

Evaluación radiológica de las arenas negras de la Playa Bibijagua, Isla de la Juventud, Cuba

 Oscar Díaz Rizo¹,  Héctor Cartas Águila²,  Rubén Gutiérrez Manso¹,  Solne Reyes Peña¹,
 Grizel Pérez Zayas¹

¹Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (INTEC). Universidad de La Habana. La Habana, Cuba.

²Centro de Estudios Ambientales de Cuba (CEAC). Cienfuegos, Cuba.

odrizo@instec.cu

Resumen

Se caracteriza el espectrómetro gamma de bajo fondo del Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, para el estudio de radioactividad en muestras ambientales volumétricas. Se determinan las actividades de los radionúclidos ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K y ^{137}Cs en las arenas negras de la playa de Bibijagua (Isla de la Juventud, Cuba). El cálculo de diferentes indicadores radiológicos, permitió comprobar que los usuarios de la playa de Bibijagua, no están expuestos a riesgo radiológico alguno.

Palabras clave: arenas negras; Cuba; radiación de fondo; radiactividad natural; protección medioambiental; espectroscopía gamma.

Radiological evaluation of black sands from Bibijagua beach, Isle of Youth, Cuba

Abstract

The Low Background Gamma Spectrometer at Center for Environmental Studies from Cienfuegos, Cuba, was characterized in order to study the radioactivity in volumetric environmental samples. The ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K and ^{137}Cs activities are determined in black sands from Bibijagua beach (Isle of Youth, Cuba). The calculation of different radiological indicators allows to check, that users of the Bibijagua beach are not exposed to any radiological risk.

Key words: black sands; Cuba; background radiation; natural radioactivity; environmental protection; gamma spectroscopy.

Introducción

La espectrometría gamma es una de las principales técnicas utilizadas para determinar las concentraciones de radionúclidos de origen natural o artificial [1]. Aunque es una técnica no destructiva, es decir, que no requiere de tratamientos químicos destructivos para el análisis, las muestras de interés, después de su recolección, deben pasar por un conjunto de procesos que garanticen condiciones físicas estandarizadas para ser analizadas. La playa de Bibijagua es la única playa de arenas negras en el archipiélago cubano. Se ubica a 8 km al noroeste de Nueva Gerona. Es considerada una playa de arenas fósiles y, además de por su color oscuro, sus arenas se caracterizan por ser muy finas y compactas.

Materiales y métodos

Para el estudio radiométrico de las arenas negras de Bibijagua, se tomó una muestra compuesta, a partir de cuatro submuestras de unos 100 g, tomadas en la duna (5 m por encima del nivel de marea), a una distancia

de unos 25 m entre sí y en línea paralela a la costa. En todos los casos se utilizó una espátula plástica. Las muestras fueron envasadas en bolsas de nylon y debidamente selladas y etiquetadas para su traslado al laboratorio. En el laboratorio, a todas las muestras se les extrajo manualmente los restos de conchas, piedras, madera, etc. Posteriormente fueron secadas a 60°C hasta alcanzar peso constante. Ya secas, se tamizaron a 250 micras, trituraron y homogenizaron en un molino de bolas, durante 5 min, a 500 revoluciones por minuto, y fueron tamizadas a 125 micras y secadas nuevamente a 60 °C. Finalmente, 50 g fueron envasados en recipiente plástico cilíndrico, transparente, con tapa de rosca, de 5.3 cm de altura total y 4.1 cm de diámetro, debidamente sellados con cinta plástica parafinada y puesto a reposar por más de 30 días, en aras de alcanzar el equilibrio secular.

Las mediciones se llevaron a cabo en el laboratorio de Radioactividad Ambiental del Centro de Estudios Ambientales (CEAC) de Cienfuegos. El sistema de espectrometría gamma utilizado, está basado en un detector HPGe coaxial, tipo-n, código NGC 3019, con

ventana de carbono epóxico, eficiencia relativa de 30 % y resolución (FWHM) de 1,9 keV para la línea de 1332,50 keV del ^{60}Co . El blindaje exterior se compone de diez anillos de hierro que conforman un cilindro horadado de 51 cm de altura, diámetro exterior de 82 cm y diámetro interior de 35 cm. Dentro del mismo se inserta un blindaje de plomo cilíndrico de 31 cm de altura, diámetro exterior de 31 cm y diámetro interior de 25 cm; cuyas paredes están cubiertas con capas de cobre de 0,5 mm y aluminio de 0,8 mm (figura 1).



Figura 1. Blindaje, detector y portamuestra.

Determinación de la actividad específica de las muestras de interés:

Atendiendo a la ausencia, en la cantidad requerida, de Materiales de Referencia Certificada de muestras ambientales para estudios por vía relativa, las actividades de las muestras de interés se determinaron mediante el método absoluto como:

$$A_e = \frac{CPS(m) - CPS(f)}{\epsilon \gamma M} \quad (1)$$

dónde: $CPS(m)$ -es la velocidad de conteos (en conteos por segundo) de la muestra, $CPS(f)$ - la velocidad de conteos del fondo, ϵ - Eficiencia del detector, γ - Probabilidad de emisión y M - Masa de la muestra. Este método posee como desventaja, que requiere el conocimiento de la eficiencia del sistema de detección, lo cual resulta muy complejo para muestras volumétricas, pues los efectos de autoabsorción en la muestra para los cuantos gamma de bajas energías son muy severos [2].

Medición de la eficiencia para muestras volumétricas:

La eficiencia es la relación entre el número de fotones emitidos por la muestra y los detectados por los instrumentos; depende de la geometría de medición, de la energía de la radiación, del volumen del detector y de la configuración de la muestra [3]. Se utilizó el material de referencia certificado (MRC) DL-1a, que es un patrón de actividad específica conocida para los radioisótopos de interés, y se estimó la eficiencia del sistema para energías puntuales utilizando la ecuación:

$$\epsilon = \frac{CPS(p) - CPS(f)}{A_{ep} \gamma M_p} \quad (2)$$

dónde: $CPS(p)$ es la velocidad de conteos del patrón, $CPS(f)$ la velocidad de conteos del fondo, A_{ep} la Actividad específica del patrón, γ la Probabilidad de emisión del cuanto gamma de interés y M_p la masa del patrón.

La curva de eficiencia puede obtenerse realizando un ajuste de los puntos determinados a través de una función polinomial logarítmica de grado 3 o superior, de la forma:

$$\ln \epsilon = \sum_{i=0}^n a_i [\ln(E)]^i \quad (3)$$

Procedimiento de medición:

Cada muestra fue colocada en el tope y centro del detector y se colectó su espectro de radiación gamma durante una semana, en aras de garantizar una estadística aceptable y reducir los errores.

Las magnitudes de interés se determinaron mediante las siguientes expresiones:

Concentración de Actividad:

$$C_A = \frac{R_s}{P_\gamma \epsilon m} \quad (4)$$

Incertidumbre estándar combinada:

$$u(C_A) = C_A \sqrt{u_r^2(R_s) + u_r^2(P_\gamma) + u_r^2(\epsilon) + u_r^2(m)} \quad (5)$$

Límite Crítico o Umbral de Decisión:

$$L_c = 1,65 \frac{1}{P_\gamma \epsilon m} \sqrt{\frac{R_b}{T_b} \left(1 + \frac{T_b}{T}\right)} \quad (6)$$

Límite de Detección:

$$L_d = 3,30 \frac{1}{P_\gamma \epsilon m} \sqrt{\frac{R_b}{T_b} \left(1 + \frac{T_b}{T}\right)} = 2L_c \quad (7)$$

dónde: R_s -Tasa de conteos neta de la muestra, P_γ -Probabilidad de salida de los cuantos gamma para determinada energía, ϵ -Eficiencia absoluta para determinada energía, m -Masa seca de la muestra, R_b -Tasa de conteos del fondo, T_b -Tiempo de medición del fondo y T -Tiempo de medición (Tiempo activo).

Verificación de los resultados analíticos por método absoluto:

El correcto funcionamiento de un laboratorio analítico ambiental, se basa en la implementación de un sistema de aseguramiento de calidad de sus resultados, el cual involucra a una serie de factores que garantizan la confiabilidad de sus reportes. Pero, aunque el laboratorio cumpla con los requisitos mencionados anteriormente, es necesaria la implementación de algún método que nos permita validar el procedimiento seguido en la me-

dición. En el presente trabajo se utilizaron dos muestras certificadas para la verificación de los resultados, comparando las actividades de sus radioisótopos determinadas por vía absoluta con las reportadas.

Evaluación del riesgo de exposición:

Con el objetivo de evaluar los posibles riesgos de exposición en las distintas muestras de arena de playa estudiadas se calcularon los siguientes indicadores:

Dosis absorbida en aire (D): La dosis absorbida en aire (en nGyh^{-1}) como resultado de la concentración de la actividad específica natural de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K a la altura aproximada de 1m sobre el suelo, fue calculada utilizando la siguiente expresión [4]:

$$D(\text{nGyh}^{-1}) = 0,462C_{\text{Ra}} + 0,604C_{\text{Th}} + 0,0417C_{\text{K}} \quad (8)$$

dónde: C_{Ra} , C_{Th} y C_{K} representan las concentraciones (en Bqkg^{-1}) de Ra, Th y K en la muestra de arena de interés. El valor límite recomendado internacionalmente es de 51 nGyh^{-1} . En ella se utilizan los factores de conversión de $0,0417 \text{ nGyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ para ^{40}K , $0,0462 \text{ nGyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ para ^{226}Ra y $0,604 \text{ nGyh}^{-1}/\text{Bqkg}^{-1}$ para ^{232}Th [4]. Además, se asume que las series de decaimiento del ^{137}Cs y el ^{235}U pueden ser despreciadas, al contribuir muy poco a la dosis total proveniente de la radiación de fondo [5].

Actividad de Ra-equivalente (Ra_{eq}): La actividad de Ra-equivalente (Ra_{eq}) es la suma de las actividades de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K , basada en el criterio de que 370 Bq.kg^{-1} de ^{226}Ra , 259 Bq.kg^{-1} de ^{232}Th y 4810 Bq.kg^{-1} de ^{40}K , producen la misma proporción de dosis de radiación γ . La actividad de (Ra_{eq}) se define como:

$$Ra_{\text{eq}} = C_{\text{Ra}} + 1,43C_{\text{Th}} + 0,77C_{\text{K}} \quad (9)$$

dónde: C_{Ra} , C_{Th} y C_{K} representan la concentración de actividad del radio, el torio y potasio, respectivamente, todas ellas expresadas en Bq.kg^{-1} . El valor máximo recomendado de Ra_{eq} debe ser inferior a los 370 Bq.kg^{-1} para mantener la dosis externa inferior a 1.5 mGyh^{-1} [5].

Índice de riesgo externo (H_{ex}): Este índice se utiliza para evaluar los riesgos de radiación atribuidos a materiales radiactivos y se calcula como:

$$(H_{\text{ex}}) = \frac{C_{\text{Ra}}}{370} + \frac{C_{\text{Th}}}{259} + \frac{C_{\text{K}}}{4810} \leq 1 \quad (10)$$

Los valores de este índice deben ser inferiores a 1, previendo, de esta forma, que el riesgo de radioactividad no sea significativo. El valor máximo de la unidad para H_{ex} corresponde con el límite de 370 Bq.kg^{-1} de Ra_{eq} .

AGDE (Anual Gonadal Dose Equivalent): Las gónadas, así como la médula espinal y las células superficiales de los huesos, son considerados como órganos de interés por la UNSCEAR [1], por lo que la verificación de los valores de dosis equivalente gonadal anual, recibido por los individuos, sea de gran relevancia genética. La dosis equivalente recibida cada año por los órganos reproductivos (gónadas) de la población expuesta, se puede calcular utilizando la ecuación [5]:

$$AGDE(\mu\text{Sv y}^{-1}) = 3,09C_{\text{Ra}} + 4,18C_{\text{Th}} + 0,314C_{\text{K}} \quad (11)$$

AEDE (Anual Effective Dose Equivalent): Para estimar la dosis equivalente efectiva anual se debe tomar en cuenta: (1) el coeficiente de conversión de dosis absorbida en aire a dosis efectiva y (2), el factor de ocupación en el interior. El estimado anual promedio de dosis efectiva equivalente recibida por un miembro, se calcula utilizando el factor de conversión de $0,7 \text{ Sv Gy}^{-1}$, el cual es empleado para convertir el valor absorbido, a dosis efectiva equivalente, en humanos con una ocupación al aire libre del 20% [4]. La AEDE se calculó de la siguiente manera:

$$AEDE(\mu\text{Sv y}^{-1}) = D(\text{nGy}^{-1}\text{h}^{-1}) * 8760(\text{hy}^{-1}) * 0,2 * 0,7\text{SvGy}^{-1} * 10^{-3} \quad (12)$$

Índice de nivel de radiactividad: El índice de nivel de radiactividad se utiliza para estimar el nivel de riesgo de radiación γ asociado a radionúclidos naturales. Este índice es calculado mediante la siguiente expresión:

$$I_{\gamma} = \frac{C_{\text{Ra}}}{300\text{Bq/kg}} + \frac{C_{\text{Th}}}{200\text{Bq/kg}} + \frac{C_{\text{K}}}{3000\text{Bq/kg}} \quad (13)$$

dónde: C_{Ra} , C_{Th} y C_{K} corresponden a las concentraciones de radio, torio y potasio, respectivamente. Los valores de I_{γ} deben ser inferiores a la unidad para permanecer por debajo del límite recomendado [4].

Resultados y discusión

Eficiencia del sistema espectrométrico para muestras volumétricas:

La calibración en eficiencia del detector de Germanio hiperpuro del Espectrómetro Gamma de Bajo Fondo del Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC), en el rango de energías entre 0 y 2 MeV y utilizando una muestra volumétrica de 50 g del MRC DL-1a, se muestra en la figura 2. Como se puede apreciar, el rango de dispersión del comportamiento no es elevado, lo que permite determinar la actividad de una muestra de parámetros similares, con una precisión aceptable para este tipo de estudios.

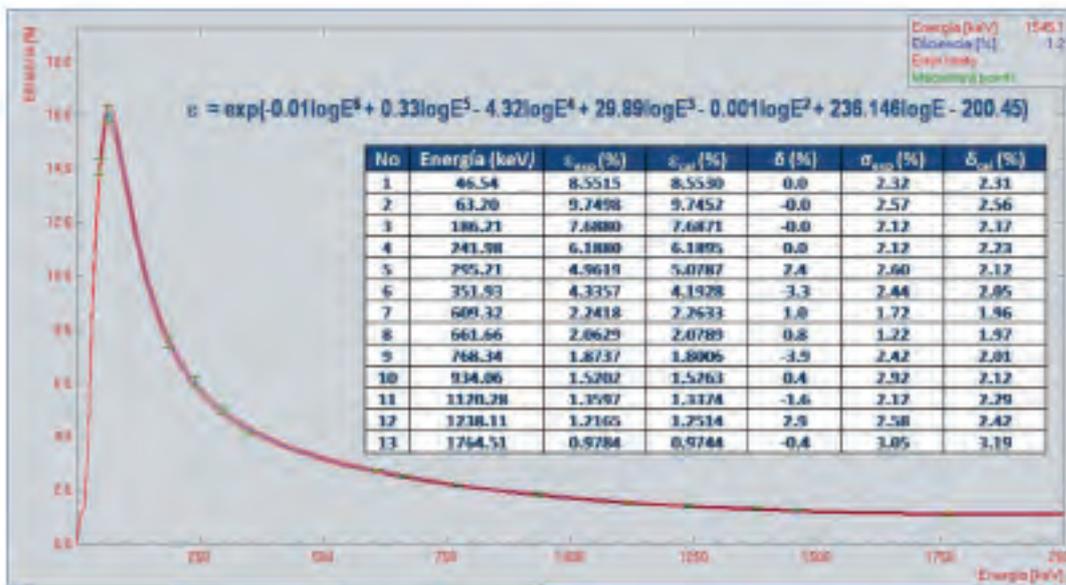


Figura 2. Curva de eficiencia del sistema de bajo fondo del CEAC, utilizando el MRC DL-1a.

Por otra parte, la comprobación analítica de la calibración en eficiencia del espectrómetro, mediante la determinación, vía absoluta, de la actividad de los radionúclidos de interés, presentes en los Materiales de Referencia Certificada IAEA-306, IAEA-375 y KCl (figura 3), ajusta a una línea recta de pendiente prácticamente unitaria ($r^2 = 0.9974$, $\rho < 0.0001$), permitiendo verificar que la calibración del espectrómetro es válida para determinar las actividades de los radionúclidos de interés en muestras ambientales de 50 gramos y en la geometría propuesta.

Estudio radiométrico de la playa Bibijagua:

La figura 4 muestra el espectro de la radiación gamma medida en las arenas negras de la playa Bibijagua. Como se puede apreciar, se definen los principales picos, correspondientes a los cuantos gamma que se emiten de los radionúclidos naturales de las series del Uranio y Torio, del radionúclido natural de ^{40}K y, aunque con menor intensidad, también se observa la línea de 662 keV, correspondiente al radionúclido antropogénico de ^{137}Cs .

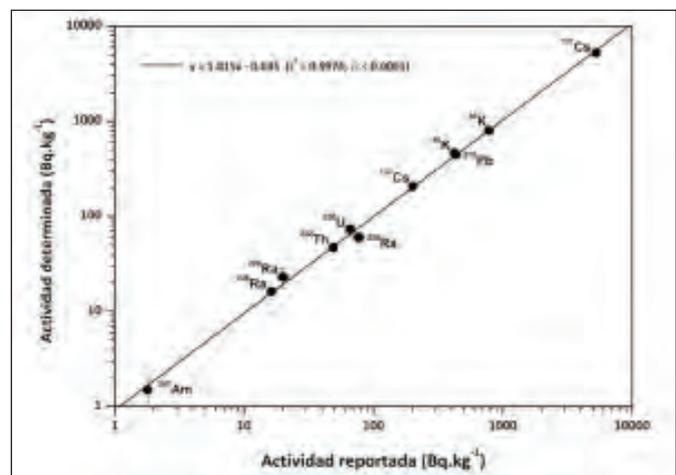


Figura 3. Comprobación analítica de la calibración en eficiencia.

Los resultados de las concentraciones de actividad en las arenas negras de Bibijagua, así como de otras playas internacionales de arenas similares se presentan en la tabla 1. Como se puede apreciar, la comparación con los resultados de estudios de playas de arenas ne-

Tabla 1. Concentración de actividad en (Bq.kg^{-1}) de radionúclidos de interés en muestras de playas de arenas negras.

Muestras	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K	^{137}Cs	Refs
Bibijagua, Cuba	47 ± 5	41 ± 1	30 ± 7	0.34 ± 0.08	-
Mandena, Madagascar	15600	3070	9	nr	[6]
Baltim, Egipto	198 ± 87	132 ± 106	236 ± 71	nr	[7]
Areia Preta, Brasil	6092 ± 29	112 ± 8	193 ± 14	nr	[8]
Rashid, Egipto	140 ± 22	111 ± 25	475 ± 36	nr	[9]
Miami Bay, Malasia	2086 ± 96	1023 ± 47	381 ± 18	nr	[10]
Temsah Lake, Egipto	11 ± 3	11 ± 2	328 ± 80	nr	[11]
Tamil Nadu, India	481 ± 9	198 ± 9	107 ± 2	nr	[12]
UNSCEAR	30	35	400	-	[4]
nr - no reportado.					

Como se puede apreciar, para la mayoría de las playas de arenas negras (figura 5), se observa una fuerte correlación lineal ($r^2 = 0.99^2$) entre las concentraciones de actividad de ^{226}Ra y ^{232}Th . Esto demuestra que los mecanismos de distribución del ^{226}Ra y el ^{232}Th en las arenas de las playas estudiadas son parecidos, por lo que se puede afirmar que éstas playas tienen un origen geológico similar [13]. La única excepción es la playa brasileña de Areia Preta, la cuál es considerada una anomalía geológica [8].

Conclusiones

Se complementa la caracterización del espectrómetro gamma del Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC), mediante la determinación de su eficiencia por vía absoluta para el análisis de muestras volumétricas. Se determinan las actividades de los radionúclidos ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K y ^{137}Cs en muestras de arenas negras de la playa de Bibijagua, las que se encuentran en el rango de actividad reportadas para playas similares en el mundo y, en todos los casos, son inferiores a los límites estipulados por la UNSCEAR. El cálculo de los indicadores: dosis en aire a 1m de altura (D), actividad de radio equivalente (Ra_{eq}), índice de riesgo externo (H_{ex}), dosis anual para las gónadas (AGDE) y dosis efectiva anual (AEDE), permitió comprobar que los usuarios de la playa de Bibijagua, no corren riesgo alguno desde el punto de vista radiológico.

Referencias bibliográficas

- [1]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Collection and preparation of bottom sediment samples for analysis of radionuclides and trace elements. IAEA-TECDOC-1360. 2003
- [2]. HASAN M, BÓDIZS D, CZIFRUS SZ. A simplified technique to determine the self-absorption correction for sediment samples. *Appl Radiat Isot.* 2002; 57: 915-918.
- [3]. VULKANAC I, DJURASEVIC M, KANDIC A, et. al. Experimental determination of the HPGe spectrometer efficiency curve. *Appl Radiat Isot.* 2008; 66: 792-795.
- [4]. UNSCEAR. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. 2000.
- [5]. KHAN IU, SUN W, LEWIS E. Review of low level background radioactivity studies conducted from 2000 to date in people Republic of China. *J Rad Res & Appl Sci.* 2020; 13(1): 406-415.

- [6]. HAO DV, DINH CN, JODŁOWSKI P, et. al. High-level natural radionuclides from the Mandena deposit, South Madagascar. *J Radioanal Nucl Chem.* 2018; 319: 1331-1338.
- [7]. HILAL MA, BORAI EH. Hazardous parameters associated with natural radioactivity exposure from black sand. *Regul Toxicol Pharm.* 2018; 92: 245-250.
- [8]. VASCONCELOS DC, LES PA, PEREIRA C, et. al. Modelling natural radioactivity in sand beaches of Guarapari, Espírito Santo State, Brazil. *World J Nucl Sci & Tech.* 2013; 3: 65-71.
- [9]. ABDEL-RAHMAN MAE, EL-ONGY SA. Analysis of radioactivity levels and hazard assessment of black sand samples from Ras-hid area, Egypt. *Nucl Eng & Tech.* 2017; 49: 1752-1757.
- [10]. SHUAIBU HK, KHANDAKER NU, ALREFAE T, et. al. Assessment of natural radioactivity and gamma-ray dose in monazite rich black sand beach of Penang Island, Malaysia. *Mar Poll Bull.* 2017; 119: 423-428.
- [11]. FARES S. Measurements of natural radioactivity level in black sand and sediment samples of the Tamsah Lake beach in Suez Canal region in Egypt. *J Radiat Res & Appl Sci.* 2017; 10: 194-203.
- [12]. PUNNIYAKOTTI J, PONNUSAMI V. Radionuclides of ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K in beach sand of southern regions in Tamilnadu State, India (Post-Tsunami). *Indian J Pure & Appl Phys.* 2017; 55: 218-230.
- [13]. MOHANTY AK, SENGUPTA D, DAS SK, et. al. Natural radioactivity in the newly discovered high background radiation area on the eastern coast of Orissa, India. *Radiat Meas.* 2004; 38: 153-165.

Recibido: 25 de febrero de 2022

Aceptado: 22 de septiembre de 2022

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización, ni la comunicación del presente trabajo.

CRedit / Conceptualización: Oscar Díaz Rizo. **Curación de datos:** Oscar Díaz Rizo, Héctor Cartas Águila, Rubén Gutiérrez Manso, Solne Reyes Peña, Grizel Pérez Zayas. **Análisis formal:** Oscar Díaz Rizo, Héctor Cartas Águila, Grizel Pérez Zayas. **Investigación:** Oscar Díaz Rizo, Héctor Cartas Águila, Rubén Gutiérrez Manso, Solne Reyes Peña, Grizel Pérez Zayas. **Metodología:** Oscar Díaz Rizo, Héctor Cartas Águila. **Validación y verificación:** Oscar Díaz Rizo, Héctor Cartas Águila, Rubén Gutiérrez Manso, Solne Reyes Peña, Grizel Pérez Zayas. **Visualización:** Oscar Díaz Rizo, Rubén Gutiérrez Manso. **Redacción – borrador original:** Oscar Díaz Rizo, Héctor Cartas Águila, Rubén Gutiérrez Manso. **Redacción – revisión y edición:** Oscar Díaz Rizo, Héctor Cartas Águila, Rubén Gutiérrez Manso, Solne Reyes Peña, Grizel Pérez Zayas.