

2

Índice de evaluación de riesgo para decisiones informadas aplicado a la bahía de Guantánamo

Risk assessment index for informed decisions applied to Guantánamo Bay

Annelis García González ^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-8293-3960>

Liliana María Gómez Luna ² <https://orcid.org/0000-0002-1282-3392>

Alexander Fernández Velázquez ¹ <https://orcid.org/0000-0002-4612-475X>

¹ Subdelegación de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.
Guantánamo, Cuba

² Laboratorio de Ecotoxicología y Servicios Ambientales, Centro Nacional de Electromagnetismo
Aplicado. Universidad de Oriente, Cuba

*Autor de correspondencia: annelis1975@gmail.com

RESUMEN

Objetivo: Validar un índice de evaluación de riesgo para ecosistemas costeros, aplicado a la bahía de Guantánamo como caso de estudio de una bahía tropical bajo presión antrópica.

Materiales y métodos: Se empleó un enfoque mixto que combinó el método Delphi, modelación multicriterio y el análisis histórico de datos; el índice integró peligros clave, impactos potenciales, capacidad de respuesta local y niveles de incertidumbre.

Resultados: Los resultados identificaron un riesgo elevado, impulsado principalmente por la contaminación del agua y las sequías, agravado por una capacidad de respuesta limitada. La validación incluyó pruebas de consistencia y escenarios de sensibilidad, confirmando la robustez del índice incluso ante incertidumbre.

Conclusiones: El índice de evaluación de riesgos demostró ser una herramienta efectiva para decisiones informadas y guiar políticas adaptativas; así como reducir vulnerabilidades en ecosistemas costeros, priorizando medidas de mitigación como el control de vertimientos y la restauración de manglares.

PALABRAS CLAVE: índice de evaluación de riesgos, bahía de Guantánamo, contaminación del agua, gobernanza, capacidad de respuesta.

ABSTRACT

Objective: To validate a risk assessment index for coastal ecosystems, applied to Guantánamo Bay as a case study of a tropical bay under anthropogenic pressure.

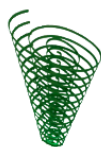
Materials and methods: A mixed-methods approach was used, combining the Delphi method, multi-criteria modeling, and historical data analysis; the index integrated key hazards, potential impacts, local response capacity, and uncertainty levels.

Results: The results identified a high risk, driven primarily by water pollution and drought, exacerbated by limited response capacity. Validation included consistency testing and sensitivity scenarios, confirming the robustness of the index even in the face of uncertainty.

Conclusions: The risk assessment index proved to be an effective tool for informed decision-making and guiding adaptive policies, as well as for reducing vulnerabilities in coastal ecosystems by prioritizing mitigation measures such as discharge control and mangrove restoration.

KEYWORDS: risk assessment index, Guantánamo Bay, water pollution, governance, response capacity.

Cómo citar: García, A., Gómez, L. M. & Fernández, A. (2025). Índice de evaluación de riesgo para decisiones informadas aplicado a la bahía de Guantánamo. *Retos de la Dirección*, 19, e2502.
<https://reduc.edu.cu/index.php/retos/article/view/e2502>



Introducción

La crisis ambiental global, impulsada tanto por el cambio climático como por la explotación insostenible de los recursos naturales, representa una amenaza significativa para la salud humana, animal, vegetal y los ecosistemas. Esa situación subraya la necesidad de desarrollar estrategias de gestión ambiental sostenibles y medidas de mitigación de riesgos para reducir los impactos de desastres y emergencias.

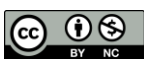
En particular, los ecosistemas costeros, resultan altamente vulnerables ante esos desafíos, su degradación no solo pone en peligro a las especies que dependen de ellos, sino que también comprometen los bienes y servicios esenciales que ofrecen, como la regulación del clima y la protección costera. Además, la alteración de esos *hábitats* reduce su capacidad para actuar como sumideros de carbono, exacerbando aún más los efectos del cambio climático (García *et al.*, 2023).

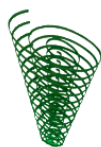
La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), en el 2008, realizó el Cuarto Congreso Mundial de la Naturaleza, en el que se planteó la iniciativa de la Lista Roja de Ecosistemas (LRE), desarrollando posteriormente su estándar global para evaluar el riesgo de los ecosistemas (Masés-García *et al.*, 2021).

En el año 2013 un grupo de investigadores establecieron los fundamentos científicos de la LRE y presentaron una compilación de estudios realizados en el mundo, introduciendo, por primera vez, el término “colapso” para definir el punto final del ecosistema: su desaparición total o su transformación en uno distinto o novel (Masés-García *et al.*, 2021).

La LRE establece cinco criterios para evaluar el riesgo de colapso: reducción en la distribución del ecosistema; distribución restringida relacionada a una reducción o amenaza persistente y explícita; degradación ambiental (abiótico); alteración de los procesos bióticos y la modelación matemática del colapso, según categorías de riesgo: colapsado (CO), en peligro crítico (CR), en peligro (EN), vulnerable (VU), casi amenazado (NT), preocupación menor (LC), datos insuficientes (DD) y no evaluado (NE) (Masés-García *et al.*, 2021).

Si bien existen marcos consolidados para la evaluación de ecosistemas terrestres y humedales (Demetrio, 2021; Masés-García *et al.*, 2021), y se han propuesto sistemas de indicadores para ecosistemas marinos (Artiles & Fariñas, 2023; Organización de la Naciones Unidas [ONU], 2020), persiste una brecha metodológica en la evaluación integral del riesgo para ecosistemas costeros altamente antropizados, como las bahías tropicales. Esos sistemas requieren de herramientas que integren de forma sistemática y cuantificable no solo los peligros de orígenes naturales y





antrópicos, sino también sus impactos socioecológicos, la capacidad de respuesta local y la incertidumbre asociada a los datos, elementos, con frecuencia, abordados de forma fragmentada en las metodologías existentes.

La bahía de Guantánamo, ubicada en el litoral suroriental de Cuba, es un ejemplo paradigmático de ese vacío. Alberga un ecosistema marino-costero de gran biodiversidad y valor ecológico que proporciona servicios ecosistémicos esenciales (García-González *et al.*, 2024). Sin embargo, enfrenta múltiples peligros que ponen en riesgo su equilibrio. La creciente presión antrópica y la amenaza del cambio climático, subrayan la urgencia de contar con herramientas de evaluación robustas que informen la gestión proactiva y la priorización de recursos.

La creación de un índice aplicable a ese contexto específico, y extrapolable a bahías con presiones similares, es, por tanto, una necesidad para la toma de decisiones informadas y la implementación de políticas públicas efectivas orientadas a la reducción de la vulnerabilidad y la promoción de un desarrollo sostenible (Alcántara-Ayala *et al.*, 2019; Figueroa & Castro, 2025; Posada-Pérez & Londoño, 2024).

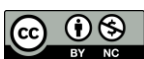
Por consiguiente, se propone como objetivo validar un Índice de Evaluación de Riesgo (IER) para ecosistemas costeros, aplicado a la bahía de Guantánamo como caso de estudio de una bahía tropical bajo presión antrópica.

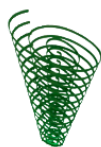
Materiales y métodos

El estudio realizado se enmarca dentro de un enfoque descriptivo y explicativo en la bahía de Guantánamo, situada en las coordenadas 19° 54' 39'' de Latitud Norte y 75° 09' 33'' de Longitud Oeste. Limita al Norte, con las terrazas aluviales de los ríos Guaso y Hondo; al Sur, con el Mar Caribe; al Este, con las alturas de Boquerón y al Oeste, con las alturas de Hatibonico. Tiene un largo y ancho, máximos de 20 y 9 km respectivamente; su profundidad estimada es de 60 m, hacia la entrada, luego asciende abruptamente hasta los 14 m, elevándose posteriormente con una pendiente suave (García *et al.*, 2024).

Inicialmente, se empleó un estudio descriptivo para recopilar y analizar datos históricos y recientes sobre la calidad del agua y los peligros específicos en la bahía de Guantánamo. Posteriormente, se utilizó un estudio explicativo para identificar y priorizar los riesgos críticos mediante la creación del IER, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informadas y la implementación de políticas públicas efectivas.

Para la identificación de los problemas ambientales se realizaron viajes exploratorios y entrevistas a profesionales involucrados en la gestión ambiental de la provincia de Guantánamo,





diseñadas a partir de preguntas abiertas (Gómez-Luna *et al.*, 2020), relacionadas con la identificación de problemas socio-ambientales y la percepción sobre la incidencia de la calidad ambiental en el bienestar social, para la realización de un diagnóstico que considere iniciativas y políticas de Manejo Integrado de Zonas Costeras (MIZC) (Aké & Rivera, 2024).

El enfoque sistémico-estructural-funcional (Haro *et al.*, 2024; Rodríguez & Pérez, 2017; Bermúdez & Rodríguez, 2022) fue utilizado también para relacionar las causas, consecuencias e impactos de dichos problemas, y a partir de esa información se elaboró un diagrama de interrelación de problemas e impactos, utilizándose como referente metodológico los trabajos de Montero-Vega *et al.* (2020). Las problemáticas fueron agrupadas y jerarquizadas en función de identificar prioridades o asuntos clave de manejo.

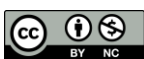
Se emplearon métodos teóricos, como el histórico lógico, para la evaluación de datos históricos y recientes sobre la calidad del agua de la bahía de Guantánamo. La evaluación incluyó parámetros químicos como pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y salinidad; así como parámetros biológicos, tales como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), nutrientes, coliformes, *E. coli*, además de resultados de análisis de metales pesados y Colorofila-a fitoplanctónica.

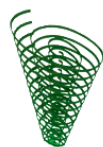
Se identificaron, además, vulnerabilidades considerándose la exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa como dimensiones (Milanés & Szlafsztein, 2018; Pérez *et al.*, 2021). Además, se tuvo en cuenta la clasificación y caracterización de elementos expuestos y su afectación (Duque *et al.*, 2020).

Otros métodos utilizados fueron el análisis documental, para obtener una base sólida de conocimientos y mejores prácticas en la evaluación de riesgos ambientales; el método sistémico, para el análisis integral del ecosistema marino costero como un sistema complejo, considerando las interrelaciones entre sus componentes biológicos, físicos y socioeconómicos; y el análisis multicriterio, para la evaluación de los riesgos mediante la consideración de criterios de expertos, permitiendo una toma de decisiones más equilibrada y fundamentada.

Resultados y discusión

Antes de la elaboración y aplicación del índice fue necesario realizar un diagnóstico en el ecosistema marino costero bahía de Guantánamo, el cual evidenció un deterioro gradual de la calidad de sus aguas sin signos de recuperación, constituye el depósito final del drenaje de la cuenca Guantánamo-Guaso, es un ecosistema visiblemente antropizado, producto del desarrollo urbano e industrial.





A partir del análisis de las problemáticas y su sistematización se identificaron problemas ambientales clave por su impacto y lugar en el plano perceptual, así como 11 peligros que se agruparon en siete tipos (cambio climático conducente a la sequía y ocurrencia de eventos hidrometeorológicos; contaminación ambiental; sismos, licuefacción; deslizamientos; presencia de especies exóticas invasoras; aparición de epidemias, epizootias o plagas) los cuales se asociaron a las vulnerabilidades ecológica, económica, social y funcional (estructural) con afectaciones en el ecosistema, la población residente interna y externa, recursos económicos y el patrimonio construido, los que se asociaron a los 31 impactos que ocasionan.

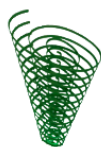
A partir del análisis integrado de los resultados del diagnóstico realizado se definen cuatro escenarios de riesgos de desastres, que toman en cuenta la probabilidad de ocurrencia de múltiples desastres en un mismo espacio de tiempo en el ecosistema bahía de Guantánamo y se considera al cambio climático como impulsor de riesgos (Tabla 1).

Tabla 1. Escenarios de riesgos de desastres

Escenarios	Impactos	Consecuencias
A Eutrofización y Floraciones Algaes Nocivas (FANs) inducidas por cambios climatológicos	- Afectaciones a la biodiversidad - Intoxicación de peces y humanos - Afectaciones en la dinámica del ecosistema - Aumento de fragilidad de ecosistemas - Deterioro de la calidad ambiental - Inseguridad alimentaria	- Pérdidas económicas - Deterioro de indicadores de la salud humana - Aumentan los conflictos socioeconómicos y vulnerabilidad social - La Unidad Empresarial de Base Caimar y la actividad de producción de sal se ven afectadas - Pérdidas de algunos servicios ecosistémicos
B Inundaciones por eventos hidrometeorológicos	- Aumenta la vulnerabilidad social - Aumentan los conflictos socioeconómicos - Pérdida de infraestructuras - Alteraciones del paisaje - Pérdidas económicas - Afectaciones al patrimonio construido	- Severos daños socio-económicos que afectan al poblado Caimanera
C Sequías prolongadas y degradación del ecosistema	- Proliferación de enfermedades y plagas en humanos y animales - Aumento de la vulnerabilidad social - Aumento de conflictos socioeconómicos - Pérdidas económicas - Aumento de fragilidad de ecosistemas	- Inseguridad alimentaria - Pérdidas socioeconómicas
D Desastres por pérdida irreversible de funciones ecológicas	- Afectaciones a la salud humana y/o deterioro de indicadores de salud - Pérdidas económicas - Deterioro de la calidad ambiental	- Pérdidas y daños socioeconómicos en los asentamientos costeros (Glorieta, Boquerón y Caimanera) - Aumento de la vulnerabilidad social - Éxodo masivo del ecosistema - Deterioro severo de los indicadores de salud humana y animal

Fuente: elaboración propia





Elaboración del IER

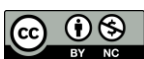
El IER se fundamentó en un análisis integral que incorporó no solo los peligros y vulnerabilidades del ecosistema, sino también dos dimensiones críticas para la gestión efectiva de riesgos: la capacidad de respuesta y el nivel de incertidumbre asociado a los datos. Esta aproximación metodológica ampliada permitió una mejor evaluación del riesgo en la bahía de Guantánamo, alineándose con los estándares internacionales para la toma de decisiones en contextos complejos.

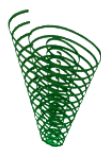
El IER es una métrica que cuantifica el riesgo global para el ecosistema de la bahía de Guantánamo, integrando:

- ✓ Probabilidad de ocurrencia (Pprob) de cada peligro.
- ✓ Impacto ponderado (Ip) de cada peligro (escala 1-10).
- ✓ Peso relativo (w_i) de cada peligro, determinado por consenso de expertos.
- ✓ Capacidad de respuesta (CR) para superar la limitación de los índices tradicionales — que suelen ignorar las capacidades locales— integrándose en la fórmula del IER. Ese factor evalúa:
 - Gobernanza (G): existencia de planes de emergencias, coordinación interinstitucional, marco legal aplicable, existencia de un grupo provincial de lucha contra la contaminación ambiental y el consejo provincial de cuencas hidrográficas.
 - Recursos comunitarios (RC): avisos de alerta temprana, educación ambiental y resiliencia socioeconómica.
 - Infraestructura crítica (IC): avisos institucionales y a la población, medidas de adaptación basadas en ecosistemas (conservación de manglares), infraestructura para respuesta inmediata (centros de evacuación, vías de acceso...).

Se utilizaron los siguientes datos:

- ✓ Peligros evaluados: 11 (contaminación del agua, licuefacción, inundaciones, penetraciones del mar, sequía, corrosión, sismos, deslizamientos de tierra, epidemia/epizootias, plagas y especies exóticas invasoras).
- ✓ Probabilidad de ocurrencia (Pprob): valores entre 0 y 1 (1 = certeza, 0.5 = probabilidad media).
- ✓ Impacto (Ip): escala del 1 al 10 (10 = impacto máximo).
- ✓ Juicio de expertos: 25 expertos (E1 a E25) valoraron la relevancia de cada peligro (escala 1-5: (1 = menos relevante, 5 = crítico).





- ✓ Capacidad de respuesta (CR): escala del 1 al 5 (5 = capacidad óptima).

Pasos para el cálculo del IER

1. Asignación de Pesos (w_i) a los Peligros

Suma de puntuaciones: para cada peligro, se sumaron las puntuaciones de los 25 expertos.

Cálculo del peso (w_i): se normalizaron las sumas para que los pesos sumaran 1.

Fórmula: $w_i = \text{Suma del peligro} / \text{Suma total de todos los peligros}$

2. El IER bruto se calcula como la sumatoria del producto de la probabilidad de ocurrencia (Pprob), el impacto (Ip) y el peso (w_i) para cada peligro:

$$\text{IER bruto} = \sum (\text{Pprob} \times \text{Ip} \times w_i)$$

3. Cálculo de la capacidad de respuesta:

$$\text{CR} = \frac{G + \text{RC} + \text{IC}}{3}$$

Donde:

G = Puntuación de Gobernanza (0-5)

RC = Puntuación de Recursos Comunitarios (0-5)

IC = Puntuación de Infraestructura Crítica (0-5)

4. Cálculo del IER mejorado: a partir de la propuesta original de tres índices estos fueron mejorados por inteligencia artificial *DeepSeek*, incorporando el análisis de la capacidad de respuesta mediante la fórmula ajustada:

$$\text{IER}_{\text{mejorado}} = \frac{\sum (\text{Pprob} \times \text{Ip} \times w_i)}{\text{CR}}$$

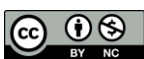
El IER bruto (o IER base) (Burgman, 2016; INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY [IAEA], 1998) representa la sumatoria no ajustada de riesgos, mientras que el IER mejorado incorpora la capacidad de respuesta (CR). Eso permite que un alto riesgo teórico pueda ser atenuado si la capacidad de respuesta es robusta, reflejando mejor la realidad operativa.

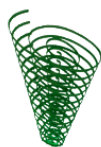
Escala de riesgo:

- ≤ 0.33 : Bajo
- $0.33 - 0.66$: Medio
- ≥ 0.66 : Alto

5. Análisis de la incertidumbre y sensibilidad

Para evaluar la robustez del IER ante posibles sesgos o limitaciones en los datos, se implementó un análisis de sensibilidad basado en escenarios, siguiendo metodologías estandarizadas (Saltelli *et al.*, 2007). Ese proceso incluyó:





✓ Definición de escenarios:

- a) Base (Bruto): valores originales de Pprob e Ip obtenidos del método Delphi.
- b) Optimista: valores mínimos plausibles (Pprob e Ip reducidos en 10%, es decir, multiplicados por 0.9).
- c) Pesimista: valores máximos plausibles (Pprob e Ip aumentados en 10%, es decir, multiplicados por 1.1).

✓ Cálculo del IER ajustado por escenario:

Para cada peligro, se aplicó la fórmula:

$$\text{IER escenario} = (\text{Pprob} \times \text{factor}) \times (\text{Ip} \times \text{factor}) \times w_i$$

donde el factor es 0.9 (optimista), 1.0 (base) o 1.1 (pesimista).

✓ Clasificación de incertidumbre:

- Baja (acuerdo $\geq 80\%$ en Delphi): datos históricos consistentes.
- Media (acuerdo 50-79%): Datos parcialmente validados.
- Alta (acuerdo $< 50\%$): Datos estimados.

✓ Índice de Incertidumbre (IU):

$$\text{IU} = \frac{\text{N de peligros con incertidumbre alta}}{\text{Total de peligros}} \times 100$$

✓ Cálculo de variabilidad:

Se realizó un análisis mediante escenarios que ajustaron $\pm 10\%$ los valores de probabilidad (Pprob) e impacto (Ip) de cada peligro, conservando su peso relativo (w_i). Ese método proporcional permite cuantificar la incertidumbre asociada a los datos y ponderaciones, siguiendo protocolos estandarizados para modelos multicriterio (Saltelli *et al.*, 2007). Los escenarios se definieron como:

- Optimista: reducción del 10% en Pprob e Ip ($\times 0.9$).
- Pesimista: incremento del 10% en Pprob e Ip ($\times 1.1$).

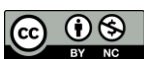
El IER parcial para cada escenario se calculó como:

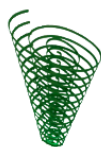
- IER optimista = $(\text{Pprob} \times 0.9) \times (\text{Ip} \times 0.9) \times w_i$
- IER pesimista = $(\text{Pprob} \times 1.1) \times (\text{Ip} \times 1.1) \times w_i$

donde el factor es 0.9 (optimista), 1.0 (base) o 1.1 (pesimista).

Para cada peligro, la diferencia entre escenarios se calcula como:

$$\Delta\% = \frac{\text{IER pesimista} - \text{IER optimista}}{\text{IER base}} \times 100$$





Priorización: los peligros con incertidumbre alta se marcaron para monitoreo futuro, mientras que los de baja incertidumbre se usaron para decisiones inmediatas.

6. Limitaciones y consideraciones metodológicas

- Disponibilidad de datos: la ausencia de registros históricos detallados para algunos peligros (frecuencia exacta de penetraciones del mar) introduce incertidumbre. Se mitigó mediante consenso de expertos.
- Sesgo en ponderaciones: las valoraciones de expertos pueden reflejar preferencias subjetivas. Para reducir esto, se aplicó el método Delphi en dos rondas.
- Conflictos jurisdiccionales: la presencia de la base naval estadounidense limita el acceso a información de la zona noroccidental de la bahía.

7. Aportes y aplicabilidad del IER mejorado

El índice permite:

- Integrar capacidades locales: evita sobrestimar riesgos en zonas con alta resiliencia.
- Cuantificar incertidumbre: prioriza acciones donde los datos son más robustos.
- Facilitar comparaciones: permite evaluar escenarios alternativos (con/sin medidas de mitigación).

8. Validación del IER

La validación del IER se realizó mediante un proceso mixto que combinó:

a) Método Delphi con expertos (n=25):

- Se ejecutó en tres rondas iterativas:
 - a) Ronda inicial: encuesta para evaluar la validez del índice y recoger sugerencias.
 - b) Ronda de retroalimentación: consolidación de respuestas y reenvío de un resumen estadístico junto con una nueva encuesta.
 - c) Ronda final: repetición del proceso hasta alcanzar consenso, definido como un acuerdo $\geq 70\%$ en las valoraciones (Mercately, 2025).

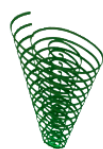
b) Análisis cuantitativo (*SPSS Statistics 27*):

- Se evaluó la consistencia interna del IER mediante el Alfa de Cronbach para indicar la fiabilidad (Torres, 2021).
- Se analizaron las correlaciones entre ítems para depurar componentes redundantes.

c) Análisis cualitativo:

- Los comentarios de los expertos se categorizaron temáticamente para ajustar el índice.





Aplicación del índice de evaluación de riesgos (IER)

El 88% de los expertos coincidieron en que los parámetros seleccionados (como DBO, DQO, nitratos y coliformes) son adecuados y relevantes para la evaluación del riesgo en la bahía, confirmando que los indicadores utilizados respaldan su uso en el cálculo del índice. Además, se identificaron áreas de mejora, como la inclusión de otros contaminantes y ajustes en la ponderación de impactos, lo que abre oportunidades para perfeccionar el índice y asegurar su precisión y alcance.

Los expertos también calificaron la efectividad del índice en una escala de 1 a 10, reflejando una alta calificación promedio que valida su utilidad práctica en la evaluación del riesgo. Sus comentarios cualitativos sobre la metodología y los datos empleados proporcionaron una base para ajustar y optimizar el índice, reforzando su aplicabilidad y relevancia práctica.

El consenso alcanzado sobre los valores de probabilidad (Pprob) y la ponderación del impacto (Ip) asignados a cada peligro, el peso asignado a los peligros, y la integración de la capacidad de respuesta incrementa la credibilidad del índice y asegura que los valores sean representativos.

Para la validación empírica, se comprobó que los resultados obtenidos son consistentes con observaciones y eventos históricos documentados, lo que refuerza la precisión y capacidad predictiva del índice.

Asimismo, la aplicación de la prueba *Alfa de Cronbach* mediante el *software SPSS Statistics 27* confirmó su consistencia interna con un coeficiente de 0.82, considerado “bueno” según los estándares aceptados. Ese resultado evidencia la fiabilidad del índice como una herramienta sólida para investigaciones futuras, la toma de decisiones informadas y la gestión para la reducción de riesgos en el ecosistema marino costero de la bahía de Guantánamo.

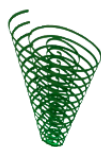
El cálculo de la capacidad de respuesta arrojó el siguiente resultado:

$$CR = \frac{G + RC + IC}{3} = \frac{10 + 3 + 10}{3} = \frac{23}{3} = 7.6$$

Posteriormente se procedió a calcular el IER Bruto = $\sum (Pprob \times Ip \times w_i)$, los valores se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Cálculo del IER bruto empleando los pesos asignados por cada peligro

No.	Peligro (Pe)	Probabilidad de ocurrencia (Pprob)	Impacto ponderado de cada peligro (Ip) (1-10)	Peso (w_i)	Pprob x Ip x w_i
1	Contaminación del Agua	1	10	0.105	1.05
2	Licuefacción	0,5	7	0.083	0.2905
3	Inundaciones	0,8	8	0.089	0.56



No.	Peligro (Pe)	Probabilidad de ocurrencia (Pprob)	Impacto ponderado de cada peligro (Ip) (1-10)	Peso (w_i)	Pprob x Ip x w_i
4	Penetraciones del mar	0,6	8	0.095	0.456
5	Sequía	1	10	0.105	1.05
6	Corrosión	1	5	0.086	0.43
7	Sismos	1	9	0.105	0.945
8	Deslizamientos de tierra	1	8	0.092	0.736
9	Epidemia/Epizootias	1	8	0.073	0.584
10	Plagas	1	10	0.083	0.83
11	Especies Exóticas Invasoras	1	8	0.079	0.632
IER= $\sum (Pprob \times Ip \times w_i)$					7.56

Fuente: elaboración propia

Los valores de peso obtenidos evidencian cómo estos peligros, al combinarse con sus pesos asignados por expertos (w_i), contribuyen al IER total. La contaminación y la sequía, con pesos de 0.105 cada uno, se destacan como los principales impulsores del riesgo.

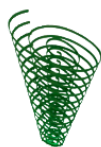
A partir de cada uno de los valores obtenidos se procedió a calcular el IER mejorado mediante la siguiente ecuación:

$$IER_{\text{mejorado}} = \frac{\sum (Pprob \times Ip \times w_i)}{CR} = \frac{7.56}{7.6} = 0.99$$

El cálculo del IER arrojó un valor de 0.99, clasificado como riesgo Alto, según la escala establecida (≥ 0.66). Ese resultado refleja una situación crítica para el ecosistema marino-costero bahía de Guantánamo, la combinación de peligros naturales y antropogénicos, junto con una capacidad de respuesta limitada, generan un escenario de alta vulnerabilidad.

Los peligros identificados como más críticos fueron la contaminación del agua (IER parcial: 1.05) y sequía (IER parcial: 1.05): ambos presentaron la máxima probabilidad de ocurrencia ($Pprob = 1$) y un impacto ponderado elevado ($Ip = 10$). La contaminación, asociada a vertimientos industriales, aguas residuales sin tratamiento y aportes de la cuenca Guantánamo-Guaso, degrada la calidad del agua y afecta la biodiversidad. La sequía, agravada por el cambio climático, reduce la disponibilidad de agua dulce y aumenta la salinización, exacerbando la vulnerabilidad ecológica y socioeconómica.

Aunque con menor peso relativo, los sismos (IER parcial: 0.945) e inundaciones (IER parcial: 0.56) presentan un impacto potencial significativo. Las inundaciones, vinculadas a eventos hidrometeorológicos extremos, dañan infraestructuras y hábitats, mientras que los sismos representan un riesgo latente para la estabilidad del ecosistema y los asentamientos costeros.



El valor de la CR calculado (7.6) revela deficiencias en la gobernanza, recursos comunitarios e infraestructura crítica, en relación a la gobernanza, aunque existe un marco legal regulatorio, su implementación es débil. La coordinación interinstitucional y el control de las fuentes contaminantes resultan insuficientes. En cuanto a los recursos comunitarios, se puede expresar que los avisos de alerta temprana y la educación ambiental son casi inexistentes, además, la resiliencia socioeconómica es baja debido a la dependencia de actividades pesqueras vulnerables.

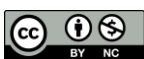
En relación a la infraestructura crítica (IC = 3/5) es válido plantear que, a pesar de la existencia de protocolos de comunicación y manglares como barreras naturales, la falta de centros de evacuación equipados y vías de acceso adecuadas reduce la capacidad de respuesta ante emergencias. Esa limitada capacidad amplifica el riesgo, ya que el IER mejorado penaliza la falta de preparación local.

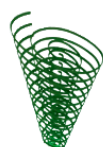
El IER Alto señala una degradación acelerada, la contaminación y sequía afectan servicios ecosistémicos clave (regulación climática, pesca) y especies endémicas. Existe vulnerabilidad social, ya que los asentamientos costeros (Caimanera, Boquerón y Glorieta) enfrentan inseguridad alimentaria, pérdida de medios de vida y exposición a enfermedades por agua de mar contaminada. Además, pueden presentarse conflictos socioeconómicos dados por la competencia por recursos escasos (pescados, agua dulce) y la pérdida de infraestructuras puede agudizar las desigualdades.

Los resultados del IER validan los escenarios proyectados, el escenario A (Eutrofización y FANs) coincide con la alta ponderación de la contaminación y su impacto en la biodiversidad, el escenario B (Inundaciones) refleja el riesgo medio de eventos hidrometeorológicos y el escenario D (Pérdida irreversible), el IER Alto respalda la urgencia de acciones para evitar el colapso del ecosistema.

Al calcular el índice de incertidumbre se identificaron que cinco de los 11 peligros (45%) presentaron alta incertidumbre (IU=45%), destacando la licuefacción, corrosión, epidemias/epizootias, plagas y especies exóticas invasoras, lo que sugiere la necesidad de monitoreos prioritarios. Esa incertidumbre se asoció a limitaciones en datos históricos.

Para evaluar la robustez del IER, se realizó un análisis de sensibilidad estratificado por nivel de incertidumbre (alta/media), ajustando $\pm 10\%$ la probabilidad (Pprob) e impacto (Ip) de los peligros con incertidumbre ≥ 2 (Tabla 3).



**Tabla 3.** Cálculo de sensibilidad por peligros y cálculo de IER escenarios (optimista y pesimista) según la incertidumbre (alta y media)

No.	Peligro (Pe)	Nivel de incertidumbre (3: alta, 2: media, 1: baja)	Optimista ($P_{prob} \times 0.9 \times (I_p \times 0.9) \times w_i$)	Pesimista ($P_{prob} \times 1.1 \times (I_p \times 1.1) \times w_i$)
2	Licuefacción	3	0.24	0.35
3	Inundaciones	2	0.45	0.68
6	Corrosión	3	0.34	0.52
8	Deslizamientos de tierra	2	0.6	0.89
9	Epidemia/Epizootias	3	0.47	0.7
10	Plagas	3	0.67	1
11	Especies Exóticas Invasoras	3	0.51	0.76
	IER parciales= Σ optimista y Σ pesimista		3.28	4.9

Fuente: elaboración propia

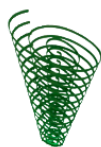
Los escenarios de sensibilidad ($\pm 10\%$ en P_{prob} e I_p) mostraron que el IER bruto parcial de los peligros inciertos fluctuó entre 3.28 (optimista) y 4.9 (pesimista), lo que representó el 62% de la variabilidad total. Al ajustar esos valores a la capacidad de respuesta ($CR=7.6$), el IER mejorado oscilaría entre 0.85 y 1.27, manteniendo siempre la clasificación de riesgo alto (≥ 0.66).

Esa robustez refuerza la confiabilidad del resultado principal ($IER=0.99$) y permite priorizar acciones inmediatas en peligros con alta certidumbre (contaminación, sequía, sismos) y fortalecer el monitoreo de peligros con datos limitados (corrosión por salinización, plagas). La consistencia entre el método Delphi y el análisis cuantitativo respalda la solidez del índice, incluso ante incertidumbre, tal como recomiendan estándares internacionales (Saltelli *et al.*, 2007).

Los resultados muestran que peligros con incertidumbre alta ($n=5$) contribuyen con el 62% de la variabilidad total (IER optimista: 3.28; pesimista: 4.9), se destacan el peligro por plagas (IER pesimista=1.0) y corrosión por salinización ($\Delta=+53\%$ vs. escenario base), así como peligros con incertidumbre media ($n=2$), inundaciones y deslizamientos presentan menor sensibilidad ($\Delta \leq \pm 20\%$ vs. base).

Ese enfoque confirma que el IER mantiene su clasificación de riesgo alto (≥ 0.66) incluso en el escenario optimista, validando la solidez de las conclusiones (Saltelli *et al.*, 2007). Para la mitigación de la situación actual en el ecosistema se recomienda el control de las fuentes contaminantes, así como dar mantenimiento a las plantas de tratamiento de aguas residuales y crear aquellos en las fuentes que no los poseen, así como establecer regulaciones para los vertimientos industriales.

Es necesario reforzar la capacidad de respuesta a partir de la implementación oportuna de avisos de alertas tempranas, capacitar a las comunidades y mantener las acciones de restauración de los manglares. Se deben establecer políticas adaptativas que incorporen el IER en los planes de



ordenamiento territorial y gestión para la reducción de riesgos. Se puede incluir también la adopción de otras medidas tales como:

- Promover la restauración y conservación de los hábitats naturales.
- Reubicar las viviendas más vulnerables hacia zonas más seguras, a partir del ordenamiento territorial en consonancia con los riesgos.
- Adoptar soluciones basadas en la naturaleza para limitar los riesgos.

Conclusiones

1. Se validó IER para ecosistemas costeros antropizados. El índice demostró alta confiabilidad ($\alpha=0.82$) y estabilidad en análisis de sensibilidad ($\pm 10\%$), respaldado por consenso experto (88%), constituyéndose en una herramienta confiable para la toma de decisiones informadas.

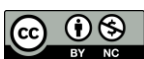
2. La aplicación del IER en la bahía de Guantánamo reveló un riesgo alto (IER=0.99), impulsado principalmente por la contaminación del agua y las sequías -ambas con máxima probabilidad e impacto- seguidos por la actividad sísmica. Ese riesgo se encuentra amplificado por una capacidad de respuesta limitada (CR=7.6), particularmente en recursos comunitarios e infraestructura crítica.

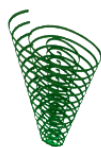
3. El IER valida los escenarios de riesgo proyectados y prioriza acciones de mitigación inmediatas, destacando el control de vertimientos, la restauración de manglares y el fortalecimiento de sistemas de alerta temprana. Su integración en la planificación territorial y la gestión adaptativa es esencial para reducir la vulnerabilidad socioecológica.

4. El estudio realizado identificó una incertidumbre alta en el 45% de los peligros, limitación que señala la necesidad de mejorar el monitoreo de datos históricos. Futuras investigaciones deberán aplicar el IER en otros ecosistemas costeros para evaluar su transferibilidad y ajustar los pesos de los criterios en contextos específicos.

Referencias

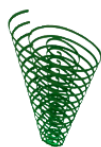
- Aké, K. A., & Rivera, E. (2024). Análisis del Manejo Integrado Costero en Cuba. *JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático, Volumen Especial (1)*, 83-96.
<https://doi.org/10.26359/52462.0824>
- Alcántara-Ayala, I., Garza, M., López, A., Magaña, V., Oropeza, O., Puente, S., Rodríguez, D., Lucatello, S., Ruiz, N., Tena, R. A., Urzúa, M., & Vázquez, G. (2019). Gestión Integral de Riesgo de Desastres en México: reflexiones, retos y propuestas de transformación de la



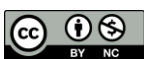


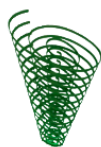
- política pública desde la academia. *Investigaciones Geográficas*, (98), 1-17.
<https://doi.org/10.14350/rig.59784>
- Artiles, G. R., & Fariñas, J. P. (2023). Marco conceptual y metodológico del sistema de indicadores para el monitoreo de los ecosistemas marino-costeros del norte de Camagüey. *Retos de la Dirección*, 17(2), e23201.
<https://retos.reduc.edu.cu/index.php/retos/es/article/view/e23201/393>
- Bermúdez, R., & Rodríguez, M. (2022). Estructura sistémica de las ciencias: una propuesta metodológica urgida. *Revista Mapa*, 6(26), 1-19.
<https://www.revistamapa.org/index.php/es/article/view/309>
- Burgman, M. A. (2016). *Trusting Judgements: How to Get the Best out of Experts*. Cambridge University Press. https://books.google.com.cu/books?id=gE-2CgAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Demetrio, P. M. (2021). Evaluación de Riesgo Ecológica. En P. Carriquiriborde. (Ed.), *Principios de Ecotoxicología* (pp.1-344). Editorial de la UNLP.
<https://www.researchgate.net/publication/351920003>
- Duque, M. I., Alonso, G. A., Lozano, P. R., & González, E. J. (2020). *Metodología para evaluar los riesgos incorporando la gestión del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático en proyectos de inversión pública*. https://dokumen.tips/documents/metodologa-para-evaluar-los-riesgos-1-2-metodologa-para-evaluar-los-riesgos.html?__cf_chl_tk=wcyTQYZXXPZn0klsgNpSTjGJbJp6lIX18OOsSz7dc-1759336337-1.0.1.1-bJUdlbul7Gvtm2wUDLgGINEeU3.3_Zpqe4iCp840wLs
- Figueroa, A., & Castro, C. P. (2025). Análisis integrado para la gestión y reducción del riesgo en sistemas socio-ecológicos de Chile basado en ecosistemas. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 9(1), 32-50.
<https://doi.org/10.55467/reder.v9i1.173>
- García, R. Y., Castellanos, M. E., & Miranda, C. E. (2023). Cambio climático, manejo integrado de zonas costeras y educación ambiental: imperativos para el desarrollo sostenible de las áreas costeras. *Universidad y Sociedad*, 15(S1), 68-79.
<https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/3686>
- García, A., Gómez, L. M., Marzo, Y., & Ferrer, E. (2024). Caracterización ambiental del ecosistema marino-costero bahía de Guantánamo en Cuba. *Revista Bionatura*.





- International Journal of Biotechnology and Life Sciences*, 9(3), 127-148.
<https://revistabionatura.org/wp-content/uploads/2025/03/8.-Articulo-r1.pdf>
- Gómez-Luna, L. M., Guasch-Hechavarría, F., García-González, A., Muñoz-Padilla, A., Moya-Gomez, A. E., & Savón-Vaciano, Y. (2020). Un análisis de la percepción del riesgo ante la Covid-19. *Ciencia en su PC*, 1(2), 1-24.
<https://www.redalyc.org/journal/1813/181363909001/181363909001.pdf>
- Haro, A. F., Chisag, E. R., Ruiz, J. P., & Caicedo, J. E. (2024). Tipos y clasificación de las investigaciones. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 5 (2), 956-966. <https://doi.org/10.56712/latam.v5i2.1927>
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. (1998). *Guidelines for integrated risk assessment and management in large industrial areas*. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_994_prn.pdf
- Masés-García, C. A., Herrera-Fernández, B., & Briones-Salas, M. (2021). Tendencias en las evaluaciones de riesgo al colapso de ecosistemas terrestres y humedales. *Madera y Bosques*, 27(3), e2732133. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732133>
- Mercately. (2025). *Método Delphi. Toma de decisiones*.
<https://blog.mercately.com/marketing/metodo-delphi/>
- Milanés, C., & Szlafsztein, C. (2018). *Experiencias metodológicas para la gestión del riesgo*. EDUCOSTA.
https://www.researchgate.net/publication/328276522_Experiencias_metodologicas_para_la_gestion_del_riesgo
- Montero-Vega, F. S., Molina- Cedeño, C. S., Pillco-Herrera, B. M., Sarduy-Pereira, L. B., & Diéguez-Santana, K. (2020). Evaluación del impacto ambiental de la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales. Caso río Pindo Chico, Puyo, Pastaza, Ecuador. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 3(1), 23-39.
<https://revistas.intec.edu.do/index.php/cienacli/article/view/1803/2332>
- Organización de la Naciones Unidas. (2020). *Marco mundial de la diversidad biológica posterior a 2020: Información científica y técnica para apoyar el examen de los objetivos y metas actualizados, y los indicadores y los valores de referencia relacionados*.
<https://www.cbd.int/doc/c/e84f/0c78/ba6891ab46342d7ae6f59816/sbstta-24-03-add2-rev1-es.pdf>





- Pérez, O., Milanés, C., Mateo, C., Planas Fajardo, J. A., Velázquez, Y. R., Pérez, A. S., Alarcón, R. Y., Chuy, T. J., Silva, L. F., Mesa, L., Cruz, Y., Tamayo, H. A., Ferrera-Bergues, A., Ravelo, Á. A., Brito, A. L., Cid, J. R., García, L., Carbonero, M. A., Szlafshtein, C.F. (2021). Aportes para la gobernabilidad y gobernanza de los riesgos en naciones insulares y continentales costeras. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 11(3), 1-7. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2304-01062021000300017&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Posada-Pérez, N. M., & Londoño, G. E. (2024). Liderazgos femeninos en la gestión del riesgo de desastres: Caso La Primavera, Antioquia, Colombia. *Andamios*, 21(55), 499-527. <https://andamios.uacm.edu.mx/index.php/andamios/article/view/1113/2078>
- Rodríguez, A., & Pérez, A. O. (2017). Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, 82, 175-195. <https://doi.org/10.21158/01208160.n82.2017.1647>
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2007). *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. <https://doi.org/10.1002/9780470725184>
- Torres, J. D. (2021). *Fiabilidad de las escalas: Interpretación y limitaciones del Alfa de Cronbach*. https://www.researchgate.net/publication/350589592_Fiabilidad_de_las_escalas_interpretacion_y_limitaciones_del_Alfa_de_Cronbach

Declaración de conflicto de interés y conflictos éticos

Los autores declaramos que el artículo es original y no ha sido enviado a otra revista para su consideración. La autora de correspondencia expresa que son responsables de todos los contenidos recogidos en el manuscrito y no existen plagios, conflictos de interés ni conflictos éticos. La revista queda liberada de cualquier compromiso ético y/o legal.

Declaración de contribuciones de los autores

Annelis García González. Conceptualización, curación de datos, investigación, análisis formal, redacción - borrador inicial, validación – verificación.

Liliana María Gómez Luna. Curación de datos, análisis formal, redacción - revisión y edición.

Alexander Fernández Velazquez. Análisis formal, visualización.

Editado por: Lic. Celia Rosa Pérez Reyes

