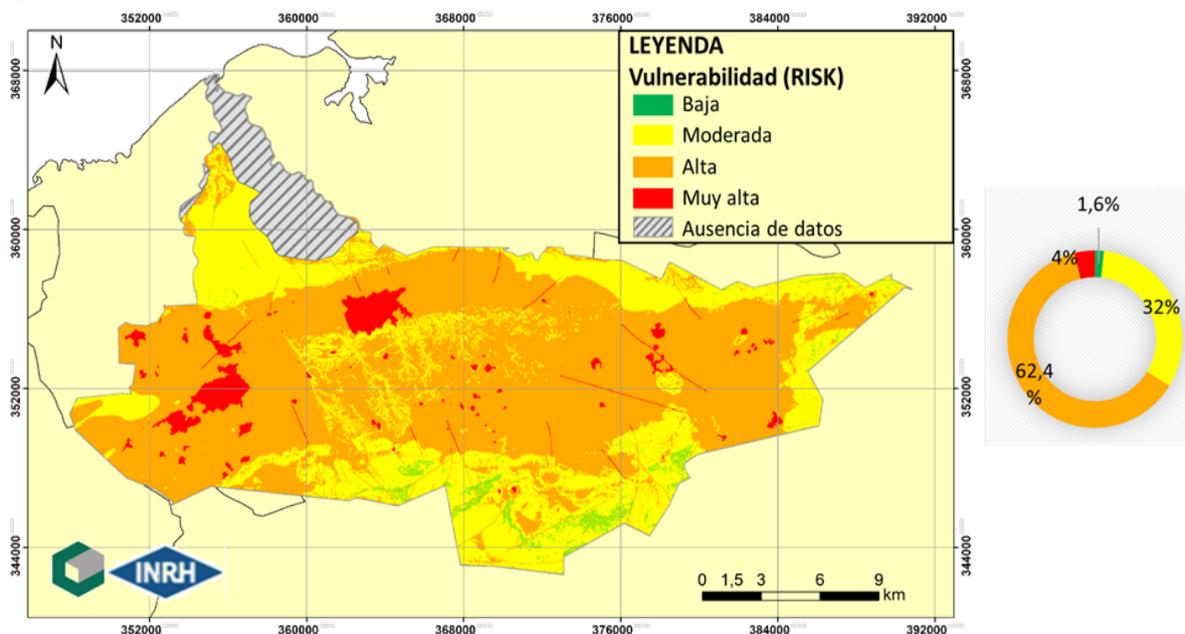


Figura 4. Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del agua subterránea en la cuenca Almendares-Vento (Valcarce *et al.* 2020)

Análisis del índice de peligrosidad de las fuentes contaminantes en la cuenca

En el área predomina un índice de peligrosidad muy bajo (76,7 %) y bajo (20,6 %), asociado fundamentalmente a zonas urbanizadas con sistema de alcantarillado deficiente o ausente, a las principales carreteras y avenidas, así como a zonas donde se desarrollan actividades agropecuarias, áreas de pastoreo y de uso forestal.

Los índices de peligrosidad moderada alcanzan el 2,5 % del área de la cuenca y se relacionan fundamentalmente con la industria alimentaria, como la fábrica de helados Coppelia, la fábrica de embutidos “La Española” y la cervecería “Guido Pérez”; también con los vertederos, tanques de almacenamiento de combustible en el aeropuerto internacional “José Martí”, y con los cursos de agua superficiales que son receptores de residuales, compuestos por el río Almendares y sus afluentes así como por la presa Ejército Rebelde.

La actividad industrial relacionada con procesos asociados a la metalurgia y siderurgia como la empresa Antillana de Acero “José Martí”, y la actividad industrial asociada a procesos químicos y farmacéuticos, como los laboratorios de sueros y hemoderivados de la empresa LABIOFAM y la fábrica de pinturas “Vicente Chávez”, presentan los mayores índices de peligrosidad y cubren el 0,2 % del área total (figura 5).

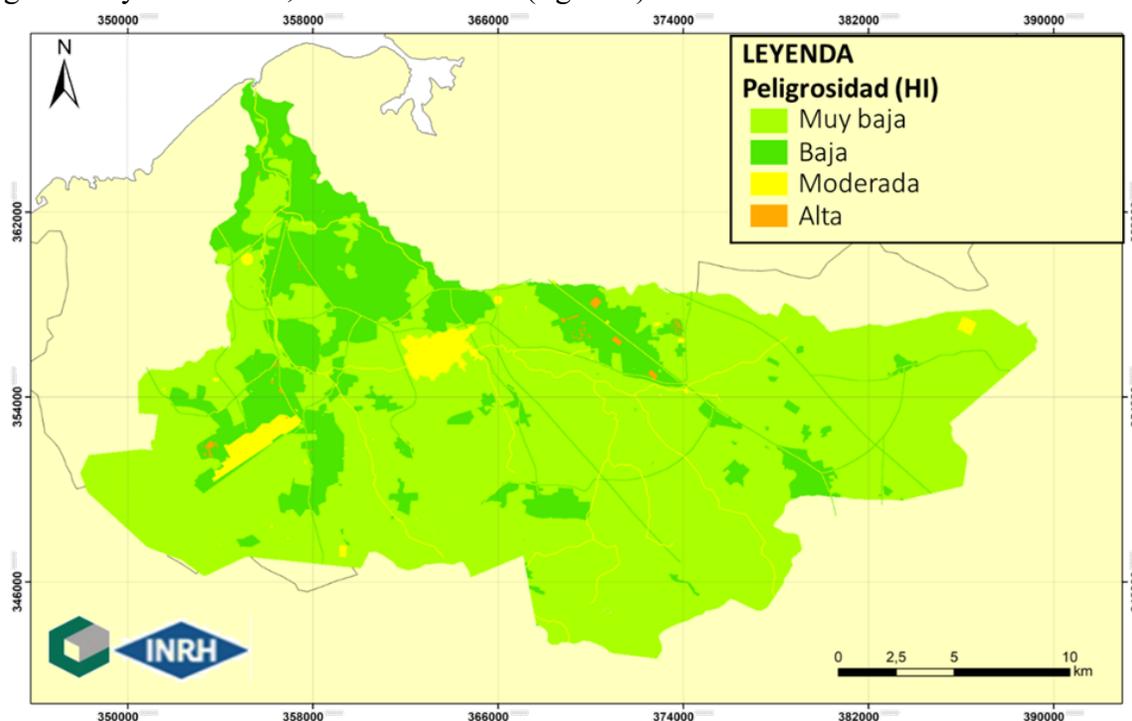


Figura 5. Mapa del índice de peligrosidad (HI) de las fuentes contaminantes presentes en la cuenca Almendares–Vento (elaborada por los autores)

Análisis del riesgo de contaminación en la cuenca

Los niveles de riesgo de contaminación del agua subterránea se evaluaron a partir de la regla de decisión mostrada en la figura 3, obteniéndose niveles de riesgo bajo, moderado, alto y muy alto.

En las zonas clasificadas de bajo riesgo se encuentran fundamentalmente áreas donde se desarrollan actividades agropecuarias, de pastoreo y de uso forestal. La mayor parte de esta zona coincide con áreas de vulnerabilidad moderada.

El riesgo de contaminación moderado se asocia también a zonas donde se desarrollan actividades agropecuarias, de pastoreo y de uso forestal; pero esta vez ubicadas en áreas de vulnerabilidad alta, en ese caso se encuentran también algunas de las principales carreteras y avenidas presentes en la cuenca.

Las actividades vinculadas a la industria de alimentos, los vertederos, hornos de fundición e industria del caucho y neumáticos provocan alto riesgo de contaminación. Este es el caso, por ejemplo, de la fábrica de quesos “Managua”, la empresa de la goma “Conrado Piña” y la empresa de fundición “Casio Martínez”. También clasifican como zonas de alto riesgo de contaminación aquellas áreas urbanizadas con sistema de alcantarillado deficiente o ausente emplazadas en zonas de vulnerabilidad alta.

El mayor riesgo de contaminación se asocia, en primer lugar, a la presa Ejército Rebelde y el aeropuerto internacional “José Martí”, que presentan moderada peligrosidad, pero se sitúan sobre zonas de infiltración directa, lo cual le confiere muy alta vulnerabilidad a la cuenca. También son evaluadas con muy alto riesgo de contaminación la actividad industrial relacionada con procesos asociados a la metalurgia y siderurgia, como la empresa Antillana de Acero “José Martí”; y la actividad industrial asociada a procesos químicos y farmacéuticos, como los laboratorios de sueros y hemoderivados de la empresa LABIOFAM y la fábrica de pinturas “Vicente Chávez”, todos estos se localizan en sectores de alta vulnerabilidad.

La figura 6 muestra el mapa de riesgo y se aprecia que las zonas de bajo riesgo ocupan el 26,6% del área total, la clase de riesgo moderado el 52,9%, la clase de alto riesgo el 12,9%, quedando el 1,7% con muy alto riesgo de contaminación.

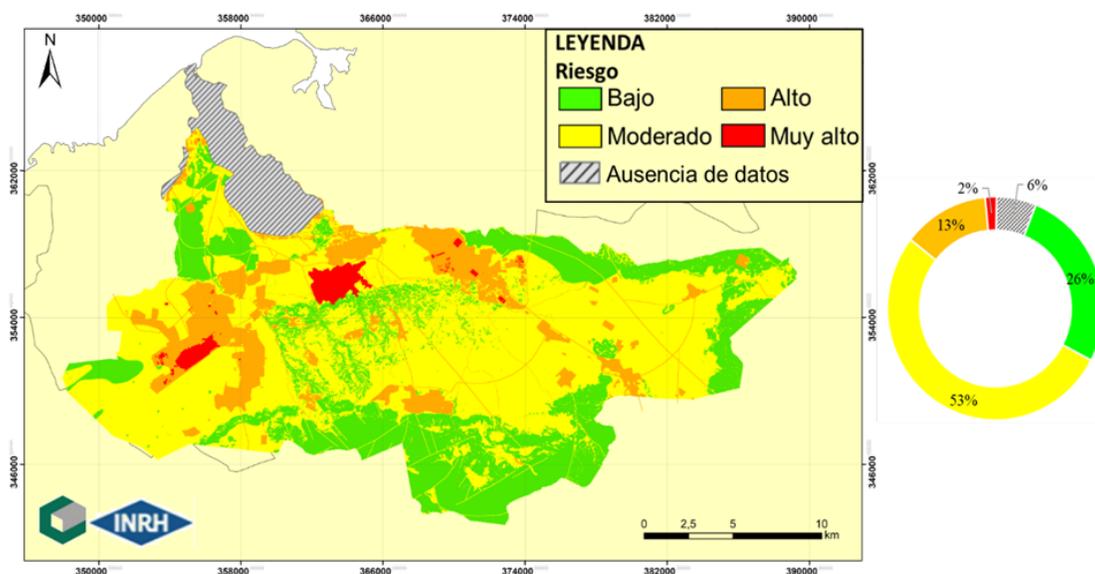


Figura 6. Mapa de riesgo de contaminación del agua subterránea en la cuenca Almendares–Vento (elaborada por los autores)

Este mapa de riesgo indica las zonas donde se deben concentrar los esfuerzos para disminuir los peligros y reducir la probabilidad de ocurrencia de eventos de contaminación que puedan degradar la calidad del agua subterránea.

Es importante señalar que en la medida que sean consideradas todas las fuentes de contaminación que existen en las áreas urbanizadas; por ejemplo, la acumulación de basura en las calles, los vertederos ilegales, la cría de animales, tanques sépticos, estaciones de gasolina, entre otros, esas áreas pueden representar un índice de peligrosidad mayor que el considerado en esta investigación. Todas esas fuentes de contaminación podrían ser inventariadas y analizadas en investigaciones a escalas más detalladas.

Los resultados aquí mostrados difieren de los reportados por Vázquez *et al.* (2019), quienes proponen un mapa de vulnerabilidad natural a la contaminación del agua subterránea que clasifica al 61% del área total de la cuenca con vulnerabilidad moderada, baja y muy baja, para un índice de vulnerabilidad global moderado. En la presente investigación, la vulnerabilidad obtenida por el método RISK refleja que las áreas clasificadas como moderada, alta y muy alta alcanzan el 98% con un índice de vulnerabilidad global alto, lo que resulta más coherente con la naturaleza cárstica de esta cuenca.

Por otro lado, Vázquez *et al.* (2019) clasifican el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en bajo, medio y alto, alcanzando el 78% las áreas que clasifican de moderado y bajo riesgo. En la investigación que aquí se presenta se obtiene un mapa con clases de bajo, moderado, alto y muy alto riesgo de contaminación, permitiendo una mayor diferenciación. Además, en contraste con los resultados de Vázquez *et al.* (2019), se clasifica la zona central de la cuenca con predominio de moderado y alto riesgo de contaminación.

En el futuro deben desarrollarse estudios que permitan validar los mapas obtenidos, así como ejecutar investigaciones a escalas más detalladas.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran que el índice de peligrosidad de las fuentes contaminantes presentes en la cuenca es muy bajo y bajo, pero existen también presiones puntuales y lineales de peligrosidad moderada y alta. Esta situación, unida a la vulnerabilidad natural del acuífero, que clasifica fundamentalmente como moderada y alta, y teniendo en cuenta el valor ambiental y económico de la cuenca para el desarrollo socio económico del país, provoca que el riesgo de contaminación del agua subterránea sea clasificado predominantemente de moderado, aunque en sectores de los municipios Boyeros y Cotorro se identifican zonas de alto y muy alto riesgo de contaminación. Estos resultados indican hacia dónde dirigir los esfuerzos para disminuir la peligrosidad y con ello el riesgo de contaminación.

Se recomienda continuar el desarrollo de investigaciones que permitan validar los mapas obtenidos, así como aplicar los procedimientos aquí presentados a escalas más detalladas. Solo de esa manera las autoridades podrán disponer de herramientas para implementar estrategias y políticas cada vez más eficientes, para garantizar que continúe siendo la cuenca Almendares – Vento la principal fuente de abasto a la ciudad capital de Cuba.

REFERENCIAS

- Cuevas J. L.** (2011). “Una aproximación al estado actual del medio ambiente en la cuenca hidrográfica Almendares-Vento. SIG y Multimedia”. Memorias de IX Congreso Cubano de Geología, ISBN 959-7117-11-8. Sociedad Cubana de Geología, La Habana, Cuba.
- Díaz O., Olivares S., Rudnikas A. y D’Alessandro K.** (2019). “Estudios de contaminación ambiental en La Habana mediante técnicas nucleares y conexas”. Nucleus, 55(3): 58-65, ISSN 0864-084X, Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías Avanzadas, La Habana, Cuba.
- Dörfliger N., Jauffret D. and Loubier S.** (2004). “Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche-Comté”. Rapport: BRGM RP-53576-FR, Paris, Francia.
- González R., Alborroz B., Sánchez I. y Osorio J.** (2018). “El acuífero yucateco. Análisis del riesgo de contaminación con apoyo de un sistema de información geográfica”. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 34(4): 667-683, ISSN 018-4999, México. DOI: 10.20937/RICA.2018.34.04.09.
- Herrera J., Fonseca C. y Goicochea D.** (2004). “Perspectivas del medio ambiente urbano GEO La Habana”, Ed. SI-MAR S.A., ISBN: 959-264-017-3, La Habana, 190 pp.
- Jiménez A., Martínez C. y Carrasco F.** (2010). “Evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas. Aplicación en los acuíferos carbonáticos de la Sierra Cañete (Sur de España)”. Boletín Geológico y Minero, 121(2): 139-152, ISSN 0366-0176, España.
- Palomino O.** (2013). “Análisis de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas utilizando mapa de vulnerabilidad y peligro en el caso acuífero Aguascoca”. Memoria Segundo Encuentro de Investigaciones Ambientales, Ministerio del Ambiente, Dirección General de Investigación e Información Ambiental, Arequipa, Perú, pp. 1-6.
- Pedroso I.** (2019). “Parámetros magnéticos indicadores de contaminación por metales pesados en suelos de la cuenca Almendares-Vento”. Minería y Geología, 35(1): 67-83, ISSN 1993 8012, Universidad de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Holguín, Cuba.
- Peralta J.L., Gil R., Leyva D., Molerio L. y Pin M.** (2005). “Uso de técnicas nucleares para la evaluación de la cuenca Almendares-Vento para la gestión sustentable de sus recursos hídricos”. Fórum de Ciencias Técnicas, extraído de: [www.forumcyt.cu/ponencias/trabajo/203 en febrero 2019](http://www.forumcyt.cu/ponencias/trabajo/203_en_febrero_2019).
- Suárez O.** (2019). “Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y el riesgo de contaminación del agua subterránea en la cuenca Almendares-Vento”. Tesis de diploma, Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE, La Habana.
- Valcarce R.M., Vega M., Rodríguez W. y Suárez O.** (2020). “Vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas en la cuenca Almendares-Vento”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 41(2): 33-47, ISSN 1680-591X, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE, Cuba.
- 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. Infomin. Vol. 11. Extraído de <http://www.infomin.co.cu> en junio 2019.
- Zwahlen F.** (2003). “COST Action 620. Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karstic) Aquifers”, Final report COST Action 620, European Commission, Luxembourg, 297 pp.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores:

Oscar Antonio Suárez González

<https://orcid.org/0000-0003-1617-5262>

Participó en el diseño de la investigación. Trabajó en el procesamiento de los datos, realizó trabajos de campo, haciendo contribuciones en su análisis e interpretación. Trabajó en la redacción del informe final.

Rosa María Valcarce Ortega

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

Dirigió la investigación y su diseño. Trabajó en el procesamiento de los datos y conclusiones de la investigación, redacción y revisión del informe final.

Marina Vega Carreño

<https://orcid.org/0000-0001-6745-5382>

Participó en el diseño de la investigación. Trabajó en el procesamiento de los datos y conclusiones de la investigación, redacción y revisión del informe final.

Willy Roberto Rodríguez Miranda

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

Participó en el diseño de la investigación. Trabajó en el procesamiento de los datos y conclusiones de la investigación, redacción y revisión del informe final. Asesoró en el procesamiento de los datos y el uso de los sistemas de información geográfica.