

nucleus

ISSN 2075-5635
on line

No. 75, 2025

Publicación cuatrimestral

Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada de Cuba
Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

En este número:

**25 Aniversario
del CEAC**



www.cubaenergia.cu/nucleus/nucleus.htm

Ciencias Nucleares

Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC), 25 años construyendo un puente al desarrollo sostenible.	1
Alejandro García Moya, Aniel Guillén Arruebarrena, Yoelvis Bolaños Álvarez, Yan Miguel Gallo, Yasser Morera Gómez, Yusmila Helguera Pedraza, Arianna García Chamero, Lisbet Díaz Asencio, Ángel R. Moreira González, Liana Beatriz Carballo Rosado, Carlos Manuel Alonso Hernández	
Composición isotópica de las aguas meteóricas. Una mirada a los fundamentos teóricos y las experiencias de Cuba en su caracterización.	9
Alejandro García Moya, Carlos Manuel Alonso Hernández, Oscar Díaz Rizo, Minerva Sánchez Llull	
Comparación entre la determinación de plomo-210 en sedimentos mediante espectrometría gamma y alfa en sedimentos.....	19
Aniel Guillén Arruebarrena, Héctor Alejandro Cartas Águila, Jorge Alberto Martín Pérez, Aida Mary Abreu Díaz, Carlos Manuel Alonso Hernández	
Evaluación del potencial de gas Radón en la cuenca hidrográfica Damují en la provincia de Cienfuegos, Cuba.	22
Israel David Cedeño Fernández, Alejandro García Moya, Willy Roberto Rodríguez Miranda, Héctor Alejandro Cartas Águila	
Propuesta metodológica para el estudio del secuestro de carbono en sedimentos de ecosistemas de carbono azul en Cuba utilizando técnicas nucleares e isotópicas.	27
Liana Beatriz Carballo Rosado, Aniel Guillén Arruebarrena, Alejandro García Moya, Yusmila Helguera Pedraza, Carlos Manuel Alonso Hernández	
Evaluación de la inocuidad radiológica de pescados y vegetales de consumo en Cienfuegos, Cuba.	33
Rita Y. Sibello Hernández, YUSDiany Pereira Cuellar, Héctor Alejandro Cartas Águila	
Verificación del método de determinación de plomo en aguas naturales por espectrofotometría de absorción atómica acoplado a horno de grafito.	38
Luis Manuel Roque Albelo, Yoelvis Bolaños Álvarez, Gleisy Pérez Avilleira, Ernesto Alejandro Gálvez Acevedo	
Revistas certificadas como Publicaciones Seriadas Científico-Tecnológicas	43
Instrucciones a los autores	46

summary

Nuclear Sciences

Cienfuegos Center for Environmental Studies (CEAC), 25 years building a bridge to sustainable development.	1
Alejandro García Moya, Aniel Guillén Arruebarrena, Yoelvis Bolaños Álvarez, Yan Miguel Gallo, Yasser Morera Gómez, Yusmila Helguera Pedraza, Arianna García Chamero, Lisbet Díaz Asencio, Ángel R. Moreira González, Liana Beatriz Carballo Rosado, Carlos Manuel Alonso Hernández	
Isotopic composition of meteoric waters. A look at the theoretical foundations and experiences of Cuba in its characterization.....	9
Alejandro García Moya, Carlos Manuel Alonso Hernández, Oscar Díaz Rizo, Minerva Sánchez Llull	
A comparison between lead-210 determination in sediments by gamma and alpha spectrometry in sediments	19
Aniel Guillén Arruebarrena, Héctor Alejandro Cartas Águila, Jorge Alberto Martín Pérez, Aida Mary Abreu Díaz, Carlos Manuel Alonso Hernández	
Evaluation of the radon gas potential in the Damují hydrographic basin in the province of Cienfuegos, Cuba.	22
Israel David Cedeño Fernández, Alejandro García Moya, Willy Roberto Rodríguez Miranda, Héctor Alejandro Cartas Águila	
Methodological proposal for the study of carbon sequestration in sediments of blue carbon ecosystems in Cuba using nuclear and isotopic techniques.	27
Liana Beatriz Carballo Rosado, Aniel Guillén Arruebarrena, Alejandro García Moya, Yusmila Helguera Pedraza, Carlos Manuel Alonso Hernández	
Evaluation of the radiological safety of fish and vegetables for consumption in Cienfuegos, Cuba.	33
Rita Y. Sibello Hernández, Yusdiany Pereira Cuellar, Héctor Alejandro Cartas Águila	
Verification of the lead determination method in natural water by atomic absorption spectrophotometry coupled to graphite furnace	38
Luis Manuel Roque Albelo, Yoelvis Bolaños Álvarez, Gleisy Pérez Avilleira, Ernesto Alejandro Gálvez Acevedo	
Magazines certified as serial scientific and technological publications	43
Information for authors	46

Consejo editorial

Dra. en Ciencias Físicas Angelina Díaz García, Dr. en Ciencias Químicas José Morín Zorrilla, Dr. en Ciencias Médicas Juan Perfecto Oliva, Dr. en Ciencias Químicas Juan Jaen Osorio, Dr. en Ciencias Físicas Juan Luis François Lacouture, Dr. en Ciencias Físicas Luis Felipe Desdín García, MSc. en Ingeniería Nuclear Manuel Fernández Rondón, Dr. en Ciencias Físicas Oscar Díaz Rizo, Dr. en Ciencias Biológicas Omar García Lima, Dr. en Ciencias Ramón B. Pomés Hernández, MSc. en Ingeniería Nuclear Ramón R. Cardona, Dr. en Ciencias Físicas Raúl Oscar Barrachina Tejada












Equipo editorial

Director: Roberto Sosa Caceres / **Editor Jefe:** Luis Felipe Desdín García / **Redactor Técnico:** Manuel S. Fernández Rondón / **Edición:** Lourdes González Aguiar / **Diseño:** D.I. Liodibel P. Claro Drake / **Indización INIS:** Miriam Amado Picasso / **Referencias:** Miriam Amado Picasso / **Fotomecánica:** Alain Ciérvides Sánchez / **Producción:** Maikel Carrero Pérez

Revista arbitrada, certificada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Referenciada en las Bases de Datos INIS, CUBACIENCIAS Periódica, en el Sistema de Información LATINDEX, ULRICH'S, EBSCO, SciELO e INFORMNAUKA.



Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC), 25 años construyendo un puente al desarrollo sostenible

 Alejandro García Moya¹,  Aniel Guillén Arruebarrena¹,  Yoelvis Bolaños Álvarez¹,
 Yan Miguel Gallo¹,  Yasser Morera Gómez²,  Yusmila Helguera Pedraza¹,
 Arianna García Chamero¹,  Lisbet Díaz Asencio¹,  Ángel R. Moreira González¹,
 Liana Beatriz Carballo Rosado¹,  Carlos Manuel Alonso Hernández³

¹ Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC). Carretera a Castillo de Jagua, 1,5 km Ciudad Nuclear. CP59350 Cienfuegos, Cuba.

² Instituto de Biodiversidad y Medioambiente BIOMA, Universidad de Navarra, Pamplona, España.

³ Marine Environment Laboratories, Department of Nuclear Science and Application, International Atomic Energy Agency. 4 Quai Antoine 1er, 98000 Monaco, Mónaco.
garciamoya90@gmail.com

Resumen

El Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC) arribó a sus 25 años de fundado en 2024. Es un centro de investigación de referencia nacional e internacional, que contribuye con el estudio de procesos, evaluación y solución de conflictos ambientales, y a la sostenibilidad de recursos naturales, a través del uso de técnicas de avanzada y la excelencia de sus servicios analíticos, académicos, y de innovación tecnológica. En 2024 fue designado "Centro Colaborador del OIEA para la aplicación de técnicas nucleares e isotópicas en el estudio de ecosistemas marino-costeros en la región de Latinoamérica y el Caribe". Esta reseña ofrece una panorámica general del trabajo y resultados fundamentales del CEAC en la aplicación de técnicas nucleares y conexas para el estudio de la vigilancia radiológica ambiental, la reconstrucción de procesos ambientales, la contaminación ambiental, la hidrología isotópica, los FANs y toxinas marinas, y el carbono azul.

Palabras clave: medio ambiente; Cuba; estudios marinos; contaminación; calidad ambiental.

Cienfuegos Center for Environmental Studies (CEAC), 25 years building a bridge to sustainable development

Abstract

The Environmental Studies Center of Cienfuegos (CEAC, in Spanish) arrived its 25th anniversary in 2024. It is a national and international reference research institution, which contributes to the study of processes, the evaluation and solution of environmental conflicts, and to the sustainability of natural resources, through the use of advanced techniques and the excellence of its analytical, academic, and technological innovation services. In 2024, was designated as an IAEA Collaborating Centre for the application of nuclear and isotopic techniques in the study of coastal-marine ecosystems in the Latin American and Caribbean region. This review offers an overview of CEAC's work and results on the application of nuclear and related techniques for the study of environmental radiological monitoring, the reconstruction of environmental processes, environmental contamination, isotope hydrology, marine toxins and HABs, and blue carbon.

Key words: environment; Cuba; marine surveys; contamination; environmental quality.

Introducción

El Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC) fue fundado el 3 de noviembre de 1999, como resultado de la integración del Laboratorio Algalógico de Cienfuegos y el Laboratorio de Vigilancia Radiológica Ambiental del Centro (LVRAC), como unidad de ciencia y técnica del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), para contribuir al estudio de los problemas ambientales del territorio cienfueguero. En el año 2024, arribó a su 25 aniversario, devenido como centro de investigación subordinado a la Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada (AENTA), mediante las resoluciones del CITMA No. 208 del 2016 y No. 350 de 2019, respectivamente.

En su visión institucional el CEAC se proyecta como una entidad de referencia nacional e internacional, que contribuye con el estudio de procesos, evaluación y solución de conflictos ambientales, a la sostenibilidad de los recursos naturales, a través del uso de técnicas de avanzada y de la excelencia de sus servicios analíticos, académicos y de innovación tecnológica. Su accionar se dirige hacia el diseño, implementación, y ejecución de proyectos de investigación, innovación tecnológica e inversiones en sistemas medio ambientales; así como brindar servicios científico-técnicos ambientales especializados.

Entre sus áreas temáticas de investigación, están: 1) la reconstrucción temporal de procesos ambientales; 2) la contaminación ambiental; 3) la calidad de aguas naturales, residuales y de consumo humano; 4) la ecología y taxonomía de algas y cianobacterias; 5) la modelación de procesos ambientales; 6) el ordenamiento e impacto ambiental; 7) la percepción socioambiental; y 8) la inocuidad alimentaria; entre otros. Esta actividad científica se deriva de un único eje temático de investigación, enfocado hacia el estudio de problemas específicos y soluciones ambientales, a partir de la aplicación de técnicas nucleares y de avanzada, con enfoque en el manejo integrado de cuencas y áreas costeras.

Durante sus 25 años de historia y trabajo continuo en el estudio y solución de procesos ambientales utilizando técnicas nucleares y conexas, el CEAC ha sido reconocido por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) como Centro de Referencia para la región de Latinoamérica y El Caribe (LAC) en la aplicación de técnicas nucleares para la solución de problemas específicos del Manejo Integrado Costero, desde el año 2007; y en junio de 2024 fue designado oficialmente como "Centro Colaborador del OIEA para la aplicación de técnicas nucleares e isotópicas en el estudio de ecosistemas marino-costeros en la región de LAC".

Esta reseña pretende ofrecer una panorámica general del trabajo y resultados fundamentales que ha tenido el CEAC en la aplicación de técnicas nucleares y conexas en estudios ambientales.

Investigación y desarrollo científico.

Desde su fundación en 1999, el CEAC ha mantenido una estrategia de desarrollo científico enfocada en ser centro de referencia en la investigación e innovación tecnológica de procesos ambientales, cubriendo estudios de la zona costera a nivel de país y la región del Gran Caribe. A partir de 2019 esta estrategia se alineó con las prioridades internacionales para el desarrollo sostenible reflejadas en la Agenda 2030 [1], así como con las políticas nacionales de desarrollo económico y social del país [2-4], y de enfrentamiento al cambio climático [5], para contextualizarla a las principales necesidades de investigación vinculadas al alcance del trabajo científico de la institución, dentro y fuera del territorio nacional.

Un sello distintivo durante todo este período ha sido la incorporación y fortalecimiento de capacidades tecnológicas y de recursos humanos en técnicas nucleares y conexas, aplicadas al estudio de problemas específicos y soluciones ambientales de cuencas y áreas costeras. El soporte fundamental para la creación y sostenibilidad de estas capacidades es la colaboración internacional, a través de proyectos anclados al programa de coope-

ración técnica del OIEA, fundamentalmente en la esfera “Agua y Medio Ambiente” [6, 7].

2.1. Vigilancia Radiológica Ambiental

La vigilancia radiológica ambiental es una de las actividades que la institución ha mantenido desde sus inicios como LVRAC. Esta actividad, coordinada por el Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR), se sostiene actualmente en el marco de la Red Nacional de Vigilancia Radiológica Ambiental (RNVRA) como un servicio especializado que incluye el monitoreo de deposiciones atmosféricas totales, pastos y forrajes, leche de vaca, arenas de playas, tasa de dosis gamma de forma integrada con TLD [8].

Con este servicio se asegura la vigilancia ante el posible impacto de un accidente nuclear en el territorio cubano, siendo el CEAC una de las 4 postas activas en el país. Entre sus principales resultados ha estado el monitoreo ininterrumpido, desde el 2010, de los flujos de ^{210}Pb y ^7Be , no solo desde el punto de vista de la vigilancia radiológica ambiental, sino además como trazador de los procesos de transporte y deposición de la contaminación atmosférica [8, 9]. Adicionalmente, ha incluido el monitoreo puntual de la radiactividad en alimentos, chatarra, y materiales de la construcción.

2.2. Reconstrucción de procesos ambientales

La reconstrucción de procesos ambientales utilizando técnicas nucleares y conexas es una capacidad tecnológica del CEAC, que se ha implementado y fortalecido desde 2005, a través de la colaboración con el OIEA. El proyecto regional RLA/7/012¹, contribuyó significativamente a consolidar las capacidades del CEAC para la determinación de radionúclidos (^{210}Pb , ^{137}Cs , y ^{226}Ra) en sedimentos marinos, por espectrometría alfa y gamma, y a partir de ello implementar la determinación de tasas de acumulación y fechado de sedimentos [11]. Estas técnicas constituyen una valiosa herramienta para reconstruir tendencias temporales en procesos naturales y evaluar cambios antropogénicos inducidos [12 -14], constituyendo la base para una amplia gama de aplicaciones y resultados del CEAC, descritos en lo adelante [15 -19].

2.3. Contaminación ambiental

La contaminación ambiental es un fenómeno complejo, que demanda de un enfoque interdisciplinario para comprender su origen, destino, tendencias temporales, y efectos en los ecosistemas. El uso de técnicas de avanzada no solo permite cuantificar con precisión y veracidad sus niveles, sino que aporta valiosa información para desarrollar estrategias efectivas de mitigación y gestión, contribuyendo a la protección del medio ambiente y la salud humana.

2.3.1. Metales pesados

Desde hace más de dos décadas el CEAC cuenta con las técnicas para la caracterización de metales pesados en matrices ambientales. Entre ellas: la espectroscopía de absorción atómica, y la determinación directa de mercurio [20], ampliamente utilizadas en diversos estudios de agua, sedimentos marinos y biota a nivel nacional y regional [21 - 24]; la espectrometría de fluorescencia de rayos-X, utilizada para la caracterización cualitativa y cuantitativa de elementos metálicos y no metálicos en suelos, sedimentos y matrices atmosféricas [25]. Estas herramientas han sido esenciales para comprender el comportamiento, movilidad e impactos de los metales pesados y metaloides como contaminantes ambientales, con un enfoque en la seguridad e inocuidad alimentaria, además de su utilidad para la caracterización geoquímica de suelos y sedimentos.

La cooperación internacional a través del programa de cooperación técnica con el OIEA, así como el Fondo Mundial para el Medio Ambiente, han sido el soporte fundamental para la financiación de proyectos y el fomento de la colaboración científica, propiciando el desarrollo, sostenibilidad y aplicación de estas capacidades analíticas en estudios ambientales. Recientemente, con el proyecto MERGE, la Secretaría de la Convención de Minamata está impulsando avances significativos en la identificación de fuentes contaminantes, cuantificación, transporte y bioacumulación del mercurio en la atmósfera, suelos y biota, a nivel de Cuba y la región del Caribe. Lo anterior contribuye con evidencia científica a evaluar la eficacia de las medidas de control implementadas bajo dicha convención a mayor escala.

2.3.2. Contaminantes orgánicos

Los estudios de la contaminación orgánica realizados por el CEAC, comenzaron en 2006, evaluando la contaminación por hidrocarburos, policlorobifenilos y pesticidas organoclorados en la bahía de Cienfuegos [26,27]. Estudios similares se realizaron en organismos marinos bioconcentradores como la *Perna viridis*, por constituir una potencial fuente de alimento para consumo humano, evaluando los niveles de pesticidas organoclorados, e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) [28, 29]. Este tipo de estudios no se circunscribe solo al ambiente marino, pues en el marco del proyecto PNUMA-SAICM se evaluaron compuestos orgánicos persistentes (COPs) en aire como contaminantes atmosféricos en zonas urbanas. Estas técnicas se han utilizado además para evaluar HAPs en sedimentos del Embalse Hanabanilla, una de las principales fuentes de abasto de las provincias Villa Clara y Cienfuegos [30].

¹ RLA/7/012 “Aplicación de técnicas nucleares en la solución de problemas específicos del Manejo Integrado de Zonas Costeras en el Caribe” (2007-2012)

² RLA/MERGE “Fortalecimiento del marco nacional de gestión para la implementación del Convenio de Minamata en Cuba, enfocados en las mediciones de las existencias de mercurio, así como en la evaluación de los sitios contaminados” (2024-2026).

³ PNUMA-SAICM “Creación de capacidades para Laboratorios de COPs en Cuba” (2013-2015)

En 2018 tras el vertimiento de hidrocarburos a la bahía de Cienfuegos, provocado por la tormenta subtropical Albert, se creó un proyecto de emergencia del OIEA para dar respuesta al monitoreo ambiental de HAPs en agua y sedimentos superficiales de la bahía. En este marco se fortalecieron capacidades analíticas de Fluorimetría *in situ* y de Cromatografía de Gases Acoplada a Espectrometría de Masas (GC-MS). Estas capacidades han contribuido al monitoreo de impacto ambiental de otras situaciones de emergencia, como la explosión de la Base de Supertanqueros de Matanzas en 2022, donde se evaluó la contaminación por HAPs en aire, agua, suelos y alimentos asociados al área de incidencia de las deposiciones atmosféricas.

2.3.3. Contaminación atmosférica

El estudio de la contaminación atmosférica es una de las líneas de trabajo que acompañaron al CEAC desde sus inicios como LVRAC. No obstante, se debilitó considerablemente durante la primera década de este siglo. En 2014, la colaboración científica internacional con la Universidad de Navarra en España contribuyó a revitalizar el Servicio Estatal para el estudio de la contaminación atmosférica en Cienfuegos. A partir de entonces, comenzaron los estudios de cuantificación y la composición química del material particulado atmosférico, siendo pioneros en Cuba en el empleo del modelo receptor *Positive Matrix Factorization* (PMF). El empleo de isótopos estables y relaciones elementales en estos estudios permitió evaluar de forma integrada la calidad del aire [31], a partir de la identificación y cuantificación del aporte de fuentes de contaminación atmosférica [32 - 36]. Estos resultados propiciaron la colaboración científica en estudios multidisciplinarios a escala global [37- 39], y nacional [40].

Una de las metodologías implementadas durante este período, fue el empleo de *Tillandsia recurvata* L. como biomonitor de la calidad del aire [41]. Al ser una especie de amplia distribución en el territorio nacional, ha sido empleada exitosamente en varias urbes cubanas como Cienfuegos y Santa Clara [42]. Esta metodología constituye una de las fortalezas incorporadas a las capacidades del CEAC para el estudio de la contaminación del aire hoy en Cuba. Su aplicación denota especial significancia ante el actual deterioro de la infraestructura disponible en el país para este tipo de estudios, sobre todo por su efectividad, sencillez, bajo costo, bajo consumo de recursos y por su aplicabilidad a amplias zonas (urbanas o rurales) en tiempos relativamente cortos.

2.3.4. Microplásticos

El estudio de microplásticos (MPs) es una de las temáticas incorporadas recientemente a las líneas de investigación del CEAC. Los primeros estudios sobre este contaminante iniciaron en 2016 con la identificación y cuantificación de MPs en agua de mar, sedimentos y organismos marinos en la Bahía de Cienfuegos [43, 44].

A partir de 2018, los proyectos nacionales y regionales de cooperación científica internacional con el

OIEA (RLA/7/022, RLA/7/025, CUB/7/010 y RLA/7/028), contribuyeron significativamente al fortalecimiento de capacidades científico-técnicas del CEAC para el desarrollo de esta línea de investigación. La colaboración internacional, dentro de la Red de Investigación de Estresores Marinos - Costeros en Latinoamérica y El Caribe (REMARCO), propició la integración y estandarización de protocolos regionales para el monitoreo de MPs en arenas de playa [45] y aguas marino costeras superficiales, sirviendo de antesala para potenciar esta línea de investigación en la región de LAC. Durante este período se implementó en el CEAC un proyecto nacional enfocado en el monitoreo de microplásticos entre 300 μm y 5 mm en playas de la región centro-sur y centro-norte de la isla [46] y arrecifes de corales alrededor de la plataforma cubana. Adicionalmente se realizaron las primeras determinaciones de microplásticos en deposiciones atmosféricas [47] resultados que marcaron pauta en el estudio de este contaminante emergente en el país y la región.

Los esfuerzos en curso apuntan hacia el estudio de partículas inferiores a 300 μm , la presencia de MPs en agua de consumo humano, el movimiento de estos contaminantes a través de las cadenas tróficas y la evaluación de tendencias temporales utilizando los sedimentos como registros ambientales.

2.4. Hidrología Isotópica

Desde el año 2015 el CEAC ha estado directamente involucrado al estudio y monitoreo de isótopos en las precipitaciones de Cuba, así como de sistemas hídricos de interés para el territorio Cienfueguero. Con la implementación del proyecto nacional CUB/7/009, se logró establecer una Red Nacional de Hidrología Isotópica en Precipitaciones (RNHIP) [48, 49]; y un laboratorio con capacidad para la determinación de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en agua [50]; $\delta^{13}\text{C}$ en el carbono inorgánico disuelto [51]; $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en matrices sólidas (suelo, sedimentos y material biológico) [52]; y concentración de ^{222}Rn en agua [53].

Durante este período se desarrollaron herramientas para aplicar la hidrología isotópica a escala nacional y contribuir a la gestión integrada y sostenible de recursos hídricos. Entre los principales resultados alcanza-

⁴ RLA/7/022 "Fortalecimiento de la vigilancia y respuesta regional para entornos marinos y costeros sostenibles (ARCAL CXLV)" (2018-2019)

⁵ RLA/7/025 "Fortalecimiento de las capacidades en el manejo marino y costero mediante la aplicación de técnicas nucleares e isotópicas" (2020-2023)

⁶ CUB/7/010 "Fortalecimiento de la salud de los ecosistemas marinos para el desarrollo sostenible en Cuba: un enfoque integral mediante técnicas nucleares e isotópicas" (2020-2023)

⁷ RLA/7/028 "Fortalecimiento de las capacidades regionales de aplicación de técnicas nucleares e isotópicas para aumentar los conocimientos sobre los factores de estrés que afectan a la gestión marina y costera sostenible (ARCAL CLXXXIX)" (2024-2027).

⁸ CUB/7/009 "Fortalecimiento de las capacidades de hidrología isotópica para contribuir a la gestión sostenible de los recursos hídricos en Cuba" (2016-2019)

dos: 1) se caracterizó la variabilidad espacial y temporal de la composición isotópica en las precipitaciones para Cuba [54, 55]; 2) se evaluó la incorporación de nutrientes a sistemas hídricos superficiales y subterráneos [56]; 3) se evaluaron el origen y transformaciones del nitrógeno atmosférico precipitable [57, 58]; 4) se caracterizó la composición isotópica de las precipitaciones asociadas a tormentas y ciclones tropicales en el contexto nacional y regional [59 - 61]; 5) se cartografió el potencial de radón en suelo y aguas subterráneas en una cuenca de interés territorial [62]; y 6) se desarrollaron herramientas para evaluar el origen de la salinización en aguas subterráneas [63].

2.5. Floraciones de Algas Nocivas y toxinas marinas

En 2009, el CEAC se vinculó a un programa regional de investigaciones en el marco del proyecto regional RLA/7/014, enfocado al diseño e implementación de Sistemas de Alerta Temprana para evaluar el potencial tóxico derivado de las Floraciones de Algas Nocivas (FANs) en países de LAC [64]. Como resultado de las experiencias durante más de 15 años de trabajo sostenido en esta línea, en el CEAC se han creado capacidades técnicas para: 1) la identificación morfológica de géneros y especies de microalgas causantes de FANs; 2) el aislamiento y cultivo de microalgas potencialmente tóxicas; 3) la extracción de toxinas y la evaluación de la toxicidad en organismos marinos mediante el Ensayo de Unión del radioligando al Receptor (r-RBA) [65]; 4) la identificación molecular de especies de microalgas y cianobacterias potencialmente tóxicas.

El r-RBA es un bioensayo funcional que utiliza toxinas marcadas con ^3H como estándares. Esta técnica fue implementada y optimizada en el CEAC para el análisis primario de muestras potencialmente contaminadas con ciguatoxinas [66]. Su uso rutinario pudiera contribuir a la futura revisión y actualización de la información sobre especies marinas sometidas a regulación pesquera en Cuba. La incorporación de herramientas moleculares para la identificación de las especies de microalgas es una estrategia de fortalecimiento en curso, que contribuirá a una mejor comprensión de las interacciones ecológicas que se manifiestan en las áreas de mayor incidencia de ciguatera y, a la postre, al diseño de programas de monitoreo más efectivos que contribuyan a disminuir el riesgo asociado a esta intoxicación.

2.6. Carbono azul

El término carbono azul refiere a todas las formas de carbono almacenado en la biomasa y los sedimentos de ecosistemas marino-costeros [67]. Este enfoque determina la relevancia de estos hábitats como sumideros de carbono, esenciales para la captura de CO_2 atmosféricos y como solución basada en naturaleza para mitigar

el cambio climático [68]. Estudios globales y regionales confirman que más del 70 % del carbono capturado por este tipo de hábitats (manglares, marismas y pastizales marinos) se encuentra almacenado en los sedimentos [69,70]. En tal sentido, y aprovechando las capacidades generadas para la reconstrucción de procesos ambientales y el estudio de los sedimentos en la zona costera, el CEAC ha definido esta como una de sus líneas temáticas de desarrollo científico.

En 2019, con la participación del CEAC en el proyecto ECOVALOR, se realizaron los primeros estudios de secuestro de carbono en sedimentos de manglares y herbazales del humedal Ciénaga de Zapata. En estos estudios se incorporaron las metodologías de Kauffman et. al. 2013 [71] y Howard et al. 2014 [72], y se integra la técnicas nucleares e isotópicas ya establecidas en el CEAC para la reconstrucción de procesos ambientales, referidas en la sección 2.1.

Este trabajo se ha potenciado recientemente con el proyecto nacional CUB/7/010, considerando su relevancia para las estrategias nacionales de adaptación y mitigación al cambio climático “Tarea Vida” [5], así como para las Contribuciones Nacionalmente Determinadas [73], y sus potencialidades para insertar a Cuba en los mercados de carbono [74]. Actualmente este esfuerzo se ha consolidado a nivel nacional, con la integración de las instituciones involucradas en el estudio, conservación y manejo de estos hábitats, a partir de la definición de una estrategia nacional para la contabilización del carbono azul en Cuba [75].

CEAC, Centro Colaborador del OIEA

Como resultado del trabajo realizado en sus 25 años de historia, así como de los avances obtenidos, capacidades de infraestructura tecnológica y recursos humanos, en junio de 2024 el CEAC fue designado como “Centro Colaborador del OIEA para la Aplicación de Técnicas Nucleares e Isotópicas en el Estudio de Ecosistemas Costeros-Marinos en la Región de Latinoamérica y el Caribe” [76].

Este Acuerdo de Colaboración entre instituciones tiene como objetivo fundamental contribuir a la integración y fortalecimiento de las capacidades regionales, apoyando a países miembros mejorar sus capacidades, conocimientos, y habilidades para evaluar impactos antropogénicos en ecosistemas marino-costeros, y evaluar potenciales estrategias de mitigación. El papel del CEAC en este convenio será funcionar como centro regional de capacitación; contribuir con la experticia de sus especialistas para la aplicación de estas técnicas en la región; así como ofrecer sus servicios científico-técnicos especializados y de análisis de laboratorio. El plan de trabajo acordado (2024-2028), cubre diversas áreas temáticas como: el monitoreo de la acidificación

⁹ RLA/7/014 “Diseñando e Implementando Sistemas de Alerta Temprana y Evaluación de la Toxicidad de Brotes de Algas Dañinas en la Región del Caribe, Aplicando Técnicas Nucleares Avanzadas, Evaluaciones Radioecológicas y Bioensayos (ARCAL CXVI)” (2009-2014)

¹⁰ ECOVALOR “Incorporando consideraciones ambientales múltiples y sus implicaciones económicas, en el manejo de los paisajes, bosques y sectores productivos en Cuba” (2018-2024)

oceánica, la reconstrucción de procesos ambientales, la evaluación de la contaminación (metales pesados, compuestos orgánicos, y microplásticos); la eutrofización costera; la ocurrencia de FANs y la cuantificación de toxinas marinas; y el carbono azul como solución basada en naturaleza.

Conclusiones

Durante sus 25 años de historia en el estudio y solución de procesos ambientales utilizando técnicas nucleares y conexas, el CEAC ha tenido resultados concretos sobre la base del fortalecimiento la infraestructura tecnológica institucional, no solo de la instrumentación analítica, sino también de sus recursos humanos. A día de hoy se consolida como un centro de investigación de referencia nacional e internacional, con una marcada presencia en la región de LAC, en lo concerniente a la aplicación de técnicas nucleares e isotópicas en estudios ambientales y en particular en ecosistemas marino-costeros. La diversidad de temáticas que han desarrollado y mantienen hoy dentro de su campo de acción, así como el enfoque integrador del trabajo científico alineado con las prioridades nacionales e internacionales, hacen de su labor un puente al desarrollo sostenible.

Reconocimientos

Los autores de esta reseña reconocen en especial, el aporte de todos los trabajadores y amigos del CEAC, dentro y fuera de Cuba, que han contribuido y contribuyen cada día con su accionar, a que este centro sea y se mantenga como el exitoso ejemplo del proyecto institucional de una gran familia. Reconocen en particular el significativo apoyo brindado por el OIEA y la AENTA para sustentar la actividad y desarrollo científico técnico del CEAC durante sus 25 años y para el futuro.

Referencias bibliográficas

- Naciones Unidas. Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. A/RES/70/1. Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015. Naciones Unidas, 2015.
- Cuba. Partido Comunista de Cuba (PCC). Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución. PCC, 2011.
- Cuba. Ministerio de Economía y Planificación (MEP). Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el año 2030 (PNDES 2030). MEP, 2019.
- Cuba. Partido Comunista de Cuba (PCC). Conceptualización Del Modelo Económico y Social Cubano de Desarrollo Socialista. Lineamientos de La Política Económica y Social Del Partido y La Revolución Para El Período 2021-2026. 2020.
- Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA). Enfrentamiento al cambio climático en la República de Cuba. Tarea Vida. CITMA, 2017.
- Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). El programa de cooperación técnica del OIEA. Resultados en favor de la paz y el desarrollo.
- Cuba. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA)- Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Marco Programático Nacional 2024-2030. CITMA-OIEA, 2024.
- WALWYN SALAS G, GONZÁLEZ MESA JE, MOLINA PÉREZ D, et. al. CPHR: 35 Años al servicio de la protección radiológica. La salud y el medio ambiente. Nucleus.2020; (67): 6-13.
- ALONSO HERNÁNDEZ CM, MORERA GÓMEZ Y, CARTAS ÁGUILA H, GUILLÉN ARRUEBARRENA A. Atmospheric deposition patterns of 210Pb and 7Be in Cienfuegos, Cuba. Journal of Environmental Radioactivity. 2014; 138: 149-155. Available in: doi:10.1016/j.jenvrad.2014.08.023.
- MORERA GÓMEZ Y, ALONSO HERNÁNDEZ CM, CARTAS ÁGUILA HA. 10-Years assessment of 7Be and 210Pb in atmospheric bulk depositions in Cienfuegos (Cuba). Journal of Environmental Radioactivity. 2022; 246: 106831. Available in: doi:10.1016/j.jenvrad.2022.106831.
- SÁNCHEZ CABEZA JA, DÍAZ ASENCIO M, RUIZ FERNÁNDEZ AC. Radiocronología de sedimentos costeros utilizando 210Pb: modelos, validación y aplicaciones. Viena: OIEA, 2012.
- HU J, ZHANG G, LI K, PENG, P. Increased eutrophication offshore Hong Kong, China during the past 75 years: evidence from high-resolution sedimentary records. Marine Chemistry. 2008; 110(1-2): 7-17. Available in: doi:10.1016/j.marchem.2008.02.001.
- RUIZ FERNÁNDEZ AC, HILLAIRE MARCEL C. 210Pb-Derived ages for the reconstruction of terrestrial contaminant history in the Mexican Pacific coast: potential and limitations. Marine Pollution Bulletin. 2009; 59: 134-145.
- JIANJUN J, JIAN HUA G, YI FEI L, et. al. Environmental changes in Shamei Lagoon, Hainan Island, China: interactions between natural processes and human activities. Journal of Asian Earth Sciences. 2012; 52: 158-168.
- ALONSO HERNÁNDEZ CM, PÉREZ SANTANA S, MUÑOZ CARAVACA A, et. al. Historical trends in heavy metal pollution in the sediments of Cienfuegos bay (Cuba), Defined by 210Pb and 137Cs Geochronology. Nucleus. 2005; (37): 20-26.
- ALONSO HERNÁNDEZ CM, DÍAZ ASENCIO M, MUÑOZ CARAVACA A, et. al. Recent changes in sedimentation regime in Cienfuegos bay, Cuba, as inferred from 210Pb and 137Cs vertical profiles. Continental Shelf Research. 2006; 26: 153-167.
- DÍAZ ASENCIO M, ALONSO HERNÁNDEZ CM, BOLAÑOS ÁLVAREZ Y, et. al. One Century sedimentary record of Hg and Pb pollution in the Sagua Estuary (Cuba) derived from 210Pb and 137Cs chronology. Marine Pollution Bulletin. 2009; 59: 108-115.
- DÍAZ ASENCIO M, ALVARADO JAC, ALONSO HERNÁNDEZ CM, et. al. Reconstruction of metal pollution and recent sedimentation processes in Havana bay (Cuba): a tool for coastal ecosystem management. Journal of Hazardous Materials. 2011; 196: 402-411.
- ALONSO HERNÁNDEZ CM, GARCÍA MOYA A, TOLOSA I, et. al. Stable carbon and nitrogen isotope ratios as tools to evaluate the organic matter sources and carbon burial in a tropical lagoon of the Caribbean Sea. Continental Shelf Research. 2017; 148. Available in: [10.1016/j.csr.2017.08.001](https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.08.001).
- BOLAÑOS ÁLVAREZ Y, COS NEGRET K, GUILLÉN ARRUEBARRENA A, TORRES MARTÍN A. Mercury determination method in sediment and biological tissue using direct mercury analyzer (DMA-80). Revista Cubana de Química. 2016; 28(3): 784-792.
- DÍAZ ASENCIO M, SÁNCHEZ CABEZA JA, BOLAÑOS ÁLVAREZ Y, et. al. Un siglo de sedimentación y contaminación por Hg en la desembocadura del río Sagua La Grande (Cuba). Ciencias Marinas. 2014; 40: 321-337. Disponible en: doi:10.7773/cm.v40i4.2472.
- ALONSO HERNÁNDEZ CM, MARTÍN PÉREZ J, GASCO C, et. al. Vertical distribution and inventories of 239+240Pu and mercury in Sagua la Grande estuary, Cuba. Journal of Environmental Radioactivity. 2012; 112: 23-28. Available in: doi:10.1016/j.jenvrad.2012.03.004.
- OLIVARES RIEUMONT S, LIMA L, RIVERO S, et. al. Mercury levels in sediments and mangrove oysters, Crassostrea Rizophorae, from the North Coast of Villa Clara, Cuba. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2012; 88: 589-593, Available in: doi:10.1007/s00128-012-0544-8.
- BOLAÑOS ÁLVAREZ Y, ALONSO HERNÁNDEZ CM, MORABITO R, et. al. Mercury contamination of riverine sediments in the vicinity of a mercury cell chlor-alkali plant in Sagua River, Cuba. Chemosphere. 2016; 152: 376-382. Available in: doi:10.1016/j.chemosphere.2016.03.025.
- MORERA GÓMEZ Y, ALONSO HERNÁNDEZ CM, JIMÉNEZ GONZÁLEZ Y, et. al. Variabilidad anual de los flujos atmosféricos de elementos trazas y mayoritarios en Cienfuegos en los últimos 11 años (2011-2021). Universidad y Sociedad. 2022; 14.

- [26]. TOLOSA I, MESA ALBERNAS M, ALONSO HERNÁNDEZ CM. Organochlorine contamination (PCBs, DDTs, HCB, HCHs) in sediments from Cienfuegos bay, Cuba. *Marine Pollution Bulletin*. 2010; 60: 1619-1624.
- [27]. TOLOSA I, MESA ALBERNAS M, ALONSO HERNÁNDEZ CM. Inputs and sources of hydrocarbons in sediments from Cienfuegos bay, Cuba. *Marine Pollution Bulletin*. 2009;58: 1624-1634.
- [28]. ALONSO HERNÁNDEZ CM, GÓMEZ BATISTA M, CATTINI C, VIL-LENEUVE JP. Organochlorine pesticides in green mussel, *Perna Viridis*, from the Cienfuegos bay, Cuba. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2012; 89: 1.
- [29]. MIGUEL GALLO Y, GÓMEZ BATISTA M, ALONSO HERNÁNDEZ CM. Levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in perna viridis in Cienfuegos bay, Cuba. *Polycyclic Aromatic Compounds*. 2019; 39: 139-147. Available in: doi:10.1080/10406638.2017.1293697.
- [30]. RIBOT V, DIAZ ASENCIO M, MIGUEL GALLO Y. Niveles de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) acumulados en sedimentos del embalse Hanabanilla, Villa Clara, Cuba. *Revista Infociencia*. 2018; 22(1): 1-13.
- [31]. Norma Cubana. Calidad del aire -contaminantes- concentraciones máximas admisibles y valores guías en zonas habitables. NC 1020:2014. 2014.
- [32]. MORERA GÓMEZ Y, ALONSO HERNÁNDEZ CM, WIDORY D, et. al. Contents, distribution and sources of lanthanoid elements in rural and urban atmospheric particles in Cienfuegos (Cuba). *Atmospheric Pollution Research*. 2020; 11(7). Available in: doi:10.1016/j.apr.2020.04.004.
- [33]. MORERA GÓMEZ Y, SANTAMARÍA JM, ELUSTONDO D, et. al. Carbon and nitrogen isotopes unravels sources of aerosol contamination at caribbean rural and urban coastal sites. *Science of The Total Environment*. 2018; 642: 723-732. Available in: doi:10.1016/j.scitotenv.2018.06.106.
- [34]. MORERA-GÓMEZ Y, ALONSO HERNÁNDEZ CM, CARTAS ÁGUILA HA, et. al. Elucidating the sources and dynamics of PM10 aerosols in Cienfuegos (Cuba) using their multi-stable and radioactive isotope and ion compositions. *Atmospheric Research*. 2020; 243: 105038. Available in: doi:10.1016/j.atmosres.2020.105038.
- [35]. MORERA GÓMEZ Y, ELUSTONDO D, LASHERAS E, et. al. Chemical characterization of pm10 samples collected simultaneously at a rural and an urban site in the Caribbean coast: local and long-range source apportionment. *Atmospheric Environment*. 2018; 192: 182-192. Available in: doi:10.1016/j.atmosenv.2018.08.058.
- [36]. MORERA GÓMEZ Y. Chemical composition and sources of particulate matter across urban and rural sites in the Caribbean region of Cienfuegos (Cuba) [tesis de doctorado]. University of Navarra: Pamplona, Spain, 2019. Disponible en: <https://dadun.unav.edu/server/api/core/bitstreams/94d95fd8-d904-4f96-9545-910d3d380ec2/content>.
- [37]. LU L, LI L, RATHOD S, et. al. Characterizing the atmospheric Mn cycle and its impact on terrestrial Biogeochemistry. *Global Biogeochemical Cycles*. 2024; 38(4): e2023GB007967. doi:10.1029/2023GB007967.
- [38]. RATHOD SD, HAMILTON DS, NINO L, et. al. Constraining present-day anthropogenic total iron emissions using model and observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2024; 129: e2023JD040332. Available in: doi:10.1029/2023JD040332.
- [39]. WONG MY, RATHOD SD, MARINO R, et. al. Anthropogenic perturbations to the atmospheric molybdenum cycle. *Global Biogeochemical Cycles*. 2021; 35: e2020GB006787. Available in: doi:https://doi.org/10.1029/2020GB006787.
- [40]. ÁLVAREZ CRUZ A, SCHALM O, MORERA HERNÁNDEZ LE, et. al. Benchmarking low-cost particulate matter sensors: evaluating performance under controlled environmental conditions using low-cost experimental setups. *Atmosphere*. 2025; 16: 172. Available in: doi:10.3390/atmos16020172.
- [41]. MORERA GÓMEZ Y, ARMAS CAMEJO A, SANTAMARÍA JM, et. al. Chemical and C and N stable isotope compositions of three species of epiphytic tillandsia in a Caribbean coastal zone: air pollution sources and biomonitoring implications. *Isotopes in Environmental and Health Studies*. 2024; 60: 141-161. Available in: doi:10.1080/10256016.2024.2304756.
- [42]. MORERA GÓMEZ Y, ALONSO HERNÁNDEZ CM, ARMAS CAMEJO A, et. al. Pollution monitoring in two urban areas of Cuba by using *Tillandsia recurvata* (L.) L. and top soil samples: spatial distribution and sources. *Ecological Indicators*. 2021; 126:107667. Available in: doi:10.1016/j.ecolind.2021.107667.
- [43]. GARCÍA CHAMERO A, ALONSO HERNÁNDEZ CM, CHAMERO LAGO D. First evidence of microplastics in Cienfuegos bay, Cuba. *ECOSISTEMAS*. 2020; 29(3): 2085. Available in: doi:10.7818/ECOS.2085.
- [44]. REYES NOA D. Presencia de microplásticos en el tracto digestivo de peces de la Bahía de Cienfuegos, Cuba [tesis en opción al título académico de Lic. en Biología]. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara, Cuba, 2019.
- [45]. ALONSO HERNÁNDEZ CM, BARRIENTOS EE, CARRASCO PALMA D, et. al. Determinación de la abundancia de microplásticos en arenas de playa. *Red de Investigación de Estresores Marino-Costeros de América Latina y el Caribe (REMARCO)*, 2024. Disponible en: <https://remarco.org/wp-content/uploads/2025/02/MP-P-01-Determinacion-de-Microplasticos-en-Arenas-de-Playa-FEB-2025.pdf>.
- [46]. GARCÍA VARENS MA, ALONSO HERNÁNDEZ CM, GARCÍA CHAMERO A, et. al. Assessment of microplastics particles (0.3–5 Mm) in Sandy beaches of Cuba. *Marine Pollution Bulletin* 2025; 214: 117786. Available in: doi:10.1016/j.marpolbul.2025.117786.
- [47]. PESCOYO TORRES BM, GARCÍA VAREN S M, HELGUERA M, PEDRAZA Y, MORERA GÓMEZ Y. Microplásticos en deposiciones atmosféricas en Cienfuegos, Cuba. *Universidad y Sociedad*. 2023; 15: 407-414.
- [48]. GARCÍA MOYA A, ALONSO HERNÁNDEZ CM. Descripción de la Red Nacional de Hidrología Isotópica en Precipitaciones (RNHIP). *Informes Proyecto ISOAGUA*. Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC), 2017. p. 28;.
- [49]. GRÖNING M, LUTZ HO Z, ROLLER LUTZ M, et. al. Simple rain collector preventing water re-evaporation dedicated for d18O and d2H analysis of cumulative precipitation samples. *Journal of Hydrology*. 2012; 448-449: 195-200.
- [50]. GARCÍA MOYA A. Procedimiento para la determinación de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ Y $\delta^2\text{H}$) en aguas naturales. Cienfuegos, 2020.
- [51]. GARCÍA MOYA A. Procedimiento para la determinación de $\delta^{13}\text{C}$ del carbono inorgánico disuelto en aguas naturales. Cienfuegos, 2022.
- [52]. CARBALLO ROSADO L. Procedimiento para la determinación de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en suelos, sedimentos, material biológico y material particulado. Cienfuegos, 2020.
- [53]. CARTAS ÁGUILA H. Procedimiento para la determinación de la concentración de actividad de Rn-222 en agua. Cienfuegos, 2020.
- [54]. GARCÍA MOYA A, ALONSO HERNÁNDEZ CM, ORTEGA L, et. al. RNHIP Data set on the isotopic composition of meteoric waters in Cuba "IsotopeDataBaseCubaPrecip10.06.2024." 2024. Available in: doi:10.6084/m9.figshare.26061526.v1.
- [55]. GARCÍA MOYA A, ALONSO HERNÁNDEZ CM, SÁNCHEZ MURILLO R, et. al. Spatiotemporal characterization of the isotopic composition of meteoric waters in Cuba. *Sci Data*. 2024; 11: 1398. Available in: doi:10.1038/s41597-024-04178-z.
- [56]. MATIATOS I, WASSENAAR LI, MONTEIRO LR, et. al. Global patterns of nitrate isotope composition in rivers and adjacent aquifers reveal reactive nitrogen cascading | communications earth & environment. *Communications Earth & Environment*. 2021;2:Available in: doi:10.1038/s43247-021-00121-x.
- [57]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Monitoring stable nitrogen and oxygen isotope compositions of nitrate in atmospheric precipitation. IAEA-TECDOC-2050. Vienna: IAEA, 2024. pp. 1-44.
- [58]. GARCÍA MOYA A, MORERA GÓMEZ Y. Evaluada la composición isotópica de los nitratos disueltos en agua de lluvia. Proyecto ISOAGUA: mejora de la gestión sostenible de los Recursos Hídricos en Cuba con el fortalecimiento de la Capacidad Nacional de Hidrología Isotópica. Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC): Cienfuegos, Cuba, 2024. p. 26.
- [59]. DÍAZ PÉREZ RA. Estudio de las precipitaciones asociadas a los ciclones tropicales Elsa e Ida a partir de isótopos estables [tesis de grado]. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas de la Universidad de La Habana (Instec-UH): La Habana, Cuba, 2022.
- [60]. SÁNCHEZ MURILLO R, DURÁN QUESADA AM, ESQUIVEL HERNÁNDEZ G, et. al. Deciphering key processes controlling rainfall isotopic variability during extreme tropical cyclones. *Nat*

- Commun. 2019; 10: 432. Available in: doi:10.1038/s41467-019-12062-3.
- [61]. SÁNCHEZ MURILLO R, HERRERA DA, FARRICK KK, et. al. Stable isotope tempestology of tropical cyclones across the North Atlantic and Eastern Pacific Ocean basins. *Annals of the New York Academy of Sciences*.2024;n/a. Available in: doi:10.1111/nyas.15274.
- [62]. CEDEÑO FERNÁNDEZ ID. Evaluación del potencial de gas radón en la cuenca hidrográfica Damují en la provincia de Cienfuegos, Cuba, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”: La Habana, Cuba, 2024.
- [63]. GARCÍA MOYA A, ALONSO HERNÁNDEZ C, BOZA RAMÓN M. Evaluación de la salinización en acuíferos costeros utilizando técnicas hidroquímicas convencionales e hidrología isotópica. Caso de Estudio Acuífero CF-2, Cienfuegos, Cuba. Proyecto ISOVIDA 2022. Resultado 4, salida 4.1. Departamento de Estudios de la Contaminación Ambiental. Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC): Cienfuegos, Cuba, 2022. pp. 1-23.
- [64]. REGUERA B, ALONSO R, MOREIRA GONZÁLEZ A, MÉNDEZ S. Guía para el diseño y puesta en marcha de un plan de seguimiento de microalgas productoras de toxinas 2011. Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000214510_eng.
- [65]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Detection of harmful algal toxins using the radioligand receptor binding assay. A manual of methods. 2013.
- [66]. DÍAZ ASECIO L, CHAMERO LAGO D, ROJAS ABRAHANTES GL, et. al. Establishing a receptor binding assay for ciguatoxins: challenges, assay performance and application. *Toxins (Basel)*. 2024; 16: 60. Available in:doi:10.3390/toxins16010060.
- [67]. SHEEHY J, PORTER J, BELL M, KERR S. Redefining blue carbon with adaptive valuation for global policy. *Science of the Total Environment*. 2023; 908: 168253. Available in: doi:10.1016/j.scitotenv.2023.168253.
- [68]. BENNETT M, MARCH A, RAGUAIN J, FAILLER P. Blueprint for blue carbon: lessons from Seychelles for small island states. *Oceans*. 2024; 5(1): 81-108. Available in: doi:10.3390/oceans5010006.
- [69]. TAILLARDAT P, FRIESS DA, LUPASCU M. Mangrove blue carbon strategies for climate change mitigation are most effective at the national scale. *Biology Letters*. 2018; 14: 20180251. Available in: doi:10.1098/rsbl.2018.0251.
- [70]. HATJE V, COPERTINO M, PATIRE VF, et. al. Vegetated coastal ecosystems in the southwestern atlantic ocean are an unexploited opportunity for climate change mitigation. *Communications Earth & Environment*. 2023; 4(1). Available in: doi:<https://doi.org/10.1038/s43247-023-00828-z>.
- [71]. BOONE KAUFFMAN J, DONATO DC, ADAME MF. Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. 2013.
- [72]. HOWARDJ, HOYT S, ISENSEE K,et. al. Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves.Tidal Salt Marshes, and Seagrasses. 2014.
- [73]. República de Cuba. Contribución Nacionalmente Determinada 3.0. Febrero, 2025. Disponible en: <https://unfccc.int/sites/default/files/2025-02/REPUBLICA%20DE%20CUBA%20CND3.0.pdf>.
- [74]. GAUTREAU S & CORREA V. Blue Economies and nature-based solutions for enhanced climate action in Latin America and Caribbean small island developing states 2023. United Nations Development Programme (UNDP), 2023. Available in: <https://www.undp.org/latin-america/publications/blue-economies-and-nature-based-solutions>.
- [75]. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA). Fundamentos científicos para la elaboración de la hoja de ruta para contabilizar el carbono azul en Cuba. CITMA, 2024.
- [76]. MCDONALD E. IAEA's First cuban collaborating centre for coastal and marine health. IAEA Newsletter 2024. Available in: <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaeas-first-cuban-collaborating-centre-for-coastal-and-marine-health>.

Recibido: 18 de septiembre de 2024

Aceptado: 31 de octubre de 2024

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

Credit / Conceptualización: Alejandro García Moya, Carlos Manuel Alonso Hernández. **Fuentes:** Aniel Guillén Arruebarrena, Yoelvis Bolaños Álvarez, Yan Miguel Gallo, Yasser Morera Gómez, Yusmila Helguera Pedraza, Arianna García Chamero, Lisbet Díaz Asencio, Ángel R. Moreira González, Liana Beatriz Carballo Rosado. **Análisis formal:** Alejandro García Moya, Carlos Manuel Alonso Hernández, Aniel Guillén Arruebarrena, Yoelvis Bolaños Álvarez, Yan Miguel Gallo, Yasser Morera Gómez; Yusmila Helguera Pedraza, Arianna García Chamero, Lisbet Díaz Asencio, Ángel R. Moreira González, Liana Beatriz Carballo Rosado. **Supervisión:** Carlos Manuel Alonso Hernández. **Adquisición de fondos:** Alejandro García Moya; Carlos Manuel Alonso Hernández; Aniel Guillén Arruebarrena, Yoelvis Bolaños Álvarez, Yan Miguel Gallo, Yasser Morera Gómez, Yusmila Helguera Pedraza, Arianna García Chamero, Lisbet Díaz Asencio, Ángel R. Moreira González, Liana Beatriz Carballo Rosado. **Investigación:** Alejandro García Moya, Carlos Manuel Alonso Hernández, Aniel Guillén Arruebarrena, Yoelvis Bolaños Álvarez, Yan Miguel Gallo, Yasser Morera Gómez, Yusmila Helguera Pedraza, Arianna García Chamero, Lisbet Díaz Asencio, Ángel R. Moreira González, Liana Beatriz Carballo Rosado. **Visualización:** Alejandro García Moya, Carlos Manuel Alonso Hernández. **Metodología:** Alejandro García Moya, Carlos Manuel Alonso Hernández, Aniel Guillén Arruebarrena, Yoelvis Bolaños Álvarez, Yan Miguel Gallo, Yasser Morera Gómez, Yusmila Helguera Pedraza, Arianna García Chamero, Lisbet Díaz Asencio, Ángel R. Moreira González, Liana Beatriz Carballo Rosado. **Administración de proyecto:** Alejandro García Moya, Carlos Manuel Alonso Hernández, Aniel Guillén Arruebarrena, Yoelvis Bolaños Álvarez, Yan Miguel Gallo, Yasser Morera Gómez, Yusmila Helguera Pedraza, Arianna García Chamero, Lisbet Díaz Asencio, Ángel R. Moreira González, Liana Beatriz Carballo Rosado. **Escritura – borrador original:** Alejandro García Moya. **Redacción, revisión y edición:** Alejandro García Moya, Carlos Manuel Alonso Hernández, Aniel Guillén Arruebarrena, Yoelvis Bolaños Álvarez, Yan Miguel Gallo, Yasser Morera Gómez, Yusmila Helguera Pedraza, Arianna García Chamero, Lisbet Díaz Asencio, Ángel R. Moreira González, Liana Beatriz Carballo Rosado.

Composición isotópica de las aguas meteóricas. Una mirada a los fundamentos teóricos y las experiencias de Cuba en su caracterización

 Alejandro García Moya¹,  Carlos Manuel Alonso Hernández²,  Oscar Díaz Rizo³,
 Minerva Sánchez Llull¹

¹ Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC). Carretera a Castillo de Jagua, 1,5 km Ciudad Nuclear. CP59350 Cienfuegos, Cuba.

² Marine Environment Laboratories, Department of Nuclear Science and Application, International Atomic Energy Agency. 4 Quai Antoine 1er, 98000 Monaco, Mónaco.

³ Universidad de La Habana, Instituto Superior de Ciencias Técnicas Aplicadas (UH-InSTEC). La Habana, Cuba
garciamoya90@gmail.com

Resumen

El agua es un recurso esencial para la vida en la Tierra. Aunque el agua atmosférica representa solo una pequeña fracción del balance global, desempeña un papel crucial en el ciclo hidrológico, la regulación climática y los fenómenos meteorológicos. Los isótopos estables del agua meteórica contienen una valiosa información sobre los procesos de fraccionamiento y mezcla desde su origen hasta su precipitación.

Este trabajo ofrece una visión general de los fundamentos teóricos que sustentan el estudio de la composición isotópica de las precipitaciones, con una mirada particular en su determinación analítica, y los principales factores que determinan su variabilidad descritos en la literatura. Se ofrece además un breve análisis de los estudios publicados en el país hasta la fecha, identificando los principales vacíos que limitan su aplicación como herramientas de la hidrología isotópica.

Palabras clave: *isótopos estables, agua meteórica, fundamentos teóricos, estudios publicados, hidrología isotópica.*

Isotopic composition of meteoric waters. A look at the theoretical foundations and experiences of Cuba in its characterization

Abstract

Water stands as a critical resource for life on Earth. While atmospheric water comprises a minor portion of the global water balance, it plays a pivotal role in the hydrological cycle, climate regulation, and meteorological phenomena. The stable isotopes composition of meteoric water contains significant information on fractionation and mixing processes from its origine to its precipitation.

This paper provides a comprehensive overview of the theoretical framework supporting the study of the isotope composition of precipitation. A particular reference on the methods of analytical determination and the key factors influencing its variability as outlined in the existing literature. Furthermore, a concise assessment of the previous research published for the country is presented, pinpointing the primary gaps that hinder the application of isotope hydrology tools.

Key words: *stable isotope composition, meteoric water, theoretical framework, research published, isotope hydrology.*

Introducción

El agua es uno de los recursos más preciados, pues es fuente y sustento de la vida en La Tierra. El 97.5 % es salada, y se almacena fundamentalmente en los océanos, quedando solo un 2,5 % de agua dulce en el balance global del agua. El 68.6 % de esta agua dulce se encuentra en los polos, un 30.1% en las aguas subterráneas y sólo un 1 % corresponde al agua superficial y atmosférica. Aunque el agua atmosférica representa solo un 0.0009 % del agua total del planeta, tiene una importancia vital en el ciclo del agua, pues interviene en procesos como la recarga natural de sistemas hidrológicos, la regulación del clima, el movimiento de masas de agua a escala global, la ocurrencia de desastres naturales y fenómenos meteorológicos extremos [1, 2].

El ciclo del agua es un proceso complejo que incluye varias etapas como la evapotranspiración, condensación, transporte de vapor, precipitación, escorrentía, percolación, recarga, descarga y un sin número de actividades antropogénicas asociadas a su explotación. El estudio del agua y los mecanismos que intervienen en su ciclo es de vital importancia para aprovechar mejor este recurso, especialmente en zonas donde es escaso o vulnerable a riesgos ambientales, como es el caso de los pequeños estados insulares del trópico, donde la lluvia es la única fuente natural de agua dulce.

La hidrología isotópica es un campo de investigación que utiliza isótopos estables y radiactivos, tanto naturales como artificiales, para caracterizar el comportamiento del agua durante su ciclo hidrológico, o en aquellos procesos de la ingeniería en los cuales se le utiliza. Los isótopos estables del hidrógeno y del oxígeno que forman la molécula del agua, son portadores de una huella distintiva determinada por los procesos de fraccionamiento y mezcla isotópica que ocurren durante el movimiento del agua a través de su ciclo. Esta huella puede utilizarse para investigar disímiles procesos relacionados con la cantidad y calidad de los recursos hídricos: balance hidrológico, origen de recarga de acuíferos, mezcla de aguas, tiempos de residencia, interconexión entre aguas subterráneas y superficiales, impacto antropogénico, vulnerabilidad y saneamiento de sistemas hídricos e hidráulicos [1, 3].

La creación en 1960 de la Red Global de Isótopos en Precipitaciones (GNIP, por sus siglas en inglés) como resultado del esfuerzo coordinado del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Organización Mundial de Meteorología (OMM), potenció significativamente el empleo de los isótopos estables en las precipitaciones a nivel global [4]. Los primeros estudios basados en la abundancia natural del oxígeno-18 (^{18}O) y deuterio (^2H) relacionados con el clima, fueron llevados a cabo por Craig en 1961 [5] y Dansgaard en 1964 [6]. En estos estudios se describió por primera vez la correlación de los isótopos en el agua meteórica, su variabilidad y relación con parámetros climáticos. Estos resultados dieron paso a numerosos estudios que le ha sucedido, así como la aplicación de estos trazadores en diversas disciplinas

como hidrología, climatología, geología, ecología y ciencias forenses, entre otras [8 -10].

En Cuba, los estudios de hidrología isotópica se han concentrado en zonas y aplicaciones muy específicas, fundamentalmente relacionados con la hidrogeología. Con lo cual, aun persiste escaso conocimiento sobre la composición isotópica de los recursos hídricos, particularmente de las precipitaciones, a escala nacional. Esto limita considerablemente las aplicaciones de estos trazadores, sobre todo ante la necesidad de información científica válida y confiable sobre los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos nacionales, de manera que esta pueda contribuir a su gestión eficiente y sostenible.

En este trabajo se pretende ofrecer una panorámica general sintetizada sobre los fundamentos teóricos que sustentan el estudio de la composición isotópica de las precipitaciones, con una mirada particular a las técnicas analíticas para su determinación, los principales efectos descritos por la literatura y que guardan relación con su variabilidad, así como al conocimiento que existe en el país a partir de los estudios publicados y disponibles hasta la fecha.

2. Descripción general de los sustentos teóricos de la aplicación de isótopos estables en aguas meteóricas

2.1. Principios básicos de los isótopos estables

La palabra isótopo proviene del griego *iso* (igual o mismo) y *topo* (lugar), o sea “mismo lugar” [17]. Y se utiliza para definir las diferentes formas isotópicas de un mismo elemento químico, definido por su número atómico ($A=Z+N$), pero con diferente número de neutrones en su núcleo (p.ej. ^1H y ^2H del hidrógeno). Estas diferentes formas isotópicas tienen igual número de electrones orbitales, ocupan el “mismo lugar” en la tabla periódica, mantienen las mismas propiedades químicas, pero se distinguen entre sí por su masa atómica. Como característica distintiva los isótopos estables persisten en la misma forma durante eones luego de su formación. El resto, son formas isotópicas radioactivas que emiten radiaciones y se transforman para convertirse en otros elementos [17-20].

Otro elemento fundamental para entender sus aplicaciones es que, según su masa atómica, para un mismo elemento químico existen isótopos estables pesados y ligeros. Al tener masas atómicas diferentes, tienen comportamientos diferentes al romperse los enlaces moleculares, p.ej. durante un cambio de estado físico a otro. Esto es lo que origina el “fraccionamiento isotópico” y a partir de ello las huellas que isotópicas que los distinguen durante sus ciclos en la naturaleza [1, 17, 18]. Estas diferencias se expresan utilizando la notación delta “ δ ”, en per mil (‰), a través de la cual se cuantifica composición isotópica de una sustancia, ecuación 1.

Ecuación 1. Cálculo de la composición isotópica de una muestra utilizando la notación delta “ δ ”:

$$\delta^y X(\text{‰}) = \left[\frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{estándar}}} - 1 \right] * 1000$$

dónde:

y : se refiere al número atómico del isótopo más pesado (menos abundante) del elemento de interés

X : se refiere al elemento químico de interés para el que se desea determinar la composición isotópica en la muestra

R : se refiere a la relación entre los isótopos pesado (menos abundante) y el ligero (más abundante), que para el agua serían $^2\text{H}/^1\text{H}$; $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$; o $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$

estándar : se refiere estándar internacional definido como referencia para el cálculo de la composición isotópica. Para el caso del agua del agua es el VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*)

2.2. Isótopos estables del agua

Las moléculas de agua están formadas por dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno (H_2O). Ambos elementos tienen isótopos estables pesados y ligeros, con lo cual existen 9 combinaciones diferentes de estos isótopos en la molécula del agua, tabla 1. A estas diferentes combinaciones se les reconoce como isotopólogos, pues mantiene la exactamente la misma fórmula, disposición de los enlaces, y propiedades químicas; pero se diferencian en su masa molecular, composición isotópica, cinética de reacción y abundancia natural [17, 20, 21].

Tabla 1. Isotopólogos del agua y sus abundancias naturales

Masa Molecular	Isotopólogo	Abundancia natural
18	$^1\text{H}_2^{16}\text{O}$	0.99731
19	$^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$	3.146×10^{-4}
19	$^1\text{H}_2^{17}\text{O}$	3.789×10^{-4}
20	$^1\text{H}^2\text{H}^{17}\text{O}$	1.122×10^{-7}
20	$^2\text{H}_2^{16}\text{O}$	2.245×10^{-8}
20	$^1\text{H}_2^{18}\text{O}$	2.000×10^{-3}
21	$^2\text{H}_2^{17}\text{O}$	insignificante
21	$^1\text{H}^2\text{H}^{18}\text{O}$	6.116×10^{-7}
22	$^2\text{H}_2^{18}\text{O}$	insignificante

En el agua los isotopólogos más abundantes son $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$, $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$, $^1\text{H}_2^{17}\text{O}$, $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$, en ese orden. Su distribución en la naturaleza y en cada una de las fases del ciclo del agua directamente relacionada con los procesos físicos, químicos y biológicos que influyen en el fraccionamiento y mezcla de los mismos. Por lo tanto el estudio de la composición isotópica del agua puede ofrecer valiosa información sobre el origen del agua y los procesos hidrológicos que intervienen en su ciclo, a diferentes escalas espaciales y temporales [4, 22].

2.2.1. Determinación analítica

En la actualidad, existen varias técnicas para la determinación analítica de la composición isotópica de una muestra de agua. Estas técnicas se agrupan en dos líneas de desarrollo tecnológico fundamentales: 1) la Espectrometría de Masas de Relaciones Isotópicas

(IRMS, en inglés), y 2) la Espectroscopía de Absorción Laser (LAS, en inglés). A pesar de que sus respectivos principios analíticos son bien diferentes, ambas técnicas han sido ampliamente distribuidas y reconocidas por su eficiencia, precisión y veracidad.

2.2.1.1. Espectrometría de Masas de Relaciones Isotópicas (IRMS)

La espectrometría de masas de relaciones isotópicas (IRMS, en inglés) se basa en el análisis de la composición isotópica de un gas (p. ej. H_2 , o CO_2) a partir de su ionización y deflexión ante un campo magnético. El grado de deflexión dependerá de la masa de los diferentes isotopólogos ionizados, lo cual permite separar moléculas con composiciones isotópicas diferentes. Los haces de iones separados se reciben en un ensamble colector formado por copas de Faraday independientes que cuantifican su intensidad, la cual se amplifica y se utiliza para el cálculo de la abundancia relativa de cada uno de los isótopos en el gas analizado [20, 23].

La composición isotópica del agua se realiza mediante el equilibrio gas-agua: $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ para la determinación de $\delta^{18}\text{O}$ [5, 24], y $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O}$ para la determinación de $\delta^2\text{H}$ [25, 26]. El principio se basa en el equilibrio termodinámico de la señal isotópica entre el gas inyectado y el agua de la muestra, en un contenedor hermético con condiciones de temperatura y presión constantes durante un periodo de tiempo determinado. Para el caso específico del $\delta^2\text{H}$, se requiere la presencia de un catalizador de Pt [25, 26]. Adicionalmente, para la determinación del $\delta^2\text{H}$ existe el método de combustión catalítica y reducción del H_2O a H_2 con cromato, pero estos son menos comunes [27].

La principal ventaja de la IRMS es que permite realizar el análisis de la composición isotópica del agua en muestras líquidas, ya sea de aguas con altos contenidos de sales u otras sustancias disueltas o suspendidas, así como del vino [28], la orina [29], etc. Entre las principales desventajas están los costos de implementación del equipamiento de laboratorio (actualmente entre 200 y 500 kEUR); el requerimiento de gases de referencia, así como el gas portador (helio), todos con alto grado de pureza; además de tener rangos de incertidumbre superiores a la espectroscopía laser, fundamentalmente para $\delta^2\text{H}$ en sistemas de Flujo Continuo, lo cual reduce su aplicabilidad en estudios que requieran de una alta precisión analítica [30].

2.2.1.2. Espectroscopía de Absorción Laser (LAS)

Durante los últimos 15 años, la espectroscopía de absorción láser se ha desarrollado grandemente para su uso en el análisis de isótopos estables. Este método analítico se basa en la absorción de la radiación electromagnética generada por un láser en la frecuencia específica para cada uno de los isotopólogos de interés en una sustancia en estado gaseoso (analito). Según la ley de Beer-Lambert, la absorción está directamente relacionada con la concentración, por lo que utilizando láseres ajustables es posible escanear las bandas de

absorción de los diferentes isotopólogos de interés y cuantificar su abundancia en el analito [20, 23].

Actualmente existen varios sistemas comercialmente disponibles, que utilizan láseres de diodo ajustables y de bajo costo para la determinación de la composición isotópica ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{17}\text{O}$ y $\delta^{18}\text{O}$) del agua, con una elevada precisión [20]. Los dos métodos espectroscópicos más utilizados son: 1) La Espectroscopía de Salida Integrada en Cavidad Fuera de Eje (OA-ICOS, en inglés) y 2) la Espectroscopía de Absorción Láser de Decaimiento en Anillo (CRDS, en inglés) [23, 31].

Entre las principales ventajas de las técnicas de LAS para el análisis de la composición isotópica de las aguas naturales se incluyen: costo de inversión en equipamiento considerablemente más bajo (actualmente alrededor de los 80 kEUR), que no requiere de sistemas de preparación adicionales para la conversión de H_2O en H_2 puro o equilibrio gas-agua; en dimensiones el equipamiento es de menor tamaño, incluso adaptable a su uso portátil en campo; pocos accesorios adicionales que requieren de mantenimiento regular; realiza el análisis integrado de los diferentes isotopos de interés ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{17}\text{O}$ y $\delta^{18}\text{O}$) durante la misma corrida analítica; y no requiere de gases de referencia o portador, con lo cual se reducen los costos operativos diarios. Estas ventajas reducen tanto los costos generales de implementación y mantenimiento, como el tiempo y rendimiento de los análisis de por cada muestra. Adicionalmente se pueden alcanzar niveles de precisión mucho mayores, sobre todo para el análisis de $\delta^2\text{H}$ [23, 31].

La principal desventaja de los analizadores basados en LAS en comparación con IRMS, es que tienen una menor flexibilidad analítica porque estos instrumentos generalmente están dedicados a una sola especie isotópica de gas de interés (p.ej. H_2O , CO_2 , N_2O , o CH_4). Además, actualmente no se dispone de mediciones con láser óptico para otras especies de gases de gran interés en estudios isotópicos como son O_2 , SO_2 , CO , N_2 , [30 - 33].

2.3. Fraccionamiento Isotópico en el ciclo del agua

Como se mencionó anteriormente, la diferencia en la masa atómica entre los distintos isótopos de un mismo elemento determina su comportamiento cinético ante un estímulo energético. Así ocurre entre diferentes isotopólogos de una molécula, los cuales poseen diferentes propiedades (movilidad, rotación, frecuencia vibracional, etc.). Las moléculas con isótopos más ligeros requieren de una menor energía para romper sus enlaces intermoleculares, respecto a aquellas con isótopos más pesados, por tanto, reaccionan con una velocidad mayor. Como resultado la composición isotópica del material resultante es diferente al compuesto inicial. Este fenómeno se conoce como “fraccionamiento isotópico”, y se define como el cambio en la composición isotópica de un compuesto durante el curso de una reacción o el cambio de estado físico a otro [1, 19, 22, 34], ver figura 1.

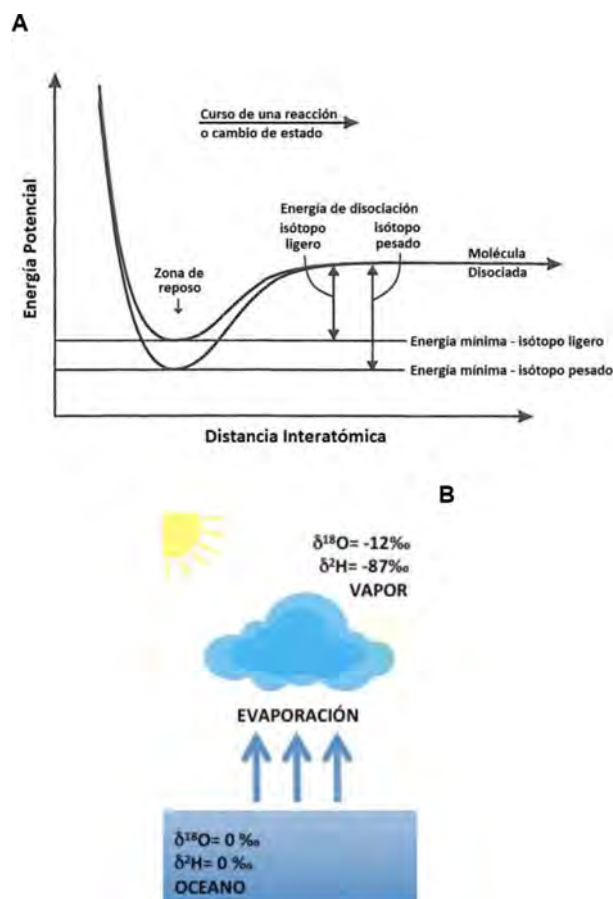


Figura 1. Fraccionamiento isotópico. **A)** Representación esquemática de la relación entre la distancia interatómica y la energía potencial durante la transición de un compuesto a otro (reacción o cambio de estado). Notar las diferencias en el requerimiento energético entre diferentes formas isotópicas de un mismo elemento. **B)** Modelo conceptual del fraccionamiento isotópico durante la evaporación del agua en el océano (cambio de estado líquido a vapor).

De acuerdo con su dependencia de la masa atómica el fraccionamiento isotópico puede ser 1) “dependiente de la masa”, que es aquel en el que diferencia cuantitativa en las velocidades o extensión del fraccionamiento isotópico depende directamente de la diferencia de masa entre los átomos o moléculas involucradas. Este tipo de fraccionamiento es el más común en la naturaleza, y específicamente en el agua durante su ciclo. O bien, 2) “independiente de la masa”, que a diferencia del anterior no depende de la masa atómica. Es menos común y ocurre principalmente en procesos de formación y reacción del ozono, en el que los isotopólogos intermedios del oxígeno ($^{17}\text{O}^{16}\text{O}$) se ven afectados por las colisiones de los gases atmosféricos con partículas cósmicas y las reacciones fotoquímicas en la atmósfera superior [34].

En el ciclo del agua, el fraccionamiento es fundamentalmente dependiente de la masa. Este fraccionamiento incluye los fraccionamientos “termodinámico” o “en equilibrio” [2, 22], “cinético” [17] y “de transporte” o “difusivo”, respectivamente [34].

2.4. Mezcla isotópico

Además del fraccionamiento isotópico existe otro proceso que determina la distribución de las abundan-

cias naturales de los isótopos, así como la composición isotópica de cualquier sustancia en la naturaleza. La "mezcla isotópico" (*isotope mixing*, en inglés), se define como la combinación de sustancias con diferente composición isotópica, para formar una mezcla con una composición isotópica resultante de la combinación de estas en proporción a sus masas, ver representación esquemática en la figura 2. Ambos procesos, fraccionamiento y mezcla, actúan conjuntamente, se oponen y se complementan [17]. Este proceso se evidencia en todas las etapas del ciclo del agua en las que tributan masas

de agua con composiciones isotópicas diferentes a una mezclan homogénea, dígame reservorios de agua dulce (cuencas, lagos, embalses, y acuíferos), masas de vapor de agua (ríos atmosféricos), el océano, entre otros.



Figura 2. Modelo conceptual del movimiento de los isótopos en la naturaleza, se representan los procesos de fraccionamiento y mezclado isotópico (modificado a partir de Fry, 2006). **Nota:** los colores de los diferentes materiales representados refieren la relación entre las composiciones isotópicas teóricas correspondientes a cada una de las sustancias representadas.

2.5. Líneas Meteóricas

La relación lineal entre los isótopos del agua descrita inicialmente por Harmon Craig en 1961 [5], se conoce actualmente como Línea Meteórica Mundial o Línea Global de las Aguas Meteóricas (GMWL, en inglés), figura 3 A. Esta relación fue posteriormente recalculada por Kazimierz Rozanski y colaboradores en 1993 [7], figura 3 B. Este estudio se basó en la data propiciada por 219 estaciones de la GNIP, alguna de ellas con más de 30 años de datos en aquel entonces. Aquí se comprobó que el valor del intercepto de la GMWL está controlado por los procesos evaporativos que originan estas precipitaciones, y que los factores que determinan estos procesos son la temperatura de la superficie del mar, la humedad del aire y la velocidad del viento [7]. Otro elemento importante en su interpretación y aplicación práctica, es que la pendiente de esta recta está controlada fundamentalmente por la relación de enriquecimiento que se produce durante el fraccionamiento del deuterio y oxígeno-18, respectivamente, desde que se evapora el agua hasta su precipitación [7].

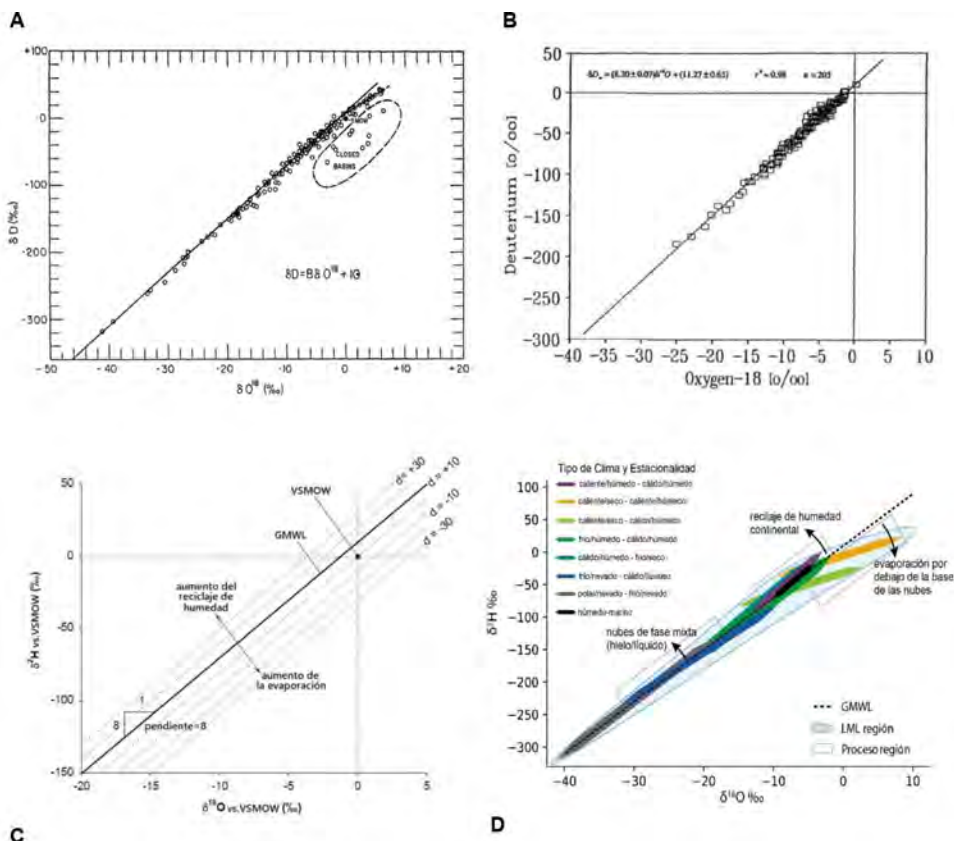


Figura 3. Relación de la composición isotópica ($\delta^{18}O$ vs. δ^2H) en las aguas meteóricas mundiales (GMWL) **A)** Relación descrita por Craig H. en 1961 ($\delta^2H = 8 * \delta^{18}O + 10$), (tomado de Craig H., 1961). **B)** Relación descrita por Rozanski K., *et. al.* en 1993 ($\delta^2H = 8.20(\pm 0.07) * \delta^{18}O + 11.27(\pm 0.6)$), (tomado de Rozanski K., *et. al.*, 1993) **C)** Proyecciones del exceso de deuterio (representado como d) respecto a la GMWL considerando los efectos de la evaporación o el reciclaje de humedad (modificado a partir de Froehlich K., *et. al.*, 2002). **D)** Elipses bayesianas estimadas para una compilación de diferentes líneas meteóricas locales a escala global, regionalizadas según sus características climáticas. (tomado de Putman A.L., *et. al.*, 2019).

Las desviaciones de esta relación a nivel local, o sea a escalas geográficas menores como pueden ser regiones, países, o incluso cuencas, se conocen como Líneas Meteóricas Locales (LML). Estas LML representan la covarianza de la composición isotópica ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) del agua meteórica a largo plazo, en un sitio o zona específica de estudio. Esta información es esencial como línea base de referencia para evaluar procesos hidroclimáticos e hidrológicos, utilizando isótopos estables del agua en estas regiones [35].

La apropiada descripción de la LML para la precipitación local, es un elemento esencial en la aplicación del $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ y el exceso de deuterio (d-exceso) como trazadores del ciclo del agua, pues contiene la información sobre la procedencia de la masa de vapor de agua y procesos que han tenido lugar durante su recorrido [6]. Trabajos recientes han refinado el cálculo de esta relación y sus aplicaciones en áreas más específicas, como son la hidrología e hidrogeología en la que la cantidad de lluvia es un factor determinante [36], o la hidroclimatología donde los eventos individuales e incluso intraindividuales de lluvia, tienen efectos relevantes para identificar la huella isotópica de los fenómenos que se describen [37- 39].

Los estudios realizados por Putman, et. al. en 2019, a partir de los datos globales generados por la GNIP, lograron identificar otros tres procesos que controlan que influyen en las LML a nivel global: 1) la evaporación de las gotas de lluvia por debajo de la base de las nubes durante el proceso de precipitación (en regiones áridas), 2) el reciclaje de humedad continental (en regiones tropicales húmedas), y 3) las condiciones de formación de nieve (en regiones templadas y polares) [35].

2.5.1. Exceso de deuterio (d-exceso)

El d-exceso, es una medida de las proporciones relativas de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en el agua, y se grafica como la desviación de la línea de agua meteórica global, figura 3 C. Fue definido por Willi Dansgaard en 1964, como un índice de condiciones de fraccionamiento isotópico fuera de equilibrio, calculado a partir de la ecuación 2 [6].

Ecuación 2. Cálculo del exceso de deuterio
 $d\text{-exceso} (\text{‰}) = \delta^2\text{H} - 8 * \delta^{18}\text{O}$

Físicamente, el exceso de deuterio refleja el movimiento más lento del isotópico de $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ durante la difusión, lo que conduce a un enriquecimiento relativo de las moléculas de $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ en la fase gaseosa de la evaporación del agua. Este fenómeno conduce a diferencias mensurables en el d-exceso siempre que las dos fases no lleguen a equilibrarse isotópicamente. Durante la evaporación, estas condiciones de desequilibrio son causadas por un fuerte gradiente de humedad relativa sobre la superficie del agua, generado por el desplazamiento de las masas de vapor por acción del viento antes de que se puedan alcanzar condiciones de equilibrio entre las fases [40]. Es por ello, que los factores determinantes en la variación del d-exceso son la temperatura y la humedad relativa en la zona superficial del cuerpo

de agua sujeto a evaporación [40]. Adicionalmente las condiciones de humedad y temperatura por debajo de la base de las nubes, pueden influir en el d-exceso, a partir de la ocurrencia de evaporación parcial durante la caída de las gotas de lluvia [41].

Los procesos dentro de las nubes en general no modifican significativamente el valor de exceso de deuterio (d-exceso) del vapor [7], con lo cual se utiliza en estudios climáticos como trazador del origen de las masas de vapor y su mezcla durante el transporte atmosférico de la precipitación, incluso para calibrar modelos climáticos de circulación global [41].

2.6. Efectos que influyen en la composición isotópica del agua atmosférica

Desde los estudios de Dansgaard (1964), Yurtsever y Gat, (1981) Gonfiantini (1982), Gonfiantini (1985), Rozanski (1993) y los que le han sucedido hasta la actualidad, se han evaluado y evidenciado relaciones empíricas entre la distribución observada de la composición isotópica de las precipitaciones, con una serie de parámetros ambientales o factores físico-geográficos y del clima, llamados “efectos” (p. ej. latitud, altitud, distancia a la costa, cantidad de precipitación, temperatura del aire, estacionalidad, entre otros [6, 7, 9, 42].

Al establecer estas relaciones empíricas es muy común que se solape el efecto combinado o covariante de más de uno de ellos, ya que estos efectos no se producen de forma aislada, sino que más de uno influye al unísono y en mayor o menor medida sobre la composición isotópica de la precipitación. Con lo cual, es fundamental evaluar estas relaciones de forma integral, para lograr definir los factores determinantes en cada caso de estudio.

2.6.1. Latitud

Los patrones de circulación global transportan las masas de humedad desde zonas cálidas, ecuatoriales en los trópicos, hacia zonas más frías, meridionales en los polos. Durante el transporte, la temperatura va descendiendo, produciéndose condensación y precipitación progresiva de las masas de vapor que interactúan en diferentes condiciones atmosféricas durante este ascenso latitudinal. Consecuentemente la composición isotópica de estas masas de vapor durante su movimiento se empobrecen en los isótopos más pesados [2]. Este efecto guarda una relación directa con la disponibilidad de agua precipitable en la atmósfera al momento que se produce la condensación y precipitación. Así mismo puede estar influenciado por la ocurrencia de otros efectos como anomalías regionales de la temperatura, contribuciones sustanciales de fuentes locales de vapor de agua, efectos de cantidad significativos, gradientes altitudinales pronunciados, u otros [7], los cuales se describen seguidamente.

2.6.2. Continentalidad / Reciclaje de Humedad

El efecto “continentalidad” guarda una estrecha relación con el movimiento de las masas de agua tierra adentro, desde la fuente de humedad o vapor de agua

oceánica. Este efecto describe el empobrecimiento progresivo de la composición isotópica de las aguas atmosféricas en la medida que estas se mueven en dirección opuesta a la línea de costa, y debido a las interacciones orográficas se pierden preferentemente los isótopos más pesados durante la condensación [2, 6, 7, 43].

En regiones continentales con alta cobertura vegetal y reservas importantes de aguas superficiales expuestas, el efecto continentalidad puede ser atenuado por flujos de humedad continental hacia a la atmósfera, efecto conocido como “reciclaje de humedad” (*moisture recycling*, en inglés). Este efecto es la expresión de los cambios en la composición isotópica de las precipitaciones producidos por la influencia de dos procesos 1) la evaporación y 2) la transpiración. La evaporación desde la superficie de cuerpos de agua abiertos (p.ej. cuencas y embalses), el suelo, y las partes aéreas de las plantas, provoca la incorporación de isótopos pesados al flujo de vapor atmosférico continental. En el caso particular de la transpiración de las plantas es también una fuente de flujo de vapor atmosférico continental importante, sobre todo en zonas de alta densidad boscosa. Durante la transpiración no se produce fraccionamiento isotópico, sino que se incorpora a la atmósfera el agua previamente precipitada, retenida en el suelo y absorbida por las plantas, con su correspondiente composición isotópica [44, 45]. El resultado neto de la evapotranspiración es una disminución del gradiente isotópico entre la fuente oceánica y las regiones continentales más alejadas, atenuando el efecto de la continentalidad [45-47].

2.6.3. Altitud

La orografía tiene una estrecha relación con la ocurrencia de la precipitación, y consecuentemente también se ha establecido una relación empírica entre la elevación del terreno y en la composición isotópica de las aguas atmosféricas. Por lo general, a mayor altitud la composición isotópica de la precipitación es más empobrecida como resultado de la condensación isobárica del vapor de agua a medida que ascienden en altitud dadas las condiciones de temperatura y presión atmosférica en gradiente negativo a medida que aumenta la elevación del terreno. Adicionalmente, con el aumento de la elevación disminuye la distancia entre la base de las nubes y la superficie del terreno, con lo cual se reduce la evaporación de las gotas de lluvia en su trayectoria de precipitación [2, 43].

En la literatura reciente se ha descrito un efecto o relación empírica con la composición isotópica de las aguas meteóricas, opuesto al efecto clásico de la altitud. Este efecto se conoce como “Efecto Inverso de la Altitud” (IAE, en inglés), y fue registrado por Luo P., et. al. en 2011, en la zona alpina de las montañas Tianshan de China [48], aunque también ha sido registrado en otras regiones montañosas del planeta [49].

2.6.4. Estacionalidad

Las variaciones estacionales de las precipitaciones mensuales son comunes en latitudes medias y altas, con solo cambios menores en los trópicos. Son más

evidentes en zonas continentales interiores, con efectos poco perceptibles en islas tropicales [7, 34]. Por lo general, dichas variaciones se manifiestan con composiciones isotópicamente empobrecidas durante el invierno y enriquecida en verano, debido a: 1) cambios estacionales de la temperatura media del aire, lo cual induce cambios en el contenido de agua precipitable en las masa de aire que se mueven desde los trópicos; 2) cambios estacionales en los flujos atmosféricos de evapotranspiración continental; 3) cambios en las condiciones climáticas que modulan el reciclaje de humedad y los efectos evaporativos por debajo de la base de las nubes durante la precipitación; 4) cambios estacionales en la circulación climática y por tanto el origen de las masas de vapor [7, 9, 34].

Las fluctuaciones estacionales reportadas en estaciones de islas tropicales, se explican a partir de la correlación con la cantidad de precipitación. Esta relación empírica se conoce como el efecto “Cantidad de lluvia”, en el cual se observan precipitaciones isotópicamente empobrecidas durante el período lluvioso [7].

2.6.5. Cantidad de lluvia

La correlación entre la cantidad de lluvia y el empobrecimiento de la composición isotópica de la precipitación mensual fue observada por primera vez por Dansgaard en 1964, y la denominó efecto de “cantidad” [6]. A partir de los resultados reportados por Rozanski (1993), en estaciones marinas tropicales de la GNIP, este efecto se reafirmó como una fuerte relación inversa entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ promedio mensuales o anuales de las aguas meteóricas y la cantidad de precipitación mensual. No obstante, la correlación de la composición isotópica mensual de las lluvias y las temperaturas del aire promedios para igual período, apenas existe [7].

Los procesos físicos que subyacen a este llamado efecto de cantidad aún no se comprenden ni cuantifican bien. Un trabajo publicado por Yapp en 1982, evaluó la ocurrencia de este efecto en tormentas convectivas, en donde la velocidad vertical de las masas de aire ascendentes regula la intensidad de la precipitación. A partir de la composición isotópica de las precipitaciones observadas en este estudio, el efecto cantidad se relacionó con la duración e intensidad del proceso de precipitación de las nubes convectivas profundas, e incluso se presenta un modelo predictivo de la composición isotópica media mensual de las precipitaciones como una función de la intensidad de la lluvia [7, 50].

Dansgaard en 1964, señaló que durante los meses con escasas precipitaciones el enriquecimiento por evaporación parcial de las gotas de lluvia por debajo de la base de las nubes puede desempeñar un papel importante, lo cual no ocurre en ambientes con una alta humedad relativa [6]. Por otro lado, las lluvias intensas tienden a modificar el contenido de isótopos pesados de la humedad atmosférica debajo de la nube hacia un valor más negativo por intercambio isotópico entre las gotas de lluvia y el vapor de agua circundante [7]. Estudios recientes proponen como procesos determinantes 1) la reevaporación de las gotas de lluvia durante

su trayecto de precipitación y los intercambios difusos con el vapor circundante; y 2) el reciclaje del vapor de la capa por debajo de la base de las nubes que alimenta el sistema convectivo mediante flujos ascendentes de vapor [51, 52].

2.7. Estudios sobre la composición isotópica de las aguas meteóricas de Cuba

Por su condición insular, en Cuba, la lluvia es la principal fuente natural de recarga de los sistemas hídricos. Su estudio es fundamental para asegurar la sostenibilidad de los recursos hídricos y conocer las dinámicas de su ciclo hidrológico. Aún más en el contexto actual del cambio climático y sus efectos (aumento del nivel medio del mar, aumento de la temperatura, cambio en el patrón de precipitaciones, y descenso de la lámina media anual de precipitaciones); a esto se le añaden otros factores de riesgo como el crecimiento urbano desordenado, la contaminación y eutrofización de sistemas hídricos [53].

Los estudios de hidrología isotópica realizados en Cuba, hasta la fecha, se han concentrado en áreas geográficas y casos de estudios específicos, localizados en la región occidental del país. Estos estudios han sido enfocados fundamentalmente a la evaluación de procesos hidrogeológicos específicos como la salinización de aguas subterráneas o la incorporación de residuos petrolizados. Ejemplo de ello son los estudios realizados por Arellano, et. al. [12] y González Báez, et. al. [13], ambos en 1989; Molerio León en 1992 [11]; Boschetti, et. al. en 2015 [15]; y Peralta Vital, et. al. en 2015 [14], Sánchez Murillo, et. al. 2019 [39], Molerio León en 2021 [16], todos ellos ubicados en la zona centro-occidental (ver figura 4), aproximadamente un 30 % del territorio nacional de Cuba.

De forma general, la composición isotópica de las aguas meteóricas que se describe en estos estudios se caracteriza por ser local (zonas de estudio específicas), con limitada representatividad temporal (series temporales fraccionadas, de eventos puntuales, o períodos de monitoreo de 1 año), además de haber sido realizados

en condiciones de muestreo heterogéneas en cuanto a frecuencia y métodos de colecta. De los referidos anteriormente, se reportan líneas meteóricas locales en los estudios de Arellano, et. al. [12] y González Báez, et. al. [13] de 1989, Molerio León [11, 16], y Boschetti, et. al. [15]. Estos estudios muestran discrepancias entre las LML reportadas, lo cual pudiera deberse a la fragmentación de las series temporales de datos utilizadas, y/o su limitada representatividad espacial y temporal [15].

Conclusiones

La composición isotópica de las aguas meteóricas es una huella distintiva, que conserva la información relacionada con los procesos de fraccionamiento y mezcla que tienen lugar desde su formación, movimiento a través de las masas de aire, y las condiciones en las que se produce la precipitación. Las principales técnicas para la determinación analítica de esta huella son: la espectrometría de masas de relaciones isotópicas, y la espectroscopía de absorción láser. Cada una tiene ventajas y desventajas, que deben considerarse dependiendo de los fines con que se pretende hacer uso del resultado analítico, entre otras consideraciones. Existen múltiples factores físico-geográficos y climáticos que pueden relacionarse con la variabilidad de la composición isotópica de las precipitaciones, a escala espacial y temporal, los cuales deben considerarse a la hora de interpretar dicha señal, para poder hacer un uso correcto de los isótopos estables del agua como trazadores ambientales. A pesar de las múltiples experiencias y estudios realizados hasta la fecha en el país, la variabilidad espacial y temporal de la composición isotópica de las precipitaciones en Cuba tiene aún grandes vacíos de conocimiento. Esto pudiera limitar la aplicación de estas herramientas de investigación desde la hidrología isotópica aplicada, y su correspondiente contribución al manejo eficiente y sostenible de los recursos hídricos.



Figura 4. Localización geográfica de los estudios que reportan valores de la composición isotópica de aguas naturales para Cuba, según la literatura científica publicada en la web hasta junio 2024. (compilación de los estudios referenciados en el acápite 2.7). Notar que los reportes referidos corresponden solamente a aguas meteóricas y subterráneas.

Referencias Bibliográficas

- [1]. MOOK WG. Introduction: theory, methods, review. In: Environmental isotopes in the hydrological cycle: principles and applications. Technical documents in hydrology. International Atomic Energy Agency (IAEA) and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. IAEA, 2000. Vol. I.
- [2]. SOSA TRUJILLO E. Estudio de la composición isotópica de la precipitación y del vapor de agua en la región subtropical, Canarias [tesis de doctorado]. Universidad de La Laguna: Canarias, España, 2015.
- [3]. AGGARWAL PK, FROELICH K, GONFIANTINI R. Contributions of the International Atomic Energy Agency to the development and practice of isotope hydrology. *Hydrogeol J.* 2011; 19: 5-8. doi:10.1007/s10040-010-0648-3.
- [4]. BOWEN GJ, CAI Z, FIORELLA RP, PUTMAN AL. Isotopes in the water cycle: regional- to global-scale patterns and applications. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences.* 2019; 47: 453-479. doi:10.1146/annurev-earth-053018-060220.
- [5]. CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science, New Series* 1961; 133, 1702-1703.
- [6]. DANSGAARD W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus.* 1964; 16: 436-468. doi:10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x.
- [7]. ROZANSKI K, ARAGUÁS ARAGUÁS L, GONFIANTINI R. Isotopic patterns in modern global precipitation. In: *Climate Change in Continental Isotopic Records.* Geophysical Monograph Series. Vol. 78. American Geophysical Union, Washington DC. 1-36. doi:10.1029/GM078p0001.
- [8]. WEI H, WANG J, LI M, WEN M, LU Y. Assessing the applicability of mainstream global isoscapes for predicting $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, and d-excess in precipitation across China. *Water.* 2023; 15: 3181, doi:10.3390/w15183181.
- [9]. GAT JR. Atmospheric Water balance-the isotopic perspective. *Hydrological Processes.* 2000; 14: 1357-1369.
- [10]. KENDALL C & MCDONNELL JJ. *Isotope tracers in catchment hydrology.* Elsevier: Amsterdam -New York, 1998. ISBN 978-0-444-81546-0.
- [11]. MOLERO LEÓN LF. Composición química e isotópica de las aguas de lluvia de Cuba. Viñales, Pinar del Río, Cuba, 1992.
- [12]. ARELLANO DM, FEITOO R, SEILER KP, et. al. Isotopic study of the southern plain in the Pinar Del Rio province, Cuba. In: *Estudios de hidrología isotópica en América Latina.* IAEA-TECDOC-502. Vienna: IAEA, 1989. pp. 229-243.
- [13]. GONZÁLEZ BÁEZ AE, SEILER KP, et. al. Estudio mediante isótopos ambientales del origen de las aguas subterráneas y de la intrusión salina en la parte central de la cuenca sur de Matanzas, Cuba. In: *Estudios de hidrología isotópica en América Latina.* IAEA-TECDOC- 502. Vienna: IAEA, 1989.. pp. 245-258.
- [14]. PERALTA VITAL JL, GIL CASTILLO R, DAPEÑA DAPEÑA C, et. al. hidrología isotópica, herramienta nuclear para la gestión sostenible del recurso hídrico. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental.* 2015; XXXVI: 57-52.
- [15]. BOSCHETTI T, GONZÁLEZ HERNÁNDEZ P, HERNÁNDEZ DÍAZ R, et. al. Seawater Intrusion in the Guanahacabibes Peninsula (Pinar Del Rio Province, Western Cuba): Effects on Karst Development and Water Isotope Composition. *Environ Earth Sci.* 2015, 73: 5703-5719. doi:10.1007/s12665-014-3825-1.
- [16]. MOLERO LEÓN L. Miembros Geoquímicos terminales y de transición de las aguas cársicas de Cuba (III). Composición e interpretación isotópica de las aguas de lluvia. Gota a Gota. 2020; (22): 70-82.
- [17]. FRY B. *Stable isotope ecology.* Springer Science-Business Media: Los Angeles, EUA, 2006;
- [18]. DE GROOT PA. *Handbook of stable isotope analytical techniques.* Elsevier, 2005. Vol. 2.
- [19]. REYES CAMACHO E. Geoquímica de isótopos estables: fundamentos, técnicas y aplicaciones. In: *Geoquímica Isotópica Aplicada al Medioambiente.* Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía. 2004; 1: 1-19.
- [20]. SHARP Z. *Principles of Stable Isotope Geochemistry.* 2nd Edition. 2017, <https://doi.org/10.25844/h9q1-0p82>.
- [21]. DE GROOT PA. *Handbook of stable isotope analytical techniques.* Elsevier, 2009. Vol. II.
- [22]. GATJR. *Isotope hydrology: a study of the water cycle.* World Scientific, 2010. ISBN 978-1-84816-474-1.
- [23]. SHARP ZD. Stable isotope techniques for gas source mass spectrometry. In: *treatise on geochemistry.* 2nd Edition. Elsevier, 2014. pp. 291-307.
- [24]. WERNER RA, BRAND WA. Referencing strategies and techniques in stable isotope ratio analysis. *Rapid Communications in Mass Spectrometry.* 2001; 15: 501-519, doi:10.1002/rcm.258.
- [25]. HORITA J. Hydrogen isotope analysis of natural waters using an H₂-water equilibration method: a special implication to brines. *Chemical Geology: Isotope Geoscience section* 1988; 72(1): 89-94. doi:10.1016/0168-9622(88)90040-1.
- [26]. COPLEN TB, WILDMAN JD, CHEN, JULIE. Improvements in the gaseous hydrogen-water equilibration technique for hydrogen isotope-ratio analysis. *Anal. Chem.* 1991; 63(9): 910-912. doi:10.1021/ac00009a014.
- [27]. KELLY SD, HEATON KD, BRERETON P. Deuterium/Hydrogen Isotope Ratio Measurement of Water and Organic Samples by Continuous-Flow Isotope Ratio Mass Spectrometry Using Chromium as the Reducing Agent in an Elemental Analyser. *Rapid Commun Mass Spectrom.* 2001; 15(15): 1283-1286. doi:10.1002/rcm.303.
- [28]. AKAMATSU F, SHIMIZU H, KAMADA A. et. al. Increase in the oxygen stable isotopic composition of water in wine with low ethanol yield. *Sci Rep.* 2019; 9(11039). doi:10.1038/s41598-019-47331-0.
- [29]. WONG WW & CLARKE LL. A Hydrogen Gas-Water Equilibration Method Produces Accurate and Precise Stable Hydrogen Isotope Ratio Measurements in Nutrition Studies_{1,2}. *J Nutr.* 2012; 142(11): 2057-2062. doi:10.3945/jn.112.167957.
- [30]. LIS G, WASSENAAR LI, HENDRY MJ. High-precision laser spectroscopy d/h and 18o/16o measurements of microliter natural water samples. *Anal. Chem.* 2008; 80, 287-293. doi:10.1021/ac701716q.
- [31]. PIERCHALA A, ROZANSKI K, DULINSKI M, et. al. High-precision measurements of $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{17}\text{O}$ in water with the aid of cavity ring-down laser spectroscopy. isotopes in environmental and health studies. 2019; 55(3): 290-307. doi:10.1080/10256016.2019.1609959.
- [32]. HARRIS SJ, LIISBERG J, XIA LL, et. al. N₂O isotopocule measurements using laser spectroscopy: analyzer characterization and intercomparison. *Atmospheric Measurement Techniques.* 2020; 13(5): 2797-2831.
- [33]. International Atomic Energy Agency (IAEA). *Laser spectroscopic analysis of liquid water samples for stable hydrogen and oxygen isotopes.* IAEA-TCS-35 Vienna: IAEA, 2009.
- [34]. GAT JR, MOOK WG, MEIJER HAJ. *Atmospheric Water.* In: environmental isotopes in the hydrological cycle: principles and applications. Technical documents in hydrology. Vol. II. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) and International Atomic Energy Agency (IAEA). Paris/Vienna, 2000.
- [35]. PUTMAN AL, FIORELLA RP, BOWEN GJ CAI Z. A global perspective on local meteoric water lines: meta-analytic insight into fundamental controls and practical constraints. *Water Resources Research.* 2019; 55: (8): 6896-6910. doi:10.1029/2019WR025181.
- [36]. HUGHES CE, CRAWFORD J. A new precipitation weighted method for determining the meteoric water line for hydrological applications demonstrated using australian and global gnip data. *Journal of Hydrology.* 2012; 464-465: 344-351. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.07.029.
- [37]. AGGARWAL PK, ROMATSCHKE U, ARAGUAS ARAGUAS L, et. al. Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. *Nature Geosci.* 2016; 9: 624-629. doi:10.1038/ngeo2739.
- [38]. BAISDEN WT, KELLER ED, VAN HALE R, et. al. Precipitation isoscapes for new zealand: enhanced temporal detail using precipitation-weighted daily climatology †. *Isotopes in Environmental and Health Studies.* 2016; 52: 343-352, doi:10.1080/10256016.2016.1153472.
- [39]. SÁNCHEZ MURILLO, R.; DURÁN QUESADA AM, ESQUIVEL HERNÁNDEZ G, et. al. Deciphering key processes controlling rainfall isotopic variability during extreme tropical cyclones. *Nat Commun.* 2019; 10: 4321. doi:10.1038/s41467-019-12062-3.
- [40]. PFAHL S, SODEMANN H. What controls deuterium excess in global precipitation? *Climate of the Past.* 2014; 10: 771-781. doi:10.5194/cp-10-771-2014.
- [41]. FROELICH K, GIBSON J, AGGARWAL P. Deuterium excess in precipitation and its climatological significance. 2002. Available

- in: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/CSP-13-P_web.pdf/
- [42]. AGGARWAL PK, GAT JR, FROELICH KFO. *Isotopes in the water cycle. past, present and future of a developing science*; Springer Dordrecht, 2007. ISBN 978-1-4020-3010-9.
- [43]. GAT JR, MOOK WG, MEIJER HAJ. *Environmental isotopes in the hydrological cycle - principles and applications*. International Hydrological Programme (IHP-V). Technical Documents in Hydrology. 2000.
- [44]. EHLERINGER JR, DAWSON TE. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition. *Plant, Cell & Environment*. 1992; 15: 1073-1082. doi:10.1111/j.1365-3040.1992.tb01657.x.
- [45]. AMPUERO GRÁNDEZ A. Evaluación de los indicadores isotópicos en las precipitaciones de la Cuenca del Alto Mayo para su aplicación en la hidrología [tesis en opción del grado de Ingeniero Agrícola]. Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Ingeniería Agrícola. Lima, Perú, 2016.
- [46]. AMPUERO A, STRÍKIS NM, APAÉSTEGUI J, et. al. the forest effects on the isotopic composition of rainfall in the northwestern Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2020; 125. e2019JD031445, doi:10.1029/2019JD031445.
- [47]. ZHANG F, HUANG T, MAN W, et. al. Contribution of recycled moisture to precipitation: a modified d-excess-based model. *Geophysical Research Letters*. 2021; 48: e2021GL095909. doi:10.1029/2021GL095909.
- [48]. LUO P, PENG P, GLEIXNER G, et. al. Empirical relationship between leaf wax n-alkane δd and altitude in the wuyi, shennongjia and tianshan mountains, china: implications for paleoaltimetry. *Earth and Planetary Science Letters*. 2011; 301: 285-296. doi:10.1016/j.epsl.2010.11.012.
- [49]. JING Z., YU W, LEWIS S, et. al. Inverse altitude effect disputes the theoretical foundation of stable isotope paleoaltimetry. *Nat Commun*. 2022; 13: 4371. doi:10.1038/s41467-022-32172-9.
- [50]. YAPP CJ. A Model for the relationships between precipitation d/h ratios and precipitation intensity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1982; 87: 9614-9620. doi:10.1029/JC087iC12p09614.
- [51]. BONY S, RISI C, VIMEUX F. Influence of convective processes on the isotopic composition ($\delta^{18}O$ and δd) of precipitation and water vapor in the tropics: 1. radiative-convective equilibrium and tropical ocean–global atmosphere–coupled ocean-atmosphere response experiment (TOGA-COARE) simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008; 113. doi:10.1029/2008JD009942.
- [52]. RISI C, BONY S, VIMEUX F. Influence of convective processes on the isotopic composition ($\delta^{18}O$ and δd) of precipitation and water vapor in the tropics: 2. physical interpretation of the amount effect. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 2008; 113. doi:10.1029/2008JD009943.
- [53]. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). *Política Nacional del Agua en Cuba*. 2012.



Recibido: 18 de septiembre de 2024

Aceptado: 31 de octubre de 2024

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

Credit / Conceptualización: Alejandro García Moya, Oscar Díaz Rizo. **Software:** Alejandro García Moya, Minerva Sánchez Llull. **Análisis formal:** Alejandro García Moya, Minerva Sánchez Llull. **Supervisión:** Carlos Manuel Alonso Hernández, Oscar Díaz Rizo. **Visualización:** Alejandro García Moya, Minerva Sánchez Llull. **Metodología:** Alejandro García Moya, Minerva Sánchez Llull. **Administración de proyecto:** Alejandro García Moya. **Escritura – borrador original:** Alejandro García Moya. **Redacción – revisión y edición:** Alejandro García Moya, Carlos Manuel Alonso Hernández, Oscar Díaz Rizo, Minerva Sánchez Llull.

A comparison between lead-210 determination in sediments by gamma and alpha spectrometry in sediments

 Aniel Guillén Arruebarrena¹,  Héctor Alejandro Cartas Águila¹,  Jorge Alberto Martín Pérez¹,
 Aida Mary Abreu Díaz²,  Carlos Manuel Alonso Hernández³

¹ Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC). Carretera a Castillo de Jagua, 1,5 km Ciudad Nuclear. CP59350 Cienfuegos, Cuba.

² Jubilant Radiopharma, Research and Development department, Montreal, Quebec, Canada

³ Marine Environment Laboratories, Department of Nuclear Science and Application, International Atomic Energy Agency. 4 Quai Antoine 1er, 98000 Monaco, Mónaco.

aniel@ceac.cu

Abstract

Polonium-210 (Po-210) is analyzed for a variety of purposes, including for radiological impact assessment, as a tracer of environmental processes, and as an indirect measure of its progenitor lead-210 (Pb-210). A method for determining Po-210 by alpha spectrometry in sediments has been set. Chemical preparation was performed by acid digestion in open systems. Mixtures of HCl, HF, HNO₃ and HClO₄ in different proportions were employed at 80 °C in order to avoid losses due to volatilization. Results were compared with those for Pb-210 using high resolution gamma spectrometry. Sediment core samples were analyzed. A linear regression was performed showing a strong relationship among Pb-210 and Po-210 activities, proving that the method used for Po-210 determination is also suitable for Pb-210 in sediments. Mass accumulation rate (MAR) and sediment accumulation rate (SAR) were estimated using the constant flux: constant sedimentation (CF:CS) model, showing changes on them both along the sediment core studied.

Key words: lead 210; polonium 210; sediments, alpha spectroscopy; gamma spectroscopy; ecological concentration.

Comparación entre la determinación de plomo-210 en sedimentos mediante espectrometría gamma y alfa en sedimentos

Resumen

El polonio-210 (Po-210) se analiza con varios fines, incluyendo la evaluación de un impacto radiológico, como trazador de procesos ambientales, y como medición indirecta de su progenitor plomo-210 (Pb-210). Se estableció un método para la determinación de Po-210 por espectrometría alfa en sedimentos. La preparación química se realizó con una digestión ácida en plancha. Se empleó una mezcla de HCl, HF, HNO₃ y HClO₄ en diferentes proporciones a 80 °C para evitar pérdidas debido a volatilización. Los resultados se compararon con los obtenidos para Pb-210 por espectrometría gamma de alta resolución. Se analizaron muestras de un perfil de sedimentos. Se realizó una regresión lineal que mostró una relación fuerte entre las actividades de Pb-210 y Po-210, demostrando que el método utilizado para la determinación de Po-210 es también adecuado para la determinación de Pb-210 en sedimentos. Se estimaron las tasas de sedimentación y de acumulación másica usando el modelo de flujo constante: sedimentación constante, mostrando cambios en estas a lo largo del perfil estudiado.

Palabras clave: plomo 210; polonio 210; sedimentos; espectroscopia alfa; espectroscopia gamma; concentración ecológica.

Introduction

Po-210 is analyzed for a variety of purposes, including as a tracer of environmental processes, and as an indirect measure of its progenitor Pb-210. They have also been applied in studies of the chronology of sediments

cores. Several analytical techniques have been reported for Po-210 chemical preparation before alpha-spectrometry measurements [1]. Sample preparation is thus time- and effort-consuming for Po-210 determination. Pb-210 can be measured directly from its 46,5 keV gamma-particle; this method enjoys the advanta-

ges of easy sample-preparation procedures, been the low energy of gamma-rays from Pb-210 and the low branching ratio (4%) their principal drawbacks [2]. The aim of the study is to determine the relative precision and comparability of both methods and apply them in a sediment core dating from an estuarine system.

Materials and methods

Sediments samples were collected by core in an estuarine system. The profile was sectioned into 1 cm slices, for a total of 71 samples. Samples were dried at 45 °C, grounded to fine powder (grain size less than 0,5 mm), and then homogenized thoroughly.

1.1. Alpha spectrometry

Po-209 was added (0,038 Bq) as a tracer to the dried sediment to determine the chemical recovery and plating efficiency. The dried sediment (~1 g) was then digested by wet ashing in open systems, with concentrated nitric and hydrofluoric acids (10 and 6 ml respectively), until almost dryness (samples were never dried in order to avoid volatilization) in a hot plate at 80 °C. Traces of hydrofluoric acid were removed by concentrated perchloric acid (4 ml) boiling. Residue was boiled in 6 ml of concentrated hydrochloric acid and finally the solution was turned into 1 M hydrochloric acid by several evaporations. Ascorbic acid was added to reduce Fe³⁺ to Fe²⁺, thus eliminating its interference. Before plating, any remaining undissolved sediment was removed by centrifuging the sample during 12 minutes at 3000 rpm and filtering. The polonium plated during the night, onto one side of the silver disk at room temperature. The plates were counted until each peak (Po-209 and Po-210) has 400 counts or more on a Canberra alpha-spectrometer with PIPS detectors. Detection limits were below 0,2 mBq/kg for measurements of 86400s.

1.2. Gamma spectrometry

Samples were analyzed in a well detector. An HPGe low background gamma-ray spectrometer was used. The coaxial detector with an iron shield 21 cm thick has an efficiency of 50,71% for 46,54 keV. The system is connected to a LTEL PC multichannel analyzer, with 8192 channels and the resolution of the 1,33 MeV gamma-ray peak from Co-60 is 1,86 keV. In this method, an average of 5,8692 g of sediment was placed in a vial of 4,5 ml, inside the well. Results were analyzed using the Winner 6.0 software.

1.3. Sediment dating

MAR and SAR were estimated using the CF:CS model. Supported Pb-210 was estimated using the constant values of total Pb-210 in the deeper samples of the core. Pb-210 values used were those obtained by alpha spectrometry.

Results

2.1. Alpha and gamma spectrometry comparison

Sample preparation for Po-210 determination was time consuming but low detection limits could be reached.

Specific activities above 6,5 Bq/kg of Pb-210 could be reported with an uncertainty less than 43 % for low activities for measurements of 172800 seconds.

As a result of fitting a linear model a Correlation Coefficient equals to 0,949391 was obtained.

The equation of the fitted model is:

$$Pb = -5,0106 + 1,13099 \cdot Po \quad (1)$$

where:

Pb: Pb-210 Specific Activity expressed in (Bq/kg)

Po: Po-210 Specific Activity expressed in (Bq/kg)

Since the P-value 0,0000 is less than 0,01, there is a statistically significant relationship between Pb-210 specific activity and Po-210 specific activity at the 99% confidence level. The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 90,1344 % of the variability in Pb-210 specific activity. The correlation coefficient equals 0,949391, indicating a relatively strong relationship between the variables.

The relationship between the data sets is shown graphically in figure 1.

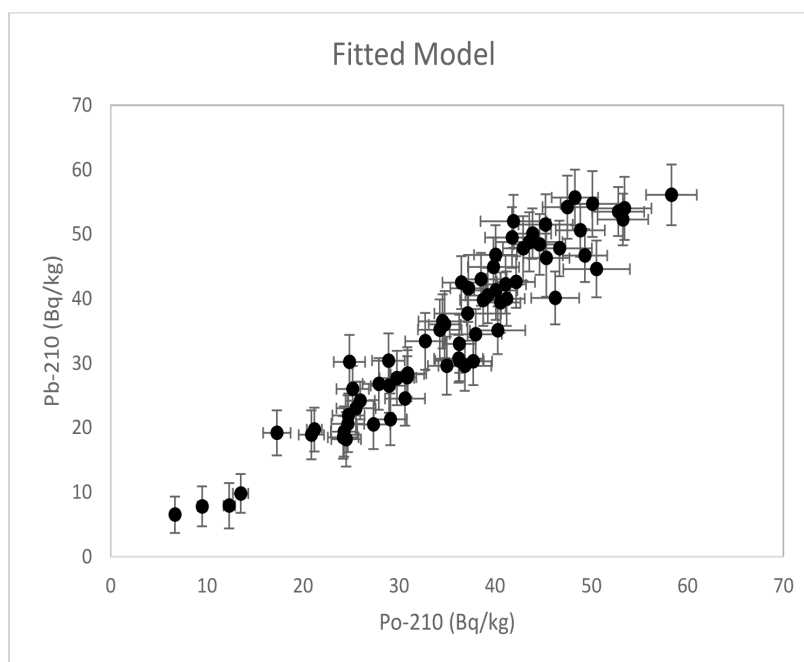


Figure 1. Plot of Po-210 and Pb-210 specific activities of sediment samples measured by gamma and alpha spectrometry.

2.2. SAR and MAR estimation

Two sets of SAR and MAR were found in the core figure 2 and 3, i.e. 0,298(21) cm yr⁻¹ for the older years and 1,77(31) cm yr⁻¹ for the recent ones, or 3,06(30) kg m⁻² yr⁻¹ for the deeper layers and 13,3(2,5) kg m⁻² yr⁻¹ for the new ones.

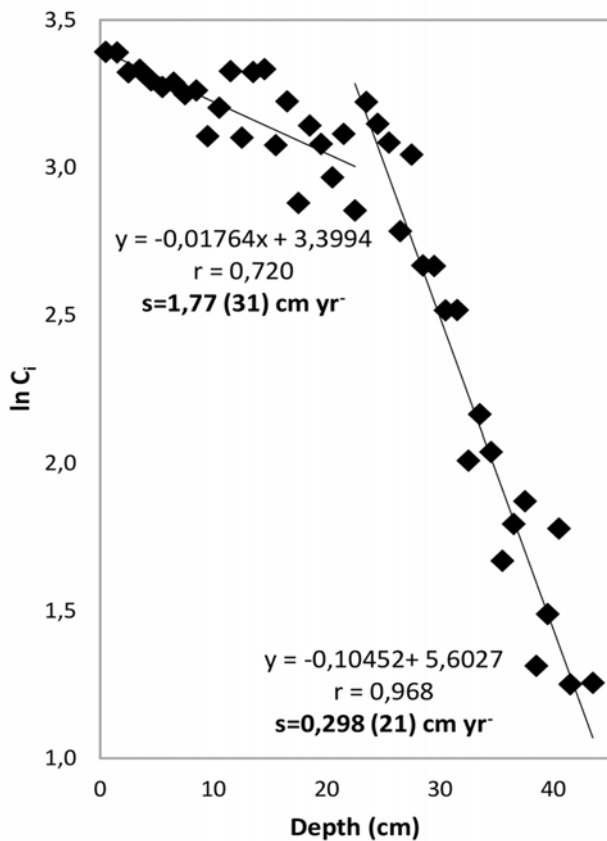


Figure 2. Sedimentation rates estimated by CF:CS model.

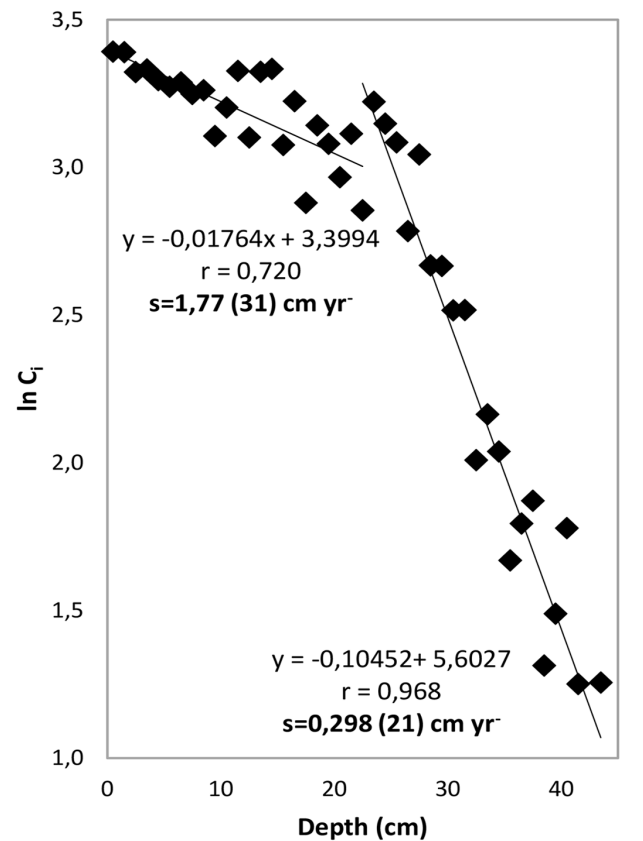


Figure 3. Mass accumulation rates estimated by CF:CS model.

Discussion

Alpha and gamma methods are both suitable for Pb-210 quantification, although alpha spectrometry yields lower relative uncertainties than gamma spectrometry, even with lower counting times. There is no statistically significant difference between the methods.

There has been a change in the amount of sediment entrance and the rate at which they are accumulated in that site. Stakeholders should take that into consideration, in order to avoid a negative impact in the environment.

Conclusions

Measurements based on Pb-210 alpha-counting and gamma ray spectrometry can yield comparable values for Pb-210 specific activities. Therefore, they

both could be used for estimating sediment accumulating rates and mass accumulating rates in sediment cores. Although lower uncertainties can be achieved with alpha spectrometry.

References

- [1]. MATTHEWS KM, KIM CK & MARTIN P. Determination of Po-210 in environmental materials: A review of analytical methodology. *Appl Radiat Isot.* 2007; 65(3):267-79. doi: 10.1016/j.apradi-so.2006.09.005.
- [2]. TANNER PA, PAN SM, MAO SY & YU KN. γ -ray spectrometric and α -counting method comparison for the determination of Pb-210 in estuarine sediments. *Appl. Spectr.* 2000; 54(10): 1443-1446. doi:10.1366/0003702001948574.

Recibido: 18 de septiembre de 2024

Aceptado: 31 de octubre de 2024

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

Credit / Conceptualización: Aniel Guillén Arruebarrena, Héctor Alejandro Cartas Águila, Jorge Alberto Martín Pérez, Carlos Manuel Alonso Hernández. **Fuentes:** Aniel Guillén Arruebarrena, Héctor Alejandro Cartas Águila, Jorge Alberto Martín Pérez. **Curación de datos:** Aniel Guillén Arruebarrena, Héctor Alejandro Cartas Águila, Carlos Manuel Alonso Hernández. **Software:** Aniel Guillén Arruebarrena, Héctor Alejandro Cartas Águila. **Análisis formal:** Aniel Guillén Arruebarrena, Héctor Alejandro Cartas Águila, Jorge Alberto Martín Pérez, Carlos Manuel Alonso Hernández. **Supervisión:** Carlos Manuel Alonso Hernández. **Adquisición de fondos:** Carlos Manuel Alonso Hernández. **Validación:** Aniel Guillén Arruebarrena, Héctor Alejandro Cartas Águila, Carlos Manuel Alonso Hernández. **Investigación:** Aniel Guillén Arruebarrena, Héctor Alejandro Cartas Águila, Jorge Alberto Martín Pérez, Carlos Manuel Alonso Hernández. **Visualización:** Aniel Guillén Arruebarrena. **Metodología:** Aniel Guillén Arruebarrena, Héctor Alejandro Cartas Águila, Carlos Manuel Alonso Hernández. **Administración de proyecto:** Carlos Manuel Alonso Hernández. **Escritura – borrador original:** Aniel Guillén Arruebarrena. **Redacción – revisión y edición:** Aniel Guillén Arruebarrena, Héctor Alejandro Cartas Águila, Carlos Manuel Alonso Hernández.

Evaluación del potencial de gas Radón en la cuenca hidrográfica Damují en la provincia de Cienfuegos, Cuba

✉ Israel David Cedeño Fernández, ✉ Alejandro García Moya, ✉ Willy Roberto Rodríguez Miranda, ✉ Héctor Alejandro Cartas Águila

Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC). Carretera a Castillo de Jagua, 1,5 km Ciudad Nuclear. CP59350 Cienfuegos, Cuba.

israeldavidcedenofernandez@gmail.com

Resumen

Como parte de los proyectos de estudio y conservación de aguas superficiales y subterráneas (ISOAGUA y CIANOCUBA), en los cuales se emplea el Radón (^{222}Rn) como radiotrazador hidrogeológico, el Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC) planteó la tarea de estudiar las zonas potenciales a contener gas Radón en la cuenca hidrográfica Damují. La aplicación del método de los 10 puntos posibilitó la cartografía a escala 1:100 000 del potencial de Radón en la cuenca hidrográfica Damují. Las mediciones de campo realizadas posibilitaron un análisis estadístico y la correlación entre el Radón en los suelos y las aguas. Se identificaron varias zonas con valores relativos de potencial de gas Radón en suelos. Las concentraciones de gas Radón en las aguas arrojaron resultados estables dentro de los límites que establece la Organización Mundial de la Salud. Por otro lado, las concentraciones medidas de Radón permitieron analizar el comportamiento de la interacción entre las aguas subterráneas y superficiales.

Palabras clave: cuencas hidrográficas; Cuba; Radón 222; cartografía; estadística.

Evaluation of the radon gas potential in the Damují hydrographic basin in the province of Cienfuegos, Cuba

Abstract

As part of the surface and groundwater study and conservation projects (ISOAGUA and CIANOCUBA), in which Radon (^{222}Rn) is used as a hydrogeological radiotracer, the Cienfuegos Environmental Studies Center (CEAC) proposed the task of studying the potential areas containing Radon gas in the Damují watershed. The application of the 10-point method made possible the mapping at a scale of 1:100,000 of the Radon potential in the Damují hydrographic basin. The field measurements made possible a statistical analysis and correlation between Radon in soils and waters. Several zones with relative values of Radon gas potential in soils were identified. Radon gas concentrations in water showed stable results within the limits established by the World Health Organization. On the other hand, the measured Radon concentrations allowed to analyze the behavior of the interaction between groundwater and surface water.

Key words: watershed; Cuba; Radon 222; mapping; statistics.

Introducción

La principal fuente de Radón (en la inmensa mayoría de los casos) es el terreno, y la causa es su contenido natural en Uranio, a partir de los cuales se generará el radio (^{226}Ra) que produce el Radón en su proceso de desintegración. El mismo se desplaza por procesos de difusión y por convección, dependiendo de propiedades como la porosidad y la permeabilidad. Las concentraciones en aguas suelen ser muy variables siendo más abundantes en aguas subterráneas que en aguas superficiales. En la actualidad se utilizan técnicas avanzadas para mejorar la cartografía de zonas potenciales a contener gas

Radón. En este aspecto se destaca la aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) y la adquisición de datos radiométricos en suelos y aguas subterráneas. Las investigaciones realizadas por [1-4] aplican diferentes metodologías enfocadas en realizar estimaciones del potencial de Radón en suelos o aguas subterráneas. En Cuba se han desarrollado numerosas investigaciones direccionadas a la determinación de las concentraciones de gas Radón; se destacan los estudios [5-7] en aguas subterráneas y superficiales. También el trabajo de [8] estudiando las exposiciones del gas en cuevas turísticas y la evaluación del potencial de Radón en La Habana presentado por [9].

Zona de estudio.

La cuenca hidrográfica Damují se encuentra en el centro de la provincia de Cienfuegos, Cuba, extendiéndose hacia el norte y abarcando varios municipios, incluidos Abreus, Rodas, Palmira, Cruces y Lajas. En la zona de estudio se encuentran los embalses; El Salto (13,4 millones de m³) y Damují (187 millones de m³) además de poseer aguas mineromedicinales y termales en Ciego Montero. Los embalses El Salto y Abreus poseen características hidrogeológicas particulares que influyen significativamente en la dinámica del agua y la distribución del gas Radón en la región. Estas características están determinadas por la interacción entre las formaciones geológicas, la estructura tectónica y los procesos hidrogeológicos. Sus cuencas yacen principalmente, sobre rocas sedimentarias (margas, calizas, aleurolitas, brechas, conglomerados y areniscas) que ocupan la mayor parte de las formaciones geológicas del área (figura 1). Las rocas ígneas están distribuidas al sur de la cuenca hidrográfica formando parte del arco volcánico cretácico. Las formaciones La Rosita y Arimao están presentes en varias partes de la zona de estudio, compuestas fundamentalmente por diferentes tipos de rocas tales como lavas y lava – brechas basálticas, andesito – basálticas y andesíticas, así como por tobas de igual composición con granulometría muy variable [10].

Materiales y métodos

El “sistema de 10 puntos” se basa en parámetros tanto geogénicos como antropogénicos sobre el potencial de Radón del suelo y no incluye las influencias de las características de los edificios. De acuerdo con su importancia, se establecen siete parámetros en un sistema de clasificación, que puede aplicarse tanto en zonas rurales como urbanas: geología, relleno o suelos descubiertos, relieve, tectónica, vegetación, suelo sellado y fuertes vibraciones del tráfico [12].

El principal análisis se realizó en la variedad de rocas de la geología debido a que las rocas sedimentarias loess y till glaciario, que originalmente se les otorgaba 1 punto, no se encuentran en la región. Se tuvo en cuenta las rocas arcillosas en la clasificación, considerando la importancia de las arcillas para el transporte del Radón (²²²Rn) por las propiedades de porosidad y permeabilidad. Se reclasificaron las capas según el método semicuantitativo de los 10 puntos, creando una nueva columna denominada "Reclaf" en la tabla de atributos y se transformaron en ráster para ser sumadas. El análisis de elevaciones se llevó a cabo para evaluar las diferentes alturas presentes en la zona de estudio, permitiendo una reclasificación por tabla que asigna nuevos valores de clase basados en rangos de elevación específicos. Adicionalmente, el algoritmo de interpolación de densidad lineal se utilizó para calcular una medida de densidad de objetos lineales para las líneas férreas, viales y fallas, en una vecindad circular dentro de cada celda ráster.

El muestreo de datos radiométricos en la cuenca hidrográfica Damují se planificó en zonas con diferentes potenciales de gas Radón, empleando los resultados del método semicuantitativo. Aunque no se alcanzó la densidad espacial de pozos planificada, se obtuvieron resultados representativos en las ubicaciones muestreadas. El proceso de muestreo incluyó el registro de profundidades del nivel freático y la profundidad total del pozo, el cálculo del volumen del pozo y el bombeo del agua utilizando una bomba de flujo regulable para asegurar muestras representativas. Se midieron varios parámetros, como la concentración de Radón, temperatura, pH, conductividad eléctrica y concentración de sólidos disueltos (*TDS* por sus siglas en inglés), con el Monitor de Radón RTM 1688-2 y sondas multiparamétricas. Los datos se organizaron y procesaron en *Microsoft Excel* y *StatSoft.Statistica*, aplicando cálculos de incertidumbre y análisis estadístico univariado y multivariado para identificar relaciones entre variables y patrones en los datos.

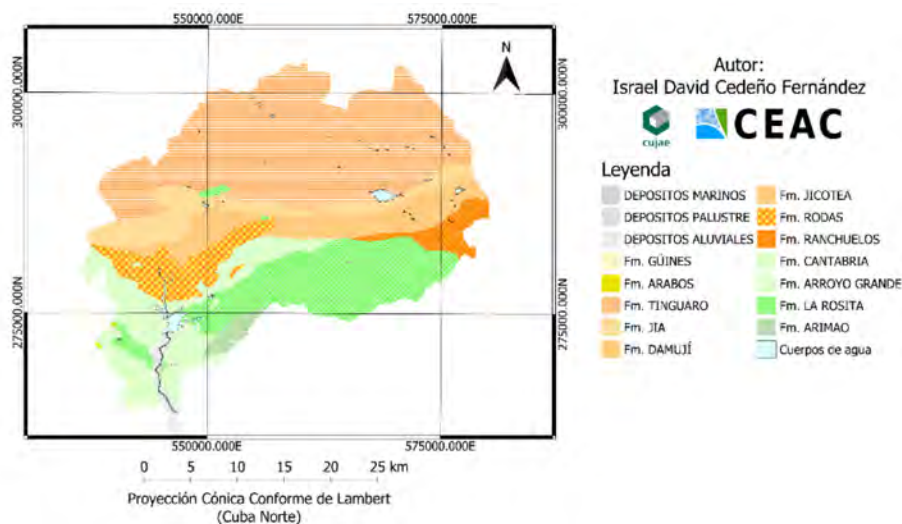


Figura 1. Mapa esquemático de la geología presente en la zona de estudio a escala 1:100 000. [11]

Resultados y discusión

Como parte de los resultados de la investigación realizada se confeccionó un mapa con el potencial de gas Radón en los suelos de la cuenca hidrográfica Damují. Como se muestra en la figura 2, el puntaje oscila entre los cero y nueve puntos, clasificado en bajo, intermedio y alto. Como se plantea en la metodología no necesariamente el potencial de gas Radón de un área debe llegar a 10 puntos, este depende de la estimación que se realiza a partir de las capas.

Se identificaron siete zonas con alto potencial de gas Radón, caracterizadas mayormente por la presencia de rocas carbonatadas, excepto en la zona 2, donde predominan rocas volcánicas. El espesor del suelo es un factor importante en todas las zonas con altos y medios valores de Radón, ya que un menor espesor puede aumentar la emanación del gas. La vegetación, incluyendo cultivos de caña de azúcar, afecta la humedad y permeabilidad del suelo, influyendo en el potencial de gas Radón en las zonas 1, 2, 4 y 7. Además, factores locales como el suelo sellado y las vibraciones del tráfico también son importantes, con una correlación observada entre el suelo sellado (>50 %) y las zonas 1, 2, 4 y 7, así como las vibraciones del tráfico (<10 metros) en todas las zonas de alto potencial. La densidad de viales afecta a todas las zonas, mientras que la densidad de líneas férreas influye en todas las zonas excepto en la 7. La tectónica tiene un mayor impacto en las zonas con potencial medio de gas Radón, aunque en la zona 2 un grupo de fracturas podrían asociarse con el alto potencial de gas Radón.

Se correlacionó el potencial de gas Radón en los suelos de la cuenca con las concentraciones de Radón en las aguas (figura 3). La mayoría de los pozos mostraron una relación directamente proporcional entre el potencial de Radón y las concentraciones medidas en las aguas, indicando una buena correlación entre la

metodología aplicada y los datos medidos en la cuenca. Se identificaron cuatro puntos de interés en relación con el Radón. El pozo artesanal La Curva presentó un alto potencial de Radón en suelos (9 puntos) y una elevada concentración en aguas (11,450 Bq/L), lo que sugiere una significativa migración entre el suelo y el agua subterránea, posiblemente debido a la presencia de rocas volcánicas. El pozo artesanal La Borde, ubicado a unos 3 km de La Curva, también mostró altas concentraciones de Radón, sin embargo, las variaciones en las concentraciones podrían deberse a diferencias en la permeabilidad o profundidad del manto freático. Por otro lado, el pozo artesanal Molino de Piedras posee un alto potencial de Radón en suelos, pero una baja concentración en aguas (0,79 Bq/L), lo que podría estar relacionado con factores geológicos locales, como una alta permeabilidad y un manto freático elevado, que facilitan la transferencia de Radón del agua al suelo. La estación de bombeo CF 195. Laberinto Viejo, mostró un bajo potencial de Radón en suelos, pero una alta concentración en aguas (1,336 Bq/L), esto está relacionada la presencia de intercalaciones de rocas volcánicas y carbonatadas de las formaciones La Rosita y Cantabria. El manto freático en este pozo se encuentra a más de 20 metros de profundidad, lo que puede influir en las diferencias de concentración de Radón entre el agua y el suelo.

A partir del análisis de los datos se obtuvo un mapa del comportamiento de la información radiométrica (figura 4) a una escala de detalle 1:50 000. La región centro – este muestra las concentraciones más altas de Radón, con isolíneas cerradas que indican niveles por encima de los 3 Bq/L. Esta área incluye el pozo La Curva, extendiéndose hacia el pozo La Borde, la estación de bombeo de Indaya y la de Tumba Saco. Las isolíneas se extienden hacia la cuenca hidrográfica Caunao, indicando la posibilidad de altos valores de Radón en algunos pozos de esa área. Las concentraciones más bajas de Radón se encuentran en la parte

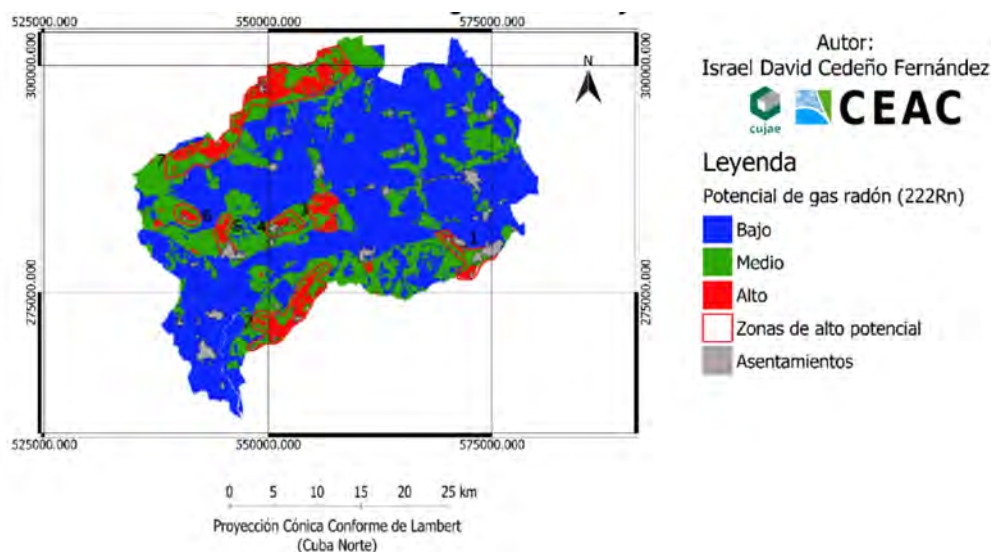


Figura 2. Mapa de zonas potenciales a contener gas Radón en los suelos de la cuenca hidrográfica Damují.

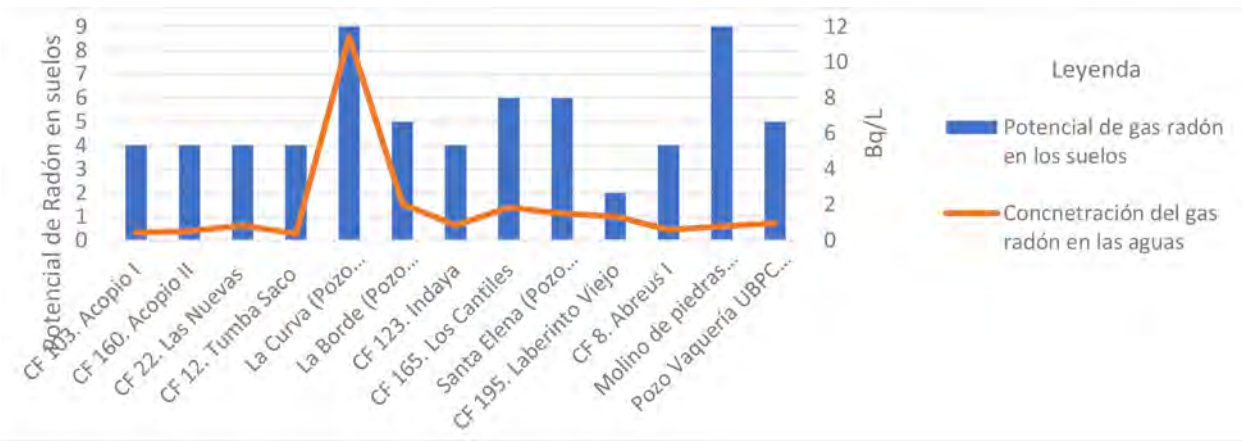


Figura 3. Relación entre el potencial de gas Radón y la concentración de Radón en las aguas.

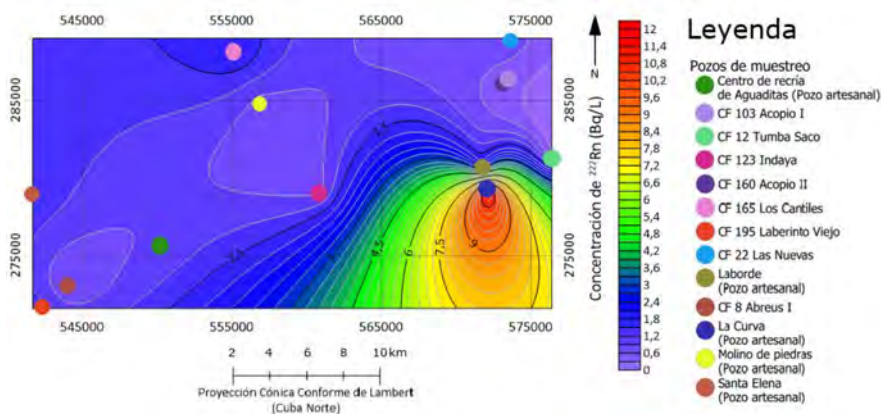


Figura 4. Comportamiento de la información radiométrica en los pozos de agua potable.

oeste y suroeste de la cuenca, con valores entre 0,6 y 0,9 Bq/L, mientras que las concentraciones moderadas se dispersan por el resto de la cuenca, con valores entre 1,5 y 1,8 Bq/L. Se puede observar una clara tendencia en el movimiento de las aguas subterráneas en las zonas correspondiéndose con el caudal de los ríos Damují y Anaya. Esto facilita la correlación entre los valores de potencial de Radón en los suelos y las concentraciones en las aguas subterráneas. La variabilidad en las concentraciones de Radón en los pozos podría deberse a diferencias en las propiedades del acuífero, como la permeabilidad, porosidad y el nivel del manto freático.

Discusión

La identificación de zonas potenciales de Radón en suelos y aguas subterráneas es crucial para el estudio de la cuenca hidrográfica Damují. Los resultados sugieren que la geología local y la estructura tectónica juegan un papel importante en la liberación y distribución del Radón (²²²Rn). Las primeras mediciones de Radón en suelos deberían realizarse en áreas con asentamientos, aunque el potencial de Radón puede ser variable, estas validaciones son esenciales para determinar la distribución real del gas en los suelos y validar el potencial estimado.

El límite de concentración de gas Radón en las aguas subterráneas es de 100 Bq/L según la Orga-

nización Mundial de la Salud [13]. Este valor es considerado seguro para la salud humana y se utiliza como referencia en diversas normativas y estudios científicos. El uso del Radón como trazador hidrogeológico en la cuenca hidrográfica Damují representó una oportunidad para comprender los movimientos e interacciones entre las aguas subterráneas y superficiales. Dada la influencia de la geología local y la estructura tectónica en la zona de estudio se determinó que existe una fuerte relación entre las concentraciones de gas Radón en las aguas subterráneas con el potencial estimado en los suelos. Por otro lado, el Radón, debido a su solubilidad en el agua y a su moderada vida media, actúa como un indicador eficaz del intercambio hidrológico entre aguas subterráneas y superficiales. Esto se ve representado en el mapa del comportamiento de la información radiométrica donde se observa el recorrido del río Damují y Anaya.

Conclusiones

- La integración de la cartografía del potencial de gas Radón en los suelos, y el análisis del comportamiento de las concentraciones de gas Radón en las aguas subterráneas permitieron evaluar las zonas potenciales a presentar valores anómalos de gas Radón en la cuenca hidrográfica Damují.

- La estimación del potencial de gas Radón en los suelos y el análisis de las concentraciones de Radón en los pozos de agua potable permitieron obtener una correlación estable en la cuenca hidrográfica Damují; la mayoría de las zonas con alto y bajo potencial de Radón en los suelos coinciden con las altas y bajas concentraciones de Radón en las aguas subterráneas.
- El análisis de las concentraciones de gas Radón en las aguas subterráneas permitió la aplicación del gas como trazador hidrogeológico, mostrando el comportamiento de las aguas superficiales respecto a las aguas subterráneas y a la geología en la cuenca hidrográfica Damují.

Referencias bibliográficas

- [1]. WIEGAND J. A guideline for the evaluation of the soil radon potential based on geogenic and anthropogenic parameters. *Environ. Geol.* 2001; 40: 949-963. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s002540100287>. ISSN 1432-0495.
- [2]. SKEPPSTRÖM K & OLOFSSON B. A prediction method for radon in groundwater using GIS and multivariate statistics. *Sci. Total Environ.* 2006; 367: 666-680. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.02.044>.
- [3]. TUNG S, LEUNG J, JIAO J, et. al. Assessment of soil radon potential in Hong Kong, China, using a 10-point evaluation system. *Environ. Earth Sci.* 2013; 68: 678-689. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1782-0>.
- [4]. PRZYLIBSKI T. Shallow circulation groundwater – the main type of water containing hazardous radon concentration. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011; 11: 1695-1703. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1695-2011>.
- [5]. ALCAIDE J, OLIVERA J, VALDÉS MG, et. al. Radioactividad del agua en los manantiales de El Cedrón, Santiago de Cuba. *Bol. Soc. Esp. Hidrol. Méd.* 1998; XIII. ISSN 0214-2813.
- [6]. ALCAIDE J, OLIVERA J, VALDÉS G, et. al. Radioactividad del agua en manantiales y balnearios de Cuba. *Bol. Soc. Esp. Hidrol. Méd.* 1999; XIV. ISSN 0214-2813.
- [7]. MONTALVÁN A, BRÍGIDO O, CABALLERO A, ESCALANTE A. Radium-226 in drinking water in Camagüey. *Third International Symposium on Nuclear and Related Techniques (NURT)*. La Habana, Cuba; 2001.
- [8]. CARRAZANA JG, DOMÍNGUEZ LEY O, ÅKERBLÖM G, et. al. Exposure to radon in tourist caves in Cuba. *Int. J. Low Radiat.* 2010; 7(2): 133-139.
- [9]. RODRÍGUEZ WR, SANTIBÁÑEZ JA & FUENTES R. Evaluación del potencial de Radón en la antigua provincia de La Habana. *XIX Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*. La Habana, Cuba. Disponible en: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10479.89765>.
- [10]. ITURRALDE VINENT MA. *Compendio de Geología de Cuba y del Caribe*. La Habana: Editorial CITMATEL, 2012.
- [11]. NÚÑEZ KE. Nuevo mapa geológico de Cuba a escala 1:100 000. *XI Congreso Cubano de Geología. Geología Regional y Geodinámica de Cuba y el Caribe*. La Habana, 2015.
- [12]. BLEILE D & WIEGAND J. Checking the 10 - point system for an evaluation of the soil radon potential. *Radioact. Environ.* 2005; 7: 833-841. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1569-4860\(04\)07104-9](https://doi.org/10.1016/S1569-4860(04)07104-9)
- [13]. World Health Organization (WHO). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum*. WHO Press; 2020. Disponible en: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>.

Recibido: 18 de septiembre de 2024

Aceptado: 31 de octubre de 2024

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

Credit/Conceptualización: Israel David Cedeño Fernández, Alejandro García Moya, Willy Roberto Rodríguez Miranda, Héctor Alejandro Cartas Águila. **Fuentes:** Israel David Cedeño Fernández. **Curación de datos:** Israel David Cedeño Fernández. **Software:** Israel David Cedeño Fernández. **Análisis formal:** Israel David Cedeño Fernández, Alejandro García Moya, Willy Roberto Rodríguez Miranda, Héctor Alejandro Cartas Águila. **Validación:** Israel David Cedeño Fernández, Alejandro García Moya, Willy Roberto Rodríguez Miranda, Héctor Alejandro Cartas Águila. **Investigación:** Israel David Cedeño Fernández. **Visualización:** Israel David Cedeño Fernández, Alejandro García Moya, Willy Roberto Rodríguez Miranda. **Metodología:** Israel David Cedeño Fernández, Alejandro García Moya, Willy Roberto Rodríguez Miranda, Héctor Alejandro Cartas Águila. **Administración de proyecto:** Alejandro García Moya. **Escritura – borrador original:** Israel David Cedeño Fernández. **Redacción – revisión y edición:** Alejandro García Moya, Willy Roberto Rodríguez Miranda.

Propuesta metodológica para el estudio del secuestro de carbono en sedimentos de ecosistemas de carbono azul en Cuba utilizando técnicas nucleares e isotópicas

 Liana Beatriz Carballo Rosado¹,  Aniel Guillén Arruebarrena¹,  Alejandro García Moya¹,
 Yusmila Helguera Pedraza¹,  Carlos Manuel Alonso Hernández²

¹ Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC). Carretera a Castillo de Jagua, 1,5 km Ciudad Nuclear. CP59350 Cienfuegos, Cuba.

² Marine Environment Laboratories, Department of Nuclear Science and Application, International Atomic Energy Agency. 4 Quai Antoine 1er, 98000 Monaco, Mónaco.

lianacarballo96@gmail.com

Resumen

Los ecosistemas de carbono azul son capaces de almacenar carbono a largo plazo en sus sedimentos. Debido a su inherente variabilidad espacial y temporal, el estudio de este tipo de ecosistemas requiere múltiples enfoques. Es por eso que se han utilizado avances técnicos y herramientas analíticas que mejoran la cuantificación del secuestro de carbono y el seguimiento de sus cambios a lo largo del tiempo, como son el empleo de radionúclidos de vida corta para la determinación de tasas de secuestro, y de isótopos estables para la identificación del origen de la materia orgánica en los sedimentos. Cuba es considerada como uno de los hotspots de Carbono Azul en el mundo con un importante potencial de almacenamiento de carbono. Sin embargo, existen incertidumbres sobre la extensión de estos ecosistemas y una falta de datos sobre el carbono en la literatura científica, por lo que es necesario contar con datos científicos para estimar las existencias de carbono orgánico en estos ecosistemas, su tasa de acumulación de carbono y su origen. En los últimos años han surgido nuevas directrices y metodologías que brindan procedimientos de medición y monitoreo internacionalmente aceptados para la contabilidad del carbono y para las mediciones de analíticas de perfiles de sedimentos como registros ambientales. El objetivo principal de este artículo fue proponer una guía metodológica integradora para el estudio de secuestro de carbono en ecosistemas de carbono azul de Cuba a partir de la literatura disponible, y sobre todo contextualizada a las capacidades analíticas en nuestro país.

Palabras clave: secuestro carbono; sedimentos; isótopos; Cuba; ecosistemas.

Methodological proposal for the study of carbon sequestration in sediments of blue carbon ecosystems in Cuba using nuclear and isotopic techniques

Abstract

Blue carbon ecosystems are capable of long-term carbon storage in their sediments. Due to their inherent spatial and temporal variability, the study of these ecosystems requires multiple approaches. For this reason, technical advances and analytical tools have been used to improve the quantification of carbon sequestration and the monitoring of its changes over time, such as the use of short-lived radionuclides to determine sequestration rates and stable isotopes to identify the origin of organic matter in sediments. Cuba is considered one of the Blue Carbon hotspots in the world with an important potential for carbon storage. However, there are uncertainties about the extent of these ecosystems and a lack of carbon data in the scientific literature, so there is a need for scientific data to estimate the organic carbon stocks in these ecosystems, their rate of carbon accumulation and their origin. In recent years, new guidelines and methodologies have emerged that provide internationally accepted measurement and monitoring procedures for carbon accounting and for sediment profile analytical measurements as environmental records. The main objective of this article was to propose an integrative methodological guide for the study of carbon sequestration in blue carbon ecosystems in Cuba based on the available literature, and above all contextualized to the analytical capabilities in our country.

Key words: carbon sequestration; sediments; isotopes; Cuba; ecosystems.

Introducción

Los efectos de la elevada concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera se han vuelto cada vez más evidentes en las últimas décadas. Las proyecciones proporcionadas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático sugieren firmemente la importancia de controlar los aumentos de la temperatura global a menos de 1,5 °C. Para alcanzar este objetivo será necesario adoptar una serie de medidas de adaptación y mitigación. En este contexto, están cogiendo impulso como opción las soluciones basadas en la naturaleza [1].

Los ecosistemas costeros con vegetación como las praderas marinas, los manglares y las marismas, han sido reconocidos recientemente por su capacidad para almacenar o secuestrar grandes cantidades de carbono orgánico dentro de sus tejidos, suelos y sedimentos, denominado "carbono azul" [2, 3]. En estos ecosistemas se distinguen cuatro sumideros principales de carbono azul: la biomasa aérea viva, la biomasa aérea muerta, la biomasa subterránea viva y el carbono subterráneo en el sedimento. Este último constituye desde el 50 % al 90 % de la reserva total de carbono de un ecosistema de manglar, así como el 98 % del carbono en las marismas costeras y los pastos marinos. Por lo que su medición es indispensable para determinar las dinámicas a largo plazo del cambio climático [4-7].

Las elevadas concentraciones de carbono en los sedimentos se deben a la alta productividad primaria, las altas tasas de sedimentación y la lenta descomposición del carbono orgánico en los suelos anóxicos inundados. En áreas donde la acumulación ocurre sin bioturbación, mezclado físico y/o episodios de erosión, la columna sedimentaria constituye un registro ambiental de las tendencias temporales y los cambios ocurridos en el ecosistema, aportando información histórica sobre las características del ambiente desde su formación y las modificaciones temporales que ha sufrido hasta el momento de su evaluación [8-10].

Para abordar explícitamente el rol de los ecosistemas de carbono azul en la mitigación del cambio climático y el bienestar humano mediante políticas, reglamentos, planes de manejo u otros mecanismos es necesario comprender: (1) la distribución espacial de estos ecosistemas, (2) la cantidad de carbono presente en los distintos sumideros (existencias de carbono), sobre todo en el suelo que es donde se almacenan los mayores valores de carbono, (3) la cantidad de carbono que se emite o se secuestra en los ecosistemas a través del tiempo (tasas de secuestro) y (4) la identificación del origen de la materia orgánica almacenada en ellos.

En vista de la gran cantidad de ecosistemas marino-costeros presentes en Cuba, el país es considerado como uno de los *hotspot* de Carbono Azul en el mundo, con un importante potencial de acumulación y almacenamiento de carbono. Sin embargo, existen incertidumbres sobre la extensión de estos ecosistemas y se carece de datos sobre el carbono almacenado en los mismos. Por ello es necesario realizar investigaciones que proporcionen va-

lores confiables sobre la existencia, la tasa de secuestro y el origen del carbono orgánico [11, 12].

Debido a las dinámicas de intercambio desde y hacia tierra que se producen en las zonas costeras y estuarinas, así como su inherente variabilidad espacial y temporal, el estudio de este tipo de ecosistemas requiere múltiples enfoques. Para ello se han desarrollado e implementado avances técnicos que mejoran la cuantificación del secuestro de carbono azul y el seguimiento de sus cambios a lo largo del tiempo. El empleo de las técnicas nucleares e isotópicas utilizando los sedimentos como registros ambientales, en particular del análisis de ^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{13}C y ^{15}N , ofrece una valiosa información sobre la reconstrucción histórica del origen del carbono orgánico secuestrado en sedimento y sus tasas de secuestro, lo cual es fundamental para la toma de decisiones y la apropiada la gestión de los recursos y servicios que ofrecen estos ecosistemas [13-15].

En los últimos años han surgido nuevas directrices y metodologías que brindan procedimientos de medición y monitoreo internacionalmente aceptados para la contabilidad del carbono [2, 3] y para las determinaciones analíticas de perfiles de sedimentos como registros ambientales [16]. Sin embargo, es necesario contar con una guía metodológica integradora que propicie desarrollar el estudio del secuestro de carbono en ecosistemas marino-costeros cubanos, y contextualizarlo a las capacidades tecnológicas del país.

Metodologías consultadas

La guía metodológica se propuso a partir del análisis y la integración de diferentes manuales y artículos que abordan el tema de carbono azul [1-3], [16, 17] en los que se describe: cómo diseñar y realizar los muestreos de campo; recomendaciones y criterio de expertos sobre la toma, preparación, manipulación y análisis de las muestras; cálculo de las existencias de carbono y las emisiones de CO_2 ; criterio de expertos sobre modelos de fechado más empleados y determinación de las tasas de secuestro y su origen; las capacidades nacionales existentes. En este artículo no está incluida la validación de la misma.

Metodología propuesta

La guía que se propone cuenta con 5 etapas y varias subetapas que se describen a continuación, ver figura 1.



Figura 1. Diagrama de flujo que describe la guía para el estudio de secuestro de carbono en sedimentos de ecosistemas de carbono azul cubanos utilizando técnicas nucleares e isotópicas.

A continuación, se explicará paso a paso cada una de las etapas:

Etap 1: Diseño de muestreo y toma de perfiles de sedimentos

a. Búsqueda y recopilación de información sobre el área

Esta subetapa es de gran importancia porque permite conocer todas las investigaciones previas que pudieran existir sobre el área a estudiar, así como toda la documentación disponible sobre la extensión del ecosistema, vegetación predominante, etc. La existencia o no de información previa, determinará el grado o intensidad que es necesario imprimir al estudio a fin de cumplir con los objetivos del mismo.

b. Selección del área de muestreo, cantidad de perfiles y su ubicación.

Tener información actualizada y georreferenciada sobre la cuantificación en hectáreas de la cobertura vegetal, orografía, geología, suelo, hidrología, clima, rutas

y caminos de acceso, mapas de hábitat del ecosistema en estudio tiene varias ventajas ya que permite la optimización de la campaña de monitoreo mediante la selección de puntos de muestreo representativos. Además, la extensión del área es un dato necesario para el cálculo de las existencias de carbono del ecosistema. Es recomendable la creación o actualización de la información existente a través del uso de imágenes satelitales y sensores remotos.

Para seleccionar la cantidad de puntos de muestreos y su ubicación hay que tener en cuenta los siguientes criterios: paisaje, topografía, accesibilidad al sitio, distribución espacial, cobertura vegetal, espesor de la capa de suelo, régimen hídrico, etc. La cantidad de perfiles dependerá principalmente de la extensión del ecosistema. Se recomienda tomar varios perfiles de sedimentos por área seleccionada que sean representativos de la misma para disminuir las incertidumbres del estudio. La toma pudiera ser al azar, por transectos, por cuadrantes, intencionada por características espe-

cíficas del suelo, la vegetación, la hidrodinámica, etc., en dependencia del objetivo del estudio.

Toma de muestras y datos de muestreo

Para obtener muestras de sedimentos se debe contar con un equipo para el muestreo de suelos que permita extraer una muestra relativamente inalterada con una compactación mínima. Existen gran variedad colectores o nucleadores especializados para la toma de muestras [18], no obstante, se pueden construir nucleadores artesanales a partir de tubos de PVC [1].

Para la toma de muestras de sedimentos, primeramente, se removerá de la superficie los detritos orgánicos que estaban en el sitio de muestreo, se insertará el nucleador verticalmente en el suelo hasta 1 m de profundidad como mínimo ya que esta es la profundidad más vulnerable a alteraciones por uso de la tierra. Una vez llegado a la profundidad deseada, se extraerá el nucleador y los extremos de este se cubrirán con tapones para evitar la pérdida de muestras. Una vez finalizado el muestreo se trasladarán los perfiles de sedimentos de forma vertical al laboratorio.

Los estudios sobre el origen de la MO en ecosistemas de carbono azul, deben tener en cuenta que su alta productividad biológica se sustenta en el aporte de recursos autóctonos y recursos alóctonos. Es por ello que en estos ecosistemas existen diversas fuentes potenciales de MO. Debido a la diversidad de interacciones químicas, físicas y biológicas implicadas en su origen, [13]. Para la identificación del origen del carbono orgánico en los sedimentos, es recomendable coleccionar muestras de los miembros terminales (*endmembers*, en inglés) tanto alóctonos como autóctonos, que son la base de la productividad primaria del sistema objeto de estudio. Para ello se recomienda recolectar muestras de la vegetación predominante en el área de estudio y posibles zonas de intercambio como fuentes potenciales de materia orgánica a los sedimentos del ecosistema. Se coleccionarán muestras de hojas, raíces y

tallos de al menos 10 especímenes de cada especie de vegetación dominante identificada en el campo para formar una muestra conjunta de cada *endmembers*. De ser necesario se coleccionarán muestras de la vegetación para hacer herbarios que serán utilizados por expertos para su identificación hasta el nivel taxonómico más bajo posible.

Durante el muestreo de cada perfil de sedimento se tomarán los siguientes datos:

1. Fecha de muestreo
2. Hora en que se realiza
3. Lugar del muestreo
4. Código del perfil de sedimento
5. Coordenadas geográficas del lugar de muestreo
6. Compactación en el campo
7. Diámetro interior del nucleador
8. Vegetación predominante del lugar
9. Código de las muestras de material biológico
10. Observaciones durante el muestreo

Etapa 2: En el Laboratorio

a. Seccionamiento de los perfiles y limpieza de las muestras

Se anotará la longitud total de la muestra y se realizará un registro fotográfico del mismo. Se recomienda fotografiar el perfil con su etiqueta de identificación y la cinta métrica.

Para realizar tasas de secuestro a partir de técnicas nucleares se recomienda seccionar el perfil de sedimento a la mayor resolución posible. [16] Para optimizar el esfuerzo analítico y suponiendo que el perfil es de 1 m de largo, es recomendable realizar el seccionamiento de la siguiente forma: en los primeros 20 cm seccionar cada 1 cm, en los próximos 30 cm seccionar cada 2 cm y luego seccionar cada 5 cm hasta llegar al final del perfil. A cada muestra seccionada se le retirarán las raíces, hojas, madera de gran tamaño y otros cuerpos ajenos al sedimento (conchas, piedras, etc.).

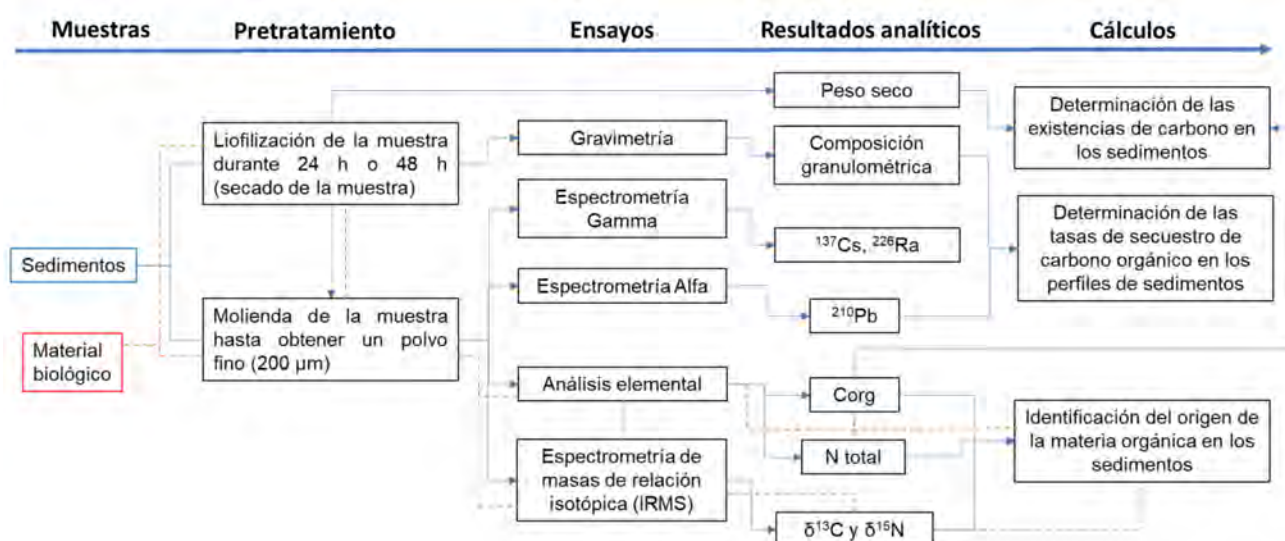


Figura 2. Esquema de los análisis a realizar.

b. Análisis de laboratorio a realizar

Etapa 3: Determinación de las existencias de carbono en los sedimentos

El cálculo está basado en la concentración de carbono orgánico (C_{org}) presente en cada intervalo en que se seccionó el perfil de sedimento, el cual se multiplica por la densidad aparente (masa seca (g) / volumen del intervalo (cm^3)) y por el grosor del intervalo seleccionado (cm). Luego, se realiza la sumatoria de la cantidad de carbono orgánico de los diferentes intervalos para saber la concentración de carbono orgánico total de cada perfil de sedimento, se determina el promedio de cada perfil para el estrato estudiado y se realiza la conversión de g/cm^2 a MgC/ha que es equivalente a toneladas/hectáreas.

Etapa 4: Determinación de las tasas de secuestro de carbono orgánico en los perfiles de sedimentos.

Las capas de sedimentos de los perfiles de sedimentos se datan utilizando radioisótopos. Para los estudios relativos a los últimos 100-150 años del registro sedimentario se han utilizado ampliamente la datación por ^{210}Pb , radionúclido de origen natural perteneciente a la cadena radiactiva del ^{238}U que está presente en los sedimentos debido a la desintegración dentro del propio sedimento (^{210}Pb soportado) y al aporte desde la atmósfera (^{210}Pb en exceso). Es este suministro de ^{210}Pb en exceso el que puede utilizarse para la datación de sedimentos tanto en entornos terrestres como estuarinos y marinos [13], [16].

Existen varios modelos de datación, a partir de los cuales se estima la tasa de acumulación másica (MAR, en sus siglas en inglés) y la tasa de acumulación sedimentaria de cada núcleo [16].

La tasa de secuestro de carbono orgánico se calcula multiplicando la MAR ($gcm^{-2}año^{-1}$) por la cantidad de carbono orgánico de cada perfil (%).

Etapa 5: Identificación del origen de la materia orgánica (MO) en los sedimentos de ecosistemas de carbono azul empleando isótopos estables y análisis elemental.

En zonas costeras, las técnicas isotópicas y elementales son buenas herramientas de investigación para distinguir entre fuentes de MO autóctonas o alóctonas, siempre y cuando se tengan en cuenta los siguientes supuestos: 1) las fuentes de MO en el ecosistema tienen señales isotópicas diferentes y fácilmente identificables 2) esta señal se conserva prácticamente invariable durante la incorporación de la MO en los sedimentos y 3) que la distribución natural de dicha señal en los sedimentos es consecuencia de la mezcla del material producido por estas fuentes [19].

Los isótopos de mayor interés en este tipo de estudio son los isótopos estables de carbono ($^{13}C/^{12}C$), junto con las proporciones de carbono orgánico y nitrógeno total de la materia orgánica sedimentaria (relación C_{org}/N_{total}). En Meyers, P. A. (1994) y Lamb, et. al. (2006) [19],

[20] se propone un esquema integrador que representa en diferentes grupos, toda la mezcla de posibles fuentes de MO en ecosistemas acuáticos, sin embargo, los autores recomiendan, de ser posible, la utilización de datos propios para cada escenario. Por lo tanto, para la identificación del origen de la MO en los sedimentos a estudiar, primeramente, se caracteriza elemental e isotópicamente las posibles fuentes de MO del ecosistema y se plotean estos resultados creando un esquema integrador de las posibles fuentes. Luego se plotean a este esquema los resultados isotópicos ($\delta^{13}C$) y elementales (C_{org}/N_{total}) obtenidos en los sedimentos de cada una de las secciones del perfil. De acuerdo a la distribución espacial que tomaron dichas muestras en el esquema se identifican las posibles fuentes de MO. Sin embargo, las conclusiones extraídas de estas evaluaciones suelen ser cualitativas, por lo que también se emplean modelos de balance de masas y mezcla isotópica para cuantificar las contribuciones de las distintas fuentes de MO identificadas [17].

Conclusiones

La guía propuesta integra en un solo documento la diversa información localizada en diferentes metodologías. Es aplicable a cualquier ecosistema de carbono azul (mangle, pasto marino, marisma) y brinda una visión general sobre los pasos a seguir para realizar estudios sobre el secuestro de carbono en los ecosistemas de carbono azul de Cuba.

Referencias bibliográficas

- [1]. Centro de Cooperación del Mediterráneo (UICN). Manual para la creación de proyectos de carbono azul en Europa y el Mediterráneo. Málaga: Centro de Cooperación del Mediterráneo, 2021.
- [2]. KAUFFMAN JB, DONATO D, & ADAME MF. Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. Documento de Trabajo 117. Center for International Forestry Research, Bogor, Indonesia: CIFOR, 2013. Disponible en: https://www.cifor-icraf.org/publications/pdf_files/WPapers/WP117Kauffman.pdf
- [3]. HOWARD J, HOYT S, ISENSEE K, et. al. Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows. Arlington, Virginia, USA: Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature, 2014. Available in: <https://www.unep.org/resources/publication/coastal-blue-carbon-methods-assessing-carbon-stocks-and-emissions-factors>.
- [4]. BENNETT M, MARCH A, RAGUAIN J & FAILLER P. Blueprint for blue carbon: lessons from Seychelles for small island states. *Oceans*. 2024; 5(1): 81-108. doi: 10.3390/oceans5010006.
- [5]. CHASTAIN SG, KOHFELD KE, PELLATT MG, et. al. Quantification of blue carbon in salt marshes of the Pacific coast of Canada. *Biogeosciences*. 2022; 19: 5751-5777, doi: 10.5194/bg-19-5751-2022.
- [6]. SUN Y, ZHANG H, LIN Q, et. al. Exploring the international research landscape of blue carbon : Based on scientometrics analysis. *Ocean Coast. Manag.* 2024; 252: 107106. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2024.107106.
- [7]. MORRISSETTE HK, BAEZ SK, BEERS L, et. al. Belize blue carbon: establishing a national carbon stock estimate for mangrove ecosystems. *Sci. Total Environ.* 2023; 870: 161829. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161829.
- [8]. ARIAS ORTIZ A, MASQUÉ P, GARCIA ORELLANA J, et. al. Reviews and syntheses : 210 Pb-derived sediment and carbon

- accumulation rates in vegetated coastal ecosystems – setting the record straight. *Biogeosciences*. 2018; 15: 6791-6818. doi: 10.5194/bg-15-6791-2018.
- [9]. LOVELOCK CE, ATWOOD T, BALDOCK J, DUARTE C, *et. al.* Assessing the risk of carbon dioxide emissions from blue carbon ecosystems. *Front. Ecol. Environ.* 2017; 15(5): 257-265. doi: 10.1002/fee.1491.
- [10]. HATJE V, COPERTINO M, PATIRE VF, OVANDO X, *et. al.* Vegetated coastal ecosystems in the Southwestern Atlantic Ocean are an unexploited opportunity for climate change mitigation. *Commun. Earth Environ.* 2023; 4. doi: 10.1038/s43247-023-00828-z.
- [11]. CHATTING M, AL-MASLAMANI I, WALTON M, SKOV MW, *et. al.* Future mangrove carbon storage under climate change and deforestation. *Front. Mar. Sci.* 2022; 9: 781876. doi: 10.3389/fmars.2022.781876.
- [12]. CRUZ PORTORREAL Y, REYES DOMINGUEZ OJ, MILANES CB, MESTANZA RAMÓN C, *et. al.* Environmental policy and regulatory framework for managing mangroves as a carbon sink in Cuba. *Water*. 2022; 14: 3903. doi: 10.3390/w14233903.
- [13]. WECKSTRÖM K, SAUNDERS KM, GELL PA, & SKILBECK GC. *Applications of Paleoenvironmental Techniques in Estuarine Studies*. Springer Dordrecht, 2017. doi: 10.1007/978-94-024-0990-1.
- [14]. NOVAK AB, PELLETIER M, COLARUSSO P, SIMPSON J, *et. al.* Factors influencing carbon stocks and accumulation rates in eelgrass meadows across New England, USA. *Estuaries and Coasts*. 2020; 43(8): 2076-2091. doi: 10.1007/s12237-020-00754-9.
- [15]. BREITHAUPT JL., SMOAK JM, BIANCHI TS S, VAUGHN DR, *et. al.* Increasing rates of carbon burial in Southwest Florida coastal wetlands. *JGR Biogeosciences*. 2020; 125(2): e2019JG005349. doi: <https://doi.org/10.1029/2019JG005349>
- [16]. SANCHEZ CABEZA JA, DÍAZ ASECIO M, & RUIZ FERNÁNDEZ AC. *Radiocronología de sedimentos costeros utilizando 210 Pb: Modelos, Validación y Aplicaciones*. Viena: OIEA, 2012.
- [17]. International Atomic Energy Agency (IAEA). *Manual for the use of stable isotopes in wetland science*. Vienna: IAEA, 2024. [Online]. Available in: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TCS-84web.pdf>
- [18]. HOWARD J, HOYT S, ISENSEE K, TELSZEWSKI M. *et. al.* Coastal blue carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses. Arlington, Virginia, USA.: Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature, 2014.
- [19]. LAMB AL., WILSON GP Y LENG MJ. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}C$ and C / N ratios in organic material. *Earth Sci. Rev.* 2006; 75: (1-4): 29-57. doi: 10.1016/j.earscirev.2005.10.003.
- [20]. MEYERS P. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chem. Geol.* 1994; 114: 289-302.




Recibido: 18 de septiembre de 2024

Aceptado: 31 de octubre de 2024

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

Credit/Conceptualización: Liana Beatriz Carballo Rosado, Aniel Guillén Arruebarrena, Alejandro García Moya, Yusmila Helguera Pedraza, Carlos Manuel Alonso Hernández. **Fuentes:** Liana Beatriz Carballo Rosado, Aniel Guillén Arruebarrena, Alejandro García Moya, Yusmila Helguera Pedraza, Carlos Manuel Alonso Hernández. **Análisis formal:** Liana Beatriz Carballo Rosado, Aniel Guillén Arruebarrena, Alejandro García Moya, Yusmila Helguera Pedraza, Carlos Manuel Alonso Hernández. **Adquisición de fondos:** Yusmila Helguera Pedraza, Carlos Manuel Alonso Hernández. **Validación:** Liana Beatriz Carballo Rosado, Aniel Guillén Arruebarrena Alejandro García Moya, Yusmila Helguera Pedraza, Carlos Manuel Alonso Hernández. **Investigación:** Liana Beatriz Carballo Rosado, Aniel Guillén Arruebarrena Alejandro García Moya, Yusmila Helguera Pedraza, Carlos Manuel Alonso Hernández. **Visualización:** Liana Beatriz Carballo Rosado, Aniel Guillén Arruebarrena, Alejandro García Moya, Yusmila Helguera Pedraza, Carlos Manuel Alonso Hernández. **Metodología:** Liana Beatriz Carballo Rosado, Aniel Guillén Arruebarrena, Alejandro García Moya, Yusmila Helguera Pedraza, Carlos Manuel Alonso Hernández. **Escritura – borrador original:** Liana Beatriz Carballo Rosado, Alejandro García Moya, Aniel Guillén Arruebarrena. **Redacción, revisión y edición:** Liana Beatriz Carballo Rosado, Aniel Guillén Arruebarrena, Alejandro García Moya, Yusmila Helguera Pedraza, Carlos Manuel Alonso Hernández.

Evaluación de la inocuidad radiológica de pescados y vegetales de consumo en Cienfuegos, Cuba

 Rita Y. Sibello Hernández,  Yusdiany Pereira Cuellar,  Héctor Alejandro Cartas Águila,
Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC). Carretera a Castillo de Jagua, 1,5 km Ciudad Nuclear. CP59350
Cienfuegos, Cuba.
rita@ceac.cu

Resumen

Es importante que los alimentos que se consuman sean inocuos, es decir, que no estén asociados a riesgos para la salud de los consumidores. En este sentido, desde el punto de vista radiológico, es necesario garantizar que la presencia de los radionúclidos en los alimentos sea tan baja como sea posible. Así, el objetivo principal de esta investigación fue determinar las concentraciones de los radionúclidos yodo - 131 (I-131); cesio - 134 (Cs-134), cesio - 137 (Cs - 137), americio - 241 (Am - 241), de origen artificial y del radio -226 (Ra - 226) y del potasio - 40 (K - 40), de origen natural, en las hortalizas monitoreadas en los organopónicos de la ciudad de Cienfuegos y en pescados y otros organismos marinos de consumo, provenientes de la bahía de Cienfuegos para evaluar su inocuidad. El método de medición utilizado fue la espectrometría gamma de bajo fondo. Se obtuvo como resultado que los niveles de los radionúclidos artificiales están por debajo del umbral de detección del método, lo que significa que en estos alimentos estos radionúclidos no están presentes y por lo tanto están libres de contaminación radiactiva. Con respecto a los radionúclidos naturales, sólo el K - 40 se encuentra presente en los alimentos y los valores determinados se corresponden con sus concentraciones naturales reportadas para los alimentos. Se concluyó que los alimentos monitoreados son inocuos desde el punto de vista radiológico. Estos resultados son una contribución del Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos a la gestión de la inocuidad alimentaria en Cuba

Palabras clave: alimentos; seguridad; radiactividad; espectroscopia gamma; Cuba.

Evaluation of the radiological safety of fish and vegetables for consumption in Cienfuegos, Cuba

Abstract

It is important that the foods are safe, that is, they are not associated with risks to the health of consumers. In this sense, from a radiological point of view, it is necessary to guarantee that the presence of radionuclides in food is as low as possible. Thus, the main objective of this research was to determine the concentrations of the radionuclides: iodine - 131 (I-131); cesium - 134 (Cs-134), cesium - 137 (Cs - 137), americium - 241 (Am - 241), of artificial origin and radium -226 (Ra - 226) and potassium - 40 (K - 40), of natural origin, in the monitored vegetables in the organoponics from the Cienfuegos city and in fish and other marine organisms for consumption, from the Cienfuegos Bay to evaluate their safety. The method used for the measurement was low background gamma spectrometry. The result was that the levels of artificial radionuclides are below of the detection limit of the method, which means that these radionuclides are not present in these foods and therefore are free of radioactive contamination. With respect to natural radionuclides, only K - 40 is present in foods and the determined values correspond to their natural concentrations reported in foods. It was concluded that the monitored foods are safe from a radiological point of view. These results are a contribution of the Environmental Studies Center of Cienfuegos to the management of food safety in Cuba.

Key words: food; safety; radioactivity; gamma spectroscopy; Cuba.

Introducción

El Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC), desde el 2016 y hasta finales de 2022, ejecutó por encargo estatal un servicio científico-técnico cuyo objetivo principal fue apoyar al gobierno de la provincia y del país en general, en la gestión de la actividad de la inocuidad alimentaria, que financió la Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada (AENTA) de Cuba. A partir de 2023, este servicio se convirtió en un proyecto territorial (Acrónimo SEGAL), el cual tributa al programa de proyectos de ciencia y técnica Seguridad Alimentaria, de la Delegación de la Agricultura de Cienfuegos, encontrándose actualmente en ejecución y para lo cual el CEAC pone a disposición sus capacidades analíticas y su capital humano. En este sentido, una de las metas ha sido determinar las concentraciones de radionúclidos en los alimentos y evaluar la inocuidad desde el punto de vista radiológico.

El ser humano está expuesto, además de las radiaciones ionizantes de origen natural, a las de origen artificial y a pesar de estas tener múltiples aplicaciones de extraordinaria utilidad, pueden implicar graves daños a la salud. Entre las radiaciones de origen natural están las originadas por los rayos cósmicos y por la presencia en el ambiente de forma natural, de sustancias radiactivas tales como el uranio - 238 (U-238), el radio - 226 (Ra-226) y el torio - 232 (Th - 232) (con sus productos descendientes) y el potasio - 40 (K-40). La presencia de contaminantes radiactivos artificiales en nuestro país, es de origen global, provocadas principalmente por los ensayos nucleares a cielo abierto que tuvieron lugar en el siglo pasado y que aún persisten por sus largos períodos de semidesintegración. También los accidentes nucleares transfronterizos pudieran provocar la llegada a nuestro país de radionúclidos artificiales. En este contexto, en enero de 2001, entró en vigor en Cuba, el Programa de Vigilancia Radiológica de Alimentos y Agua [1]; [2], el cual tributa al Programa Nacional de Vigilancia de Contaminantes en Alimentos y Agua implementado desde 1998.

En lo concerniente a los alimentos, son aplicables dos de los principios básicos de la protección radiológica: el principio de Optimización o de ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) “tan bajo como razonablemente sea posible” y el principio de Limitación de Dosis, las dosis de radiación recibidas por las personas no deben superar los límites establecidos por la legislación vigente [3]. Esto significa que es necesario mantener el control de los niveles de radiactividad presentes en los alimentos y así garantizar que los alimentos que se consumen sean inocuos desde el punto de vista radiactivo, es decir que la presencia de radionúclidos sea tan baja como sea posible y no se superen los límites de dosis establecidos. Es por eso que muestras representativas de los alimentos se deben analizar radiológicamente en laboratorios debidamente equipados. En este caso, la espectrometría gamma de bajo fondo, constituye una excelente herramienta, es una técnica no destructiva que permite determinar los niveles existentes de los ra-

dionúclidos emisores gamma. Por otra parte, son estos tipos de emisores, los que con mayor probabilidad pueden detectarse en caso de accidentes transfronterizos [2].

En este trabajo se muestran los resultados obtenidos de las determinaciones de las concentraciones de actividad de los radionúclidos yodo - 131 (I-131); cesio - 134 (Cs-134), cesio - 137 (Cs - 137), americio - 241 (Am - 241), de origen artificial y del radio -226 (Ra - 226) y del potasio - 40 (K - 40), de origen natural, en las hortalizas monitoreadas en los organopónicos de la ciudad de Cienfuegos, y en pescados y otros organismos marinos de consumo provenientes de la bahía de Cienfuegos, ambos tipos de alimentos de preferencia para los cienfuegueros y monitoreados en el marco del proyecto SEGAL.

Estos resultados son una contribución a la base de datos de la radiactividad existente en el medio ambiente de Cuba y complementan el trabajo realizado por la Red Nacional de Vigilancia Radiológica Ambiental y al Programa de Vigilancia Radiológica de Alimentos. La evaluación de la inocuidad de estos alimentos se realizó teniendo en cuenta las Series de Seguridad del OIEA [3] y teniendo en consideración los niveles de referencia de radionúclidos en alimentos vigentes en Cuba, establecidos en la Norma general para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos [4].

Todos los alimentos analizados son inocuos desde el punto de vista radiológico, las concentraciones de actividad por debajo del umbral de detección para los radionúclidos artificiales indican que los alimentos están libres de contaminación radiactiva y para el caso de los radionúclidos naturales, las actividades por debajo del límite de detección para el Ra-226 es indicativo que los alimentos no lo concentran y para el K-40, las concentraciones determinadas están en correspondencia con las reportadas para este isótopo [5], [6], [7]. Para el Ra-226 y para el K-40 no existen límites de concentración, por ser radionúclidos naturales.

Materiales y métodos

Muestreo de vegetales

La toma de muestras de vegetales se realizó en diecisiete organopónicos identificados en la ciudad de Cienfuegos. En la figura 1 se muestra un mapa con la ubicación de los organopónicos monitoreados. De cada tipo de hortaliza en cada organopónico, se tomaron muestras compuestas de aproximadamente 2 kg de peso fresco, formada por muestras simples tomadas al azar de los distintos canteros.

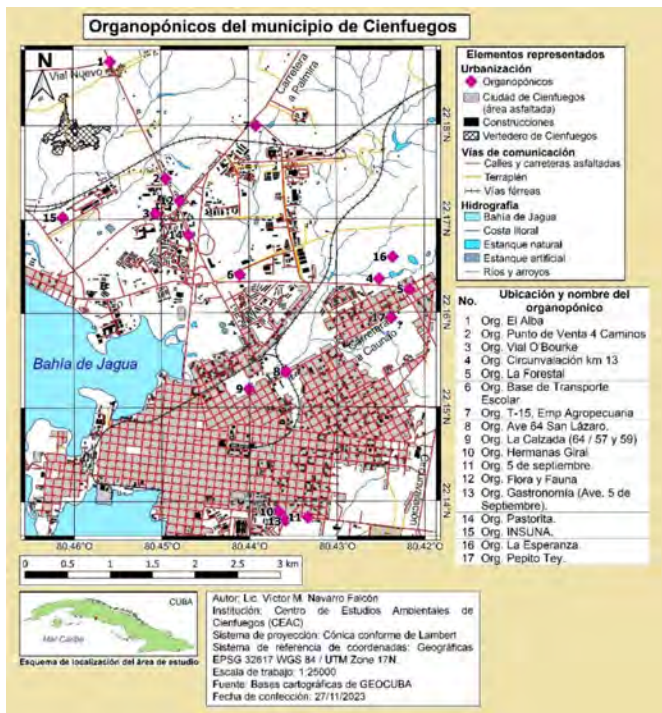


Figura 1. Mapa con la ubicación de los organopónicos monitoreados de la ciudad de Cienfuegos

Muestreo de pescados

La captura de pescados se realizó en cinco sitios de la Bahía de Cienfuegos. En el mapa de la figura 2 se observan los sitios donde se realizó la pesca.



Figura 2. Mapa con los sitios de pesca en el marco de esta investigación. (1) Calicito, (2) Junco Sur, (3) Área frente a Fertilizantes, (4) Centro Lóbulo Norte y (5) Cayo Ocampo, en el Lóbulo sur.

Preparación de las muestras

Las muestras de vegetales se limpiaron, eliminando todo aquello que no formaba parte de ellas (terrones, piedras y otros materiales ajenos a las muestras). En el caso de los pescados, se filetearon, desechando la parte no comestible. Todas las muestras se pesaron y se anotó el peso fresco (PF) de cada una. Posteriormente, se secaron a 100 °C y se registró el peso seco (PS). Seguidamente, las muestras se molieron en un molino de ágata y se tamizaron por una malla 500 mm, las fracciones más finas se homogenizaron y se envasaron en recipientes de polietileno hasta un volumen de 70 mL, que representó una masa promedio de 54 g.

Medición espectrométrica de las muestras

La concentración de actividad de los radionúclidos emisores gamma K-40, I-131, Cs-134, Cs-137, Ra-226 (en equilibrio con Pb-214) y Am-241 se determinó por espectrometría gamma de alta resolución y bajo fondo con detector de alta pureza de germanio (HPGe) coaxial NGC 3019 de 31,5 % de eficiencia relativa y 1,84 keV de resolución para 1333 keV del Co-60. El software de trabajo es el Winner 6.0. La competencia del servicio de Mediciones Ambientales y de Muestras mediante el ensayo Espectrometría Gamma posee el reconocimiento por parte del Centro Nacional de Seguridad Nuclear desde el 30 de enero de 2015, el cual se registra con el número de reconocimiento CF14-S2(001)15.

Control de calidad de los resultados

Medición de los parámetros de control del sistema espectrométrico gamma

Se controló la estabilidad del funcionamiento del sistema espectrométrico gamma semanalmente, midiendo valores de energía, resolución y eficiencia para fuentes puntuales de Am-241 (59,54 keV), Cs-137 (661,66 keV) y Co-60 (1332,50 keV) y la tasa de conteos del fondo para todo el intervalo analítico. Los valores se llevaron a un gráfico de control y el sistema resultó estable durante el proceso de medición de las muestras.

Medición de Materiales de Referencia Certificados

Se determinó la concentración de actividades en los Materiales de Referencia Certificados (MRC) IAEA-373 (Pasto) e IAEA-330 (Espinaca) y en muestras del ensayo de aptitud IAEA-TEL-2014-04, convocado por la Agencia Internacional de la Energía Atómica para la red internacional de laboratorios dedicados a las mediciones de la radiactividad ambiental (ALMERA). Se compararon los valores medidos con los valores certificados y como conclusión se obtuvo que no existen diferencias significativas.

Resultados y discusión

En la tabla 1 se presentan los resultados de los promedios de las concentraciones de los radionúclidos emisores gamma medidos en los vegetales.

Tabla 1. Concentraciones de actividad de los radionúclidos en los vegetales cosechados en organopónicos de Cienfuegos.

Vegetal	PS/PF	K-40 (Bqkg ⁻¹)	I-131 (Bqkg ⁻¹)	Cs-134 (Bqkg ⁻¹)	Cs-137 (Bqkg ⁻¹)	Ra-226 (Bqkg ⁻¹)	Am-241 (Bqkg ⁻¹)
Acelga (<i>Beta vulgaris</i>)	0,11	1353 ± 85	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Ají (<i>Capsicum annum</i>)	0,078	782 ± 83	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Ajo Puerro (<i>Allium ampeloprasum</i>)	0,10	1275 ± 42	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Berenjena (<i>Solanum melongena</i>)	0,086	1052 ± 158	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Cebollino (<i>Allium schoenoprasum</i>)	0,12	849 ± 68	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Culantro (<i>Coriandrum sativum</i>)	0,036	872 ± 151	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Espinaca (<i>Spinacia oleracea</i>)	0,077	2960 ± 178	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Habichuela (<i>Phaseolus coccineus</i>)	0,13	710 ± 47	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	0,073	1911 ± 46	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	0,031	1357 ± 179	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Quimbombó (<i>Abelmoschus esculentus</i>)	0,11	1223 ± 103	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Remolacha (<i>Beta vulgaris</i>)	0,10	720 ± 58	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	0,069	1224 ± 92	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Zanahoria (<i>Daucus carota</i>)	0,12	895 ± 52	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Rábano (<i>Raphanus sativus</i>)	0,13	1393 ± 155	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48

Datos técnicos:

1. La incertidumbre (\pm) es expandida y se determinó multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura $k=2$, que define un intervalo con nivel de confianza de aproximadamente 95%.
2. La fecha de adquisición de los espectros, de análisis de los espectros y determinación de valores de concentración de actividad y su incertidumbre expandida fue en el período 27 de marzo hasta el 3 de mayo de 2023.
3. Los valores <, se corresponden a concentraciones por debajo del Límite de Detección del Método.

En la Tabla 2 se ofrecen los resultados de los promedios de las concentraciones de los radionúclidos emisores gamma medidos en los pescados y otros organismos marinos de consumo.

Tabla 2. Concentraciones de radionúclidos en pescados y otros organismos marinos de consumo provenientes de la bahía de Cienfuegos.

Pescados y organismos marinos de consumo	PS/PF	K-40 (Bqkg ⁻¹)	I-131 (Bqkg ⁻¹)	Cs-134 (Bqkg ⁻¹)	Cs-137 (Bqkg ⁻¹)	Ra-226 (Bqkg ⁻¹)	Am-241 (Bqkg ⁻¹)
Jaiba (<i>Callinectes sapidus</i>)	0,15	369 ± 38	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Chopa espina (<i>Lagodon rhomboides</i>)	0,25	381 ± 65	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Mojarra de ley (<i>Eucinostomus gula</i>)	0,20	528 ± 47	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Camarón blanco (<i>Penaeus schmitti</i>)	0,20	255 ± 28	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Corvina (<i>Micropogonias furnieri</i>)	0,19	381 ± 65	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Jorobado (<i>Selene vomer</i>)	0,13	348 ± 130	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Biajaiba (<i>Lutjanus synagris</i>)	0,20	543 ± 50	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Lisa (<i>Mugil cephalus</i>)	0,27	258 ± 56	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Casabillo (<i>Chloroscombrus chrysurus</i>)	0,39	255 ± 28	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Jiguagua (<i>Caranx hippos</i>)	0,13	258 ± 56	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Macabí (<i>Albula vulpes</i>)	0,23	650 ± 85	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Ronco amarillo (<i>Haemulon sciurus</i>)	0,20	441 ± 88	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48
Bocón (<i>Cetengraulis edentulus</i>)	0,25	336 ± 31	<0,61	<0,53	<0,64	<1,5	<0,48

Datos técnicos:

1. La incertidumbre (\pm) es expandida y se determinó multiplicando la incertidumbre estándar combinada por el factor de cobertura $k=2$, que define un intervalo con nivel de confianza de aproximadamente 95%.
2. La fecha de adquisición de los espectros, de análisis de los espectros y determinación de valores de concentración de actividad y su incertidumbre expandida fue en el período noviembre a diciembre de 2021.
3. Los valores <, se corresponden a concentraciones por debajo del Límite de Detección del Método.

Como se puede apreciar en las tablas anteriores (1 y 2), las concentraciones de los radionúclidos antropogénicos (I - 131, Cs - 134; Cs - 137, Am - 241) están por debajo del Límite de Detección del Método, lo que demuestra que los alimentos monitoreados están libres de este tipo de contaminantes. Estos valores se corresponden con las concentraciones de origen global presentes en nuestra posición geográfica [6, 7].

En todos los alimentos monitoreados (hortalizas, pescados y otros organismos marinos de consumo), los valores medidos de las actividades de los radionúclidos artificiales emisores gamma están muy por debajo de los nive-

les de referencia para estos radionúclidos establecidos para los alimentos en la normativa cubana NC 1207:17, lo que evidencia que estos alimentos deben considerarse inocuos en relación con estos radionúclidos.

Con respecto al K-40 y al Ra - 226, son de origen natural y no existen por lo tanto limitaciones para las concentraciones en los alimentos. Los valores encontrados de K - 40 en esta investigación se corresponden con las concentraciones de este radionúclido reportadas en los alimentos y no significan un peligro para la salud porque el organismo humano regula la concentración interna de este elemento [5]. A partir de las concentraciones de K-40 es posible determinar las concentraciones máxicas de este nutriente, teniendo en cuenta que 31 Bq de actividad de K-40 corresponden a 1 g de potasio natural, siendo entonces la espectrometría gamma una técnica expedita para determinar las concentraciones de potasio en los alimentos. Las concentraciones de actividad de Ra - 226 en los alimentos monitoreados, estuvieron por debajo del umbral de detección, lo que evidencia que estos alimentos no concentran a este radionúclido.

Los valores de actividad determinados para los radionúclidos emisores gamma medidos en los alimentos monitoreados enriquecen la base de datos existentes y demuestran que los alimentos monitoreados están libres de contaminación radiactiva y son inocuos radiológicamente.

Conclusiones

- Las concentraciones de radionúclidos (Ra -226, K-40, I-131, Cs -134; Cs -137 y Am - 241) determinadas en organismos marinos de consumo provenientes de la bahía de Cienfuegos, monitoreados en diciembre de 2021 y en las hortalizas cosechadas en organopónicos de la ciudad de Cienfuegos en el mes de febrero de 2023, enriquecen las bases de datos existentes relacionadas con la radiactividad en los productos alimenticios.
- Los valores de las actividades presentes en los alimentos monitoreados están muy por debajo de los valores de referencia establecidos en la normativa cubana, lo que demuestra la inocuidad de estos alimentos desde el punto de vista radiológico.

Referencias

- [1]. Vigilancia Radiológica de Alimentos y Agua. La Habana, 2002. ISBN 959-73614-7.
- [2]. FERNÁNDEZ I, CAPOTE E, CARRAZANA J, MARTÍNEZ N, DERIVET M. Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones: 20 años al servicio de la inocuidad alimentaria. Nucleus. 2022; (70): 6-9.
- [3]. International Atomic Energy Agency (IAEA). International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series 115. Vienna: IAEA, 1996.
- [4]. Norma Cubana. Norma general para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos NC 1205: 2017.
- [5]. United Nations. Exposición a fuentes de radiación natural, pp. 125 - 126. In: Sources and effects of ionizing radiation. Volume I. ISBN 92-1-142238-8. United States, 2000.
- [6]. SIBELLO R, ALONSO C, DIAZ M, CARTAS H. Caracterización radiactiva de los suelos y productos agrícolas de la región Centro Sur de Cuba. Nucleus. 2002; (31): 28-34.
- [7]. LORÍA L, JIMÉNEZ R, BADILLA M. Evaluación Radiológica de Alimentos y de Agua de Consumo Humano en Costa Rica. Agro-nomía Costarricense. 2007; 31(1): 53-59.

Recibido: 18 de septiembre de 2024

Aceptado: 31 de octubre de 2024

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

CRedit / Conceptualización: Rita Y. Sibello Hernández. **Curación de datos:** Rita Y. Sibello Hernández, Yusdiany Pereira Cuellar, Héctor A. Cartas Águila. **Análisis formal:** Rita Y. Sibello Hernández. **Supervisión:** Rita Y. Sibello Hernández. **Validación:** Rita Y. Sibello Hernández. **Investigación:** Rita Y. Sibello Hernández. **Metodología:** Rita Y. Sibello Hernández Rita Y. Sibello Hernández. **Escritura – borrador original:** Rita Y. Sibello Hernández. **Redacción – revisión y edición:** Rita Y. Sibello Hernández, Yusdiany Pereira Cuellar, Héctor A. Cartas Águila.

Verificación del método de determinación de plomo en aguas naturales por espectrofotometría de absorción atómica acoplado a horno de grafito

 Luis Manuel Roque Albelo,  Yoelvis Bolaños Álvarez,  Gleisy Pérez Avilleira,

 Ernesto Alejandro Gálvez Acevedo

Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC). Carretera a Castillo de Jagua, 1,5 km Ciudad Nuclear. CP59350 Cienfuegos, Cuba.

lralbelo@ceac.cu ; yoelvis@ceac.cu

Resumen

El presente estudio ha estado dirigido a la verificación del método de determinación de plomo en muestras de aguas naturales (excepto agua de mar), a través de la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica acoplado a Horno de Grafito. Para tal fin, fueron evaluados los parámetros linealidad, límites de detección y de cuantificación, precisión y veracidad, según expone la norma NC TS 368:2010, Guía para la validación de métodos de ensayos químicos para alimentos y la Guía Eurachem: La adecuación al uso de los métodos analíticos – Una Guía de laboratorio para la validación de métodos y temas relacionados, comprobándose que son adecuados para la determinación de este analito, lo que indica que el método es capaz de cuantificar concentraciones de plomo en aguas naturales (excepto agua de mar) que se encuentren inferiores a los límites máximos permisibles para este analito según establecen las normativas regulatorias.

Palabras clave: espectroscopia de absorción; plomo; grafito; verificación; recursos hídricos; normas.

Verification of the lead determination method in natural water by atomic absorption spectrophotometry coupled to graphite furnace

Abstract

The present study has been aimed at the verification of the method for the determination of lead in natural water samples (except seawater), through the technique of Atomic Absorption Spectrophotometry coupled to Graphite Furnace. For this purpose, the parameters linearity, limits of detection and quantification, precision and trueness were evaluated, according to NC TS 368:2010, Guide for the validation of chemical test methods for food and the Eurachem Guide: The suitability for use of analytical methods - A laboratory guide for the validation of methods and related topics, and found to be suitable for the determination of this analyte, indicating that the method is capable of quantifying lead concentrations in natural waters (except seawater) that are below the maximum permissible limits for this analyte as established by regulatory standards.

Key words: absorption spectroscopy; lead; graphite; verification; water resources; standards.

Introducción

El plomo es un metal pesado con la capacidad de bioacumularse y está caracterizado por ocasionar efectos tóxicos sobre diferentes órganos del cuerpo humano. Este se encuentra tanto en el aire, en las plantas, en el suelo y en todo tipo de aguas de origen natural [1].

La contaminación de las aguas por metales pesados se ha visto en aumento en los últimos 50 años [1], esto ha llevado a que diferentes agencias internacionales establezcan valores de concentración máxima permisible para elementos como el plomo, y que sirvan de herramienta en la gestión del control de calidad de las

aguas de consumo humano. Para ello, nuestro país ha dispuesto la Norma Cubana NC 827:2010 *Agua Potable - Requisitos Sanitarios*, donde establece un máximo de 0,05 mg de Pb por cada Litro de agua potable [2] y como dato auxiliar los 0,01 mg/L de Pb admisibles, reportados por el Codex Alimentarius CXC 56-2004 *Código de Prácticas Para la Prevención y Reducción de la Presencia de Plomo en los Alimentos* [3].

El Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC) cuenta con la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica acoplada a Horno de Grafito, la cual se emplea para dar cumplimiento al objetivo de este trabajo que es la verificación del método de determinación

de plomo en aguas naturales (excepto agua de mar), la evaluación de cada parámetro de verificación se hará con el apoyo de la Norma Cubana NC TS 368:2010 Guía para la validación de métodos de ensayos químicos para alimentos y la Guía Eurachem: La adecuación al uso de los métodos analíticos—Una Guía de laboratorio para la validación de métodos y temas relacionados [4, 5].

Materiales y métodos

El presente estudio fue realizado en las instalaciones del Laboratorio de Ensayos Ambientales (LEA), perteneciente al Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC), el cual posee el equipamiento y condiciones óptimas necesarias para llevar a cabo dicho estudio.

Equipamiento utilizado. Fundamento del método

Para la determinación de plomo se utilizará un Espectrofotómetro de Absorción Atómica novAA 400P (Analytik Jena, Alemania) equipado con un software (ASpect LS, versión 1.5.4.0), sistema de horno de grafito y automuestreador.

Esta técnica comprende el estudio de absorción de energía radiante (generalmente en las regiones ultravioletas y visible) por parte de un elemento en estado atómico. En esta modalidad de horno de grafito, el elemento que se determina es reducido a su estado elemental, pasando previamente por etapas de secado, pirólisis y atomización dentro de un tubo de grafito y posteriormente es sometido a un haz de radiación con una longitud de onda que es específica de cada elemento, procedente esta de una lámpara de cátodo hueco. Se mide la atenuación de la intensidad de la energía radiante como resultado de la absorción, siendo la cantidad de radiación absorbida proporcional a la cantidad de átomos del elemento presente. Este procedimiento de análisis instrumental permite bajar los límites de detección al rango de partes por billón (ppb) con una instrumentación relativamente sencilla y sin los esfuerzos y pérdidas de tiempo que conllevan las técnicas de extracción previa [6].

Limpieza de la cristalería

Todo el material de laboratorio empleado para el análisis fue descontaminado previamente. Para ello, se sumergieron en una solución de HNO_3 al 10 % (v/v) a temperatura ambiente durante 24 horas y posteriormente se enjuagaron tres veces con agua ultrapura obtenida de un sistema E-Pure™ modelo D4642-33 (Barnstead) con resistividad de $18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ a 25°C .

Reactivos y soluciones

El blanco de calibración fue preparado utilizando HNO_3 grado suprapuro al 65 % (Merck) y agua ultrapura tipo 1 procedente del sistema purificador de agua E-Pure™. Los estándares de trabajo (10; 50 y $100 \mu\text{g/L}$ de Pb) empleados para la calibración se prepararon a partir de una solución patrón de Pb (1000 mg/L trazable a NIST en HNO_3 0,5 mol/L) (Merck Certipur®). Se empleó

una disolución de $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ al 1 % como modificador químico de matriz para el análisis con horno de grafito.

Condiciones de medición aplicadas al método

Durante la verificación, se emplearon las condiciones analíticas y programa de temperaturas propuestos por el Software (tablas 1 y 2).

Tabla 1. Condiciones analíticas del espectrofotómetro de absorción atómica

Lámpara	Lámpara de cátodo hueco de Pb
Tipo de tubo	Tubo de grafito con cubierta pirolítica y con plataforma
Longitud de onda	283,3 nm
Ancho de la ranura	0,8 nm
Corriente de lámpara	2 mA
Corrección de background	Lámpara de deuterio
Modo de medida	Área del pico

Tabla 2. Programa de temperaturas empleado durante la medición

Etapas	Temperatura final ($^\circ\text{C}$)	Tiempo de Rampa ($^\circ\text{C/s}$)	Tiempo de retención (s)
Inyección	-	-	-
Secado 1	80	6	20
Secado 2	90	3	20
Secado 3	110	5	10
Pirólisis	350	50	20
Pirólisis	800	300	10
AZ'	800	0	6
Atomización	1900	1400	4
Limpieza	2450	500	4

Para la curva de calibración, se empleó un rango de trabajo de 5 a $100 \mu\text{g/L}$ de Pb, realizando tres réplicas y utilizando 10 niveles de concentración conocidos (5; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 100) $\mu\text{g/L}$ de Pb, preparados por el equipo a partir de los estándares de trabajo.

Antes de considerar adecuados los datos experimentales se comprobó su idoneidad para descartar cualquier valor anómalo. Para ello se implementó el Test de Grubbs donde se comparan los estadígrafos $G_{\text{experimental}}$ y $G_{\text{crítico}}$ siguiendo las siguientes hipótesis [7].

$$H_0: \text{No existen valores burdos, } G_{\text{exp}} < G_{\text{crítico}}$$

$$H_1: \text{Existen valores burdos, } G_{\text{exp}} \geq G_{\text{crítico}}$$

Linealidad

Para evaluar la linealidad de los datos se tuvieron en cuenta varios aspectos como el coeficiente de correlación lineal el cual se complementó con un análisis t de Student (n-1 grados de libertad y 95 % de confianza) para comprobar su significación estadística, teniendo que si el valor de $t_{\text{exp}} > t_{\text{crítica}}$, se rechaza H_0 indicando así la existencia de correlación entre la concentración y la absorbancia [8, 9].

$$H_0: \text{No existe correlación entre la concentración y la absorbancia.}$$

$$H_1: \text{Existe correlación entre la concentración y la absorbancia.}$$

Se realiza el test de Falta de Ajuste (*LOF* por sus siglas en inglés) y un análisis de los residuales para proporcionar mayor veracidad al análisis de linealidad. El test de *LOF* compara el estadígrafo $F_{\text{calculado}}$ con el valor $F_{\text{crítico}}$ para $c-2$ y $n-c$ grados de libertad con un nivel de confianza del 95 %, donde n es el número total de observaciones y c es el número de niveles de concentración utilizados en la curva de calibración [10].

Si $F_{\text{calculado}} \leq F_{\text{crítico}}$ entonces se acepta la H_0 concluyendo que se trata de un modelo lineal.

H_0 : El modelo es lineal H_1 : El modelo no es lineal

- Intervalos de confianza de la pendiente y el intercepto

Los intervalos de confianza para la pendiente y el intercepto serán $b \pm t \cdot S_b$ y $a \pm t \cdot S_a$, respectivamente, donde S_b y S_a son las desviaciones estándar para los estimados de la pendiente e intercepto y t es el valor *t*-Student para $n-2$ grados de libertad y nivel de confianza del 95 %.

- Significación estadística de la pendiente

H_0 : pendiente = 0 H_1 : pendiente \neq 0

Si $t_{\text{exp}} > t_{\text{crítica}}$ (para $n-1$ y 95 % de confianza) se rechaza la H_0 y se considera que la pendiente es significativamente diferente de cero.

- Significación estadística del intercepto

H_0 : intercepto = 0 H_1 : intercepto \neq 0

Si $t_{\text{exp}} > t_{\text{crítica}}$ (para $n-1$ y 95 % de confianza) se rechaza H_0 y como criterio se establece que el intercepto es significativamente diferente de cero.

Límites de Detección y Cuantificación

La determinación del límite de detección (*LD*) y el límite de cuantificación (*LC*) se realizó analizando 10 muestras de blanco que fueron preparados como se describe en el epígrafe "Reactivos y Soluciones".

$$LD = 3 * SD/m \qquad LC = 10 * SD/m$$

donde:

SD: desviación estándar

m: pendiente

Precisión

El análisis de repetibilidad del método se realizó mediante la lectura de 3 soluciones estándar de plomo a diferentes concentraciones (bajo, medio, alto), preparadas por el equipo. Se realizaron diez réplicas de cada punto en un mismo día empleando un solo analista. Se determinó la media de las concentraciones, la desviación estándar y el correspondiente coeficiente de variación de repetibilidad (RSD_r). Si el valor de RSD_r resulta inferior que los rangos permisibles para el coeficiente de variación teórico según la ecuación de Horwitz ($PRSD_r$), el método se considera repetible [11].

La precisión intermedia se analizó de manera similar a la repetibilidad, pero esta vez el analista preparó manualmente cinco réplicas de cada punto (bajo, medio, alto) y fueron medidas en 2 días diferentes para lograr la mayor variación en el método. Se calculó la desviación

estándar entre días (*S* entre días) y el coeficiente de variación entre días (RSD_R entre días), así como el valor de $PRSD_R$. Si el valor de RSD_R entre días resulta inferior a los rangos permisibles según Horwitz, se considera que el método es preciso [11].

Veracidad

Para analizar la veracidad del método se tomaron como referencia los valores de concentración obtenidos de la medición de 3 soluciones estándar interno de Pb con los que se determinó el porcentaje de recuperación (*R* %) en cada punto [5]. Los valores de *R* % se compararon con el 100 % utilizando una prueba *t*-Student para $n-1$ grados de libertad y 95 % de nivel de confianza. Si resulta $t_{\text{exp}} \leq t_{\text{crítica}}$, se acepta H_0 y se considera que no existen diferencias significativas entre la recuperación media y el 100 %, lo que demuestra la adecuada veracidad del método [12, 13].

H_0 : *R* = 100 %

H_1 : *R* \neq 100 %

Resultados y discusión

En la figura 1 se muestra la curva de calibración correspondiente para el rango de trabajo establecido (5 – 100 $\mu\text{g/L}$). El coeficiente de correlación lineal para las tres curvas de calibración resultó mayor que 0,99, indicando que existe una buena correlación entre las variables analizadas según informa la prueba *t* empleada ($t_{\text{exp}} > t_{\text{crítica}}$) [14], los valores obtenidos se representan en la tabla 3.

El test de *LOF* arrojó que el valor $F_{\text{calculado}} < F_{\text{crítico}}$, demostrando así que el modelo lineal se ajusta perfectamente a los datos experimentales.

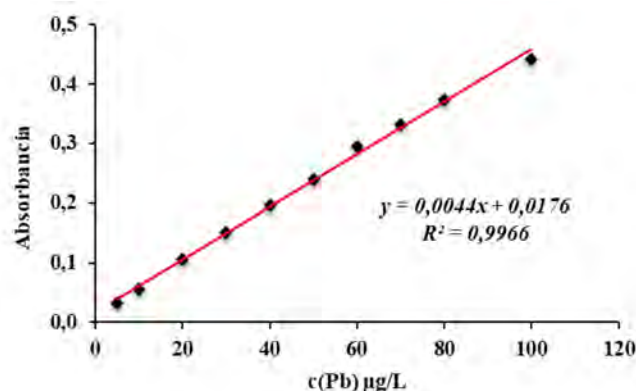


Figura 1. Curva de calibración para rango de trabajo establecido

La pendiente resultó significativamente diferente de cero para un 95 % de confianza y 29 grados de libertad al ser $t_{\text{exp}} > t_{\text{crítica}}$. Sin embargo, la significación estadística para el intercepto demostró que el mismo es igual a cero, incluyendo así este valor en su intervalo de confianza.

Para el *LD* se obtuvo un valor de 0,77 $\mu\text{g/L}$ y para el *LC* el valor calculado fue de 2,57 $\mu\text{g/L}$. Al encontrarse estos valores inferiores al primer punto de la curva de calibración, nos permite detectar y cuantificar correc-

tamente niveles de Pb inferiores a los valores máximos permisibles expuestos en las normas regulatorias.

Tabla 3. Valores obtenidos para comprobación de la linealidad

Parámetros	Valores obtenidos	Criterio
Coefficiente de correlación	0,9919	$R > 0,99$
Prueba LOF	$F_{exp} = 0,6478$ $F_{critico} = 2,4470$	$F_{exp} < F_{critico}$
Intervalo de confianza del intercepto	0,084	Incluye al cero
Intervalo de confianza de la pendiente	$0,0044 \pm 0,003$	No incluye al cero

Análisis de la Repetibilidad y Reproducibilidad del método

Los resultados del análisis de estos parámetros se muestran en la tabla 4. Todos los valores de coeficientes de variación obtenidos en la práctica para repetibilidad (RSD_r) como para precisión intermedia (RSD_R), se encuentran inferiores a los rangos permisibles para los coeficientes teóricos según Horwitz ($PRSD_R$). Por tal motivo se considera que la cuantificación de Pb es repetible y presenta una adecuada precisión intermedia bajo las condiciones de los ensayos realizados.

Tabla 4. Resultados del análisis de Repetibilidad y Precisión Intermedia

		Repetibilidad			
c(Pb) µg/L		$PRSD_R$	0,2* $PRSD_R$	0,3* $PRSD_R$	RSD_r
Nivel bajo	10	32,00	6,40	9,60	3,91
Nivel medio	50	25,12	5,02	7,53	0,72
Nivel alto	80	23,40	4,68	7,02	1,22
		Precisión Intermedia			
c(Pb) µg/L		$PRSD_R$	0,2* $PRSD_R$	RSD_R	
Nivel bajo	10	32,00	6,40	5,69	
Nivel medio	50	25,11	5,02	1,01	
Nivel alto	80	23,40	4,68	1,11	

Veracidad

El análisis estadístico de este parámetro demuestra que el valor de t_{exp} es inferior al valor de $t_{critica}$ para un nivel de confianza del 95 % y $n - 1$ grados de libertad, lo que sugiere que la recuperación no difiere significativamente del 100 %, según la respectiva prueba de hipótesis, indicando así la adecuada veracidad del método.

Por otro lado, la figura 2 muestra un gráfico de recobrado con las concentraciones de los tres estándares internos empleados para evaluar este parámetro, los mismos se muestran dentro del rango de por ciento de recobrado establecido para las concentraciones a las que se trabaja [11].

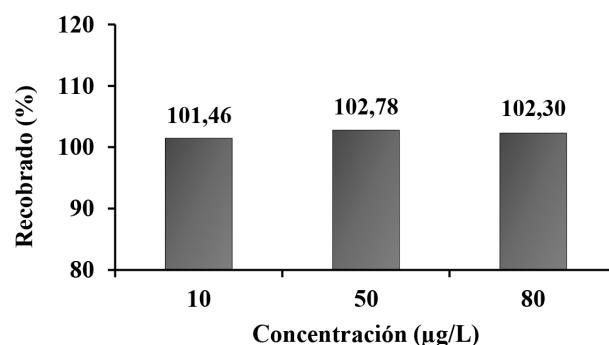


Figura 2. Gráfico de recobrado para estándares internos

Evaluación del plan de verificación del método

El método verificado presenta una adecuada linealidad, comprobada por el test de LOF y valores de R superiores a 0,99. Un LD y LC inferiores al primer punto de la curva de calibración, demuestran la sensibilidad del método para cuantificar los niveles de concentración del analito. Se considera repetible y con una adecuada precisión intermedia con valores de $RSD_{(r \text{ o } R)}$ inferiores a los rangos permisibles para $PRSD_R$. El $R\%$ no difiere significativamente del 100 %, indicando la veracidad del método. Se cumplen todos los parámetros del plan de verificación y queda establecido un método que permite monitorear el control de calidad de aguas naturales (excepto agua de mar) respecto a la contaminación por Pb, cumpliendo con los valores máximos permisibles normados.

Conclusiones

Al evaluar los parámetros de linealidad, LD, LC, precisión y veracidad, se puede afirmar que el presente método es capaz de cuantificar y discernir concentraciones de plomo en aguas naturales (excepto agua de mar), cumpliendo con los requisitos establecidos en la Norma Cubana NC 827:2010.

Referencias bibliográficas

- [1]. RUBIO C, GUTIÉRREZ AJ, MARTÍN IZQUIERDO RE, et. al. El plomo como contaminante alimentario. Rev. Toxicol. Asoc. Española Toxicol. 2004; 21(2-3): 72-80.
- [2]. Oficina Nacional de Normalización (ONN). Agua Potable - Requisitos Sanitarios. Norma Cubana (NC) 827:2010. 1ra Edición. La Habana, diciembre 2010.
- [3]. Organización Mundial de la Salud (OMS) /Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Código de Prácticas Para la Prevención y Reducción de la Presencia de Plomo en los Alimentos. CODEX ALIMENTARIUS. CAC/RCP 56-2004. 2004. Disponible en: file:///C:/Users/miriam/Downloads/CXP_056s.pdf
- [4]. Oficina Nacional de Normalización (ONN). Guía para la validación de métodos de ensayos químicos para alimentos norma cubana (NC) TS 368: 2010. 1ra Edición. La Habana, mayo 2010.
- [5]. MORILLAS PP, et. al. Guía Eurachem: la adecuación al uso de los métodos analíticos - Una guía de laboratorio para la validación de métodos y temas relacionados Eurolab España, 2016. 1a ed.

- [6]. MAÑAY N, CLAVIJO G & DÍAZ L. Absorción atómica con horno de grafito. En: IBEROARSEN: Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos. pp. 79-92. CYTED, 2009.
- [7]. HARVEY D. Modern analytical chemistry. 1st ed. vol. 3. 1993. doi: 10.1016/c2013-0-01305-9.
- [8]. MILLER JN. & MILLER JC. Estadística y quimiometría para química analítica. 4ta Ed. Madrid: Pearson Educación. S.A., 2002.
- [9]. SU JQ. and WEI L J. A lack-of-fit test for the mean function in a generalized linear model. J. Am. Stat. Assoc. 1991; 86(414): 420-426. doi: 10.1080/01621459.1991.10475059.
- [10]. KUTNER MH. Applied linear statistical models. 5ta ed. New York: McGraw-Hill/Irwin, 2005. doi: 10.1080/00224065.1997.11979760.
- [11]. GUSTAVO GONZÁLEZ A. & ÁNGELES HERRADOR M. A practical guide to analytical method validation, including measurement uncertainty and accuracy profiles. TrAC Trends Anal. Chem. 2007; 26(3): 227-238. doi: 10.1016/j.trac.2007.01.009.
- [12]. RODRÍGUEZ A, SILVA P & REYES M. Determinación de sulfato por el método turbidimétrico en aguas y aguas residuales. Validación Del Método. Rev. Cuba. Química. 2010; vol. XXII(3): 39-44.
- [13]. LÓPEZ VEGA ME, RAMÍREZ GONZÁLEZ S & MÁS RAMOS A. Internal verification of a method for the determination of arsenic in waters through its. Rev. Cuba. Química. 2023; 35(3): 425-442.
- [14]. Instituto de Salud Pública de Chile. Validación de métodos y determinación de la incertidumbre de la medición: aspectos generales sobre la validación de métodos. Santiago, 2010.

Recibido: 18 de septiembre de 2024

Aceptado: 31 de octubre de 2024

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

CRedit / Conceptualización: Yoelvis Bolaños Álvarez, Luis Manuel Roque Albelo. **Fuentes:** Yoelvis Bolaños Álvarez, Luis Manuel Roque Albelo, Gleisy Pérez Avilleira, Ernesto Alejandro Gálvez Acevedo. **Curación de datos:** Yoelvis Bolaños Álvarez, Luis Manuel Roque Albelo. **Software:** Yoelvis Bolaños Álvarez, Luis Manuel Roque Albelo. **Análisis formal:** Yoelvis Bolaños Álvarez, Luis Manuel Roque Albelo. **Supervisión:** Yoelvis Bolaños Álvarez. **Adquisición de fondos:** Yoelvis Bolaños Álvarez. **Validación:** Yoelvis Bolaños Álvarez, Luis Manuel Roque Albelo. **Investigación:** Yoelvis Bolaños Álvarez, Luis Manuel Roque Albelo, Gleisy Pérez Avilleira, Ernesto Alejandro Gálvez Acevedo. **Visualización:** Yoelvis Bolaños Álvarez, Luis Manuel Roque Albelo. **Metodología:** Yoelvis Bolaños Álvarez, Luis Manuel Roque Albelo. **Administración de proyecto:** Yoelvis Bolaños Álvarez. **Escritura – borrador original:** Yoelvis Bolaños Álvarez, Luis Manuel Roque Albelo, Gleisy Pérez Avilleira, Ernesto Alejandro Gálvez Acevedo. **Redacción – revisión y edición:** Yoelvis Bolaños Álvarez, Luis Manuel Roque Albelo, Gleisy Pérez Avilleira, Ernesto Alejandro Gálvez Acevedo.

Revistas certificadas

como Publicaciones Seriadadas Científico–Tecnológicas

2024

Cuba & Caña.....	AZCUBA
Anuario del Centro de Estudios Martianos	CE
Acta Botánica Cubana	CITMA
Anuario L/L. Estudios Lingüísticos	CITMA
Anuario L/L. Estudios Literarios	CITMA
Avances.....	CITMA
Avanzada Científica	CITMA
Biotecnología Aplicada	CITMA
Boletín Científico Técnico INIMET	CITMA
Boletín del Archivo Nacional	CITMA
Ciencia en su PC.....	CITMA
Ciencias de la Información	CITMA
Ciencias de la Tierra y el Espacio	CITMA
Ciencias Holguín	CITMA
Cubazoo	CITMA
Granma Ciencia	CITMA
Hombre, Ciencia y Tecnología	CITMA
Infociencia.....	CITMA
Innovación Tecnológica	CITMA
Isla, Ciencia y Tecnología	CITMA
Memorias de Geoinfo.....	CITMA
Normalización.....	CITMA
Nucleus	CITMA
Revista Cubana de Ciencias Sociales	CITMA
Revista Cubana de Filosofía	CITMA
Revista Cubana de Meteorología	CITMA
Serie Oceanológica.....	CITMA
Temas de Economía Mundial	CITMA
VacciMonitor	CITMA
Cuba: Investigación Económica.....	MEP
Arquitectura y Urbanismo.....	MES
Centro Agrícola	MES
Cuban Journal of Agricultural Science.....	MES
Cultivos Tropicales	MES
Ingeniería Energética	MES
Ingeniería Industrial	MES
Investigación Operacional	MES
Islas	MES

Revistas certificadas

Minería y Geología	MES	Revista Forestal Baracoa.....	MINAG
Novedades en Población	MES	Investigaciones Medicoquirúrgicas	MINAG
Pastos y Forrajes	MES	Ciencia y Tecnología de Alimentos.....	MINAL
Pedagogía Universitaria	MES	Cubaenvases	MINAL
Retos Turísticos	MES	Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras	MINAL
Revista CENIC Ciencias Biológicas	MES	ICIDCA. Sobre los derivados de la caña de azúcar	MINAZ
Revista CENIC Ciencias Químicas	MES	INFOMIN	MINBAS
Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias	MES	Anuario de Investigaciones Culturales.....	MINCULT
Revista Cubana de Ciencia Agrícola	MES	Bibliotecas.....	MINCULT
Revista Cubana de Educación Superior	MES	Catauro.....	MINCULT
Revista Cubana de Química	MES	Clave.....	MINCULT
Ingeniería Mecánica	MES	Siga La Marcha.....	MINCULT
Revista de Protección Vegetal	MES	Temas.....	MINCULT
Revista de Salud Animal	MES	Órbita Científica	MINED
Revista del Jardín Botánico Nacional	MES	Varona.....	MINED
Santiago	MES	Pedagogía Profesional	MINED
Tecnología Química	MES	Revista IPLAC	MINED
Universidad de La Habana	MES	Luz	MINED
Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones ...	MES	Transformación.....	MINED
Universidad y Sociedad.....	MES	Maestro y Sociedad	MINED
Centro Azúcar	MES	Pedagogía y Sociedad.....	MINED
Ingeniería Hidráulica y Ambiental	MES	Revista Cubana de Medicina Militar	MINFAR
Biotecnología Vegetal	MES	Investigaciones Medicoquirúrgicas	MININT
Economía y Desarrollo	MES	Anuario del Centro de Investigaciones Jurídicas	MINJUS
Cofin Habana	MES	ACIMED	MINSAP
Anuario de la Facultad de Ciencias Económicas		Acta Médica del Centro.....	MINSAP
y Empresariales	MES	Anuario Científico CECMED	MINSAP
Revista de Producción Animal.....	MES	Archivo Médico de Camagüey.....	MINSAP
Retos de la Dirección	MES	Correo Científico Médico.....	MINSAP
Revista Cubana de Ingeniería	MES	Educación Médica Superior.....	MINSAP
Congreso Universidad.....	MES	Folia Dermatológica Cubana	MINSAP
Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias	MES	Gaceta Médica.....	MINSAP
Estudios de Desarrollo social: Cuba y América Latina	MES	Humanidades Médicas.....	MINSAP
Revista de Arquitectura e Ingeniería.....	MICONS	Medi Ciego	MINSAP
Agrotecnia de Cuba	MINAG	Medicentro Electrónica	MINSAP
Café Cacao	MINAG	Medisan.....	MINSAP
Ciencia y Tecnología Ganadera.....	MINAG	MEDISUR	MINSAP
Citrifrut.....	MINAG	Panorama. Cuba y Salud	MINSAP
Fitosanidad.....	MINAG	Revista del Hospital Psiquiátrico de La Habana	MINSAP
Revista Computarizada de Producción Porcina.....	MINAG	Revista Cubana de Farmacia.....	MINSAP
Revista Cubana de Ciencia Avícola	MINAG	Revista Cubana de Anestesiología	
Revista Cubana del Arroz	MINAG	y Reanimación.....	MINSAP

Revista Cubana de Angiología y Cirugía Vasular	MINSAP	Revista Cubana de Medicina Física y Rehabilitación	MINSAP
Revista Cubana de Cirugía	MINSAP	Acuacuba	MIP
Revista Cubana de Endocrinología	MINSAP	Transporte, Desarrollo y Medio Ambiente	MITRANS
Revista Cubana de Enfermería	MINSAP	Estudio	UJC
Revista Cubana de Estomatología	MINSAP		
Revista Cubana de Genética Comunitaria	MINSAP		
Revista Cubana de Hematología, Inmunología y Medicina Transfusional	MINSAP		
Revista Cubana de Higiene y Epidemiología	MINSAP		
Revista Cubana de Informática Médica	MINSAP		
Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas	MINSAP		
Revista Cubana de Medicina	MINSAP		
Revista Cubana de Medicina General Integral	MINSAP		
Revista Cubana de Medicina Tropical	MINSAP		
Revista Cubana de Obstetricia y Ginecología	MINSAP		
Revista Cubana de Oftalmología	MINSAP		
Revista Cubana de Ortopedia y Traumatología	MINSAP		
Revista Cubana de Pediatría	MINSAP		
Revista Cubana de Plantas Medicinales	MINSAP		
Revista Cubana de Reumatología	MINSAP		
Revista Cubana de Salud Pública	MINSAP		
Revista Cubana de Salud y Trabajo	MINSAP		
Revista de Ciencias Médicas de La Habana	MINSAP		
Revista de Ciencias Médicas de Pinar del Río	MINSAP		
Revista de Información Científica	MINSAP		
Revista Electrónica "Dr. Zoilo E. Marinello Vidaurreta"	MINSAP		
Revista Habanera de Ciencias Médicas	MINSAP		
Revista Médica Electrónica	MINSAP		
Revista Cubana de Cardiología y Cirugía Cardiovascular	MINSAP		
Finlay	MINSAP		
Edumecentro	MINSAP		
CorSalud	MINSAP		
Revista Cubana de Ciencias Informáticas	MINSAP		
Multimed	MINSAP		
Revista Cubana de Alimentación y Nutrición	MINSAP		
Revista Cubana de Neurología y Neurocirugía	MINSAP		

Instrucciones a los AUTORES para publicar en nucleus

Para la redacción de los manuscritos a publicar en las secciones de **Ciencias Nucleares e Innovación Tecnológica**

- Los artículos originales deben tener una extensión máxima de 10 cuartillas (a una columna) incluidas tablas (un máximo de 5) e ilustraciones (un máximo de 5). Se enviarán por correo electrónico, en Word y en Arial 12 a 1,5 espacios, o entregar en la propia redacción de la revista en soporte electrónico. El total de líneas por páginas es 30 como máximo.
- Los artículos tendrán el siguiente orden: Resumen (español e inglés), Introducción, Materiales y métodos, Resultados, Discusión, Conclusiones, Recomendaciones (opcional), Agradecimientos (opcional), Referencias bibliográficas. Estas secciones deben estar bien definidas, aunque no necesariamente con subtítulos. No se escribirá punto al final de los subtítulos de las diferentes secciones.
- Cada trabajo deberá acompañarse de una carta firmada por el autor correspondiente, donde se declare que no existe **Conflicto de Intereses** entre los autores y además donde se confirme que dicho trabajo no se ha enviado a otra publicación con anterioridad.
- Los artículos están sujetos a arbitraje y a la aprobación del Consejo Editorial.
- Las contribuciones a la Revista se divulgan sin costo alguno para los autores. Una vez aceptados para su aprobación, los derechos de reproducción (copyright) son propiedad de la casa editorial.

Autor (es): Especificar nombres y dos apellidos así como la institución de procedencia.

Título: No debe exceder de 120 letras, o 20 palabras, ni contener abreviaturas, fórmulas químicas, ni nombres patentados (en lugar de genéricos). Como caso excepcional se aceptará la inclusión de siglas de uso común y generalizado en la literatura científico-técnica internacional. El título debe aparecer en español e inglés.

Resumen: No debe exceder de 250 palabras, ni contener siglas, abreviaturas ni referencias bibliográficas. Como caso excepcional se aceptará la inclusión de siglas de uso común y generalizado en la literatura científico-técnica internacional. Debe indicar los objetivos principales y alcance de la investigación, describir los métodos empleados, resumir los resultados y enunciar las conclusiones principales. Debe aparecer escrito en estilo impersonal, en pretérito, en español e inglés.

Se reflejará el contenido del documento a partir de 3 a 10 palabras claves al pie del resumen y en orden de importancia. Se escribirán en español, al pie del resumen en español y en inglés, al pie del resumen en idioma inglés. Por su parte el INIS insertará los descriptores correspondientes a la indización de cada trabajo.

ORCID: (código de identificación única para los investigadores): Representa una identificación inequívoca de un autor de una publicación. Este código es gratuito y para adquirirlo es necesario registrarse en el sitio <https://orcid.org/register>.

Introducción: Exponer con toda la claridad posible, la naturaleza y alcance de la investigación, revisar las publicaciones pertinentes, indicar el método de investigación si se estima necesario, mencionar los principales resultados de la investigación y expresar la conclusión o conclusiones principales sugeridas por los resultados.

Materiales y métodos: La mayor parte de esta sección se debe escribir en pasado y dar toda clase de detalles. La finalidad principal es describir y que los resultados sean reproducibles. En los materiales hay que incluir las especificaciones técnicas y las cantidades exactas, así como la procedencia o el método de preparación. Se deben emplear los nombres genéricos o químicos.

Resultados: Se debe hacer una descripción amplia, clara y sencilla de los experimentos, ofreciendo un panorama general pero sin repetir los detalles experimentales de los Materiales y Métodos. Se deben presentar los datos más representativos. La exposición se debe redactar en pretérito.

Discusión: Se deben presentar de forma expositiva los principios, relaciones y generalizaciones que los Resultados indican. Se deben señalar las excepciones o las faltas de correlación y delimitar los aspectos no resueltos. Mostrar cómo concuerdan (o no) los resultados e interpretaciones con los trabajos anteriormente publicados. Se deben exponer las consecuencias teóricas del trabajo y sus posibles aplicaciones prácticas. Resuma las pruebas que respaldan cada conclusión. Los tiempos verbales oscilarán entre el presente y el pasado.

Conclusiones: Se deben formular de forma clara y ordenada. No deberán incluir referencias bibliográficas.

Recomendaciones (opcional): Se deberá cuidar de reflejar solamente aquellas que consideren opciones para lograr un mayor desarrollo en la temática reflejada en el artículo y que resulten factibles de ejecutar.

Agradecimientos (opcional): Se debe agradecer cualquier ayuda científico-técnica importante recibida de cualquier persona que haya colaborado en el desarrollo del trabajo. Entre otros aportes se pueden considerar la provisión de equipos, materiales especiales, así como la participación significativa en la revisión y presentación del artículo.

Referencias bibliográficas: Todos los documentos consultados se hacen constar al final del trabajo bajo el epígrafe Referencias bibliográficas. No se usan notas al pie de página. Se deben enumerar solo obras importantes y publicadas e incluir, de forma priorizada, trabajos de publicación reciente. Los trabajos originales no sobrepasarán las 20 citas; las revisiones, de 25 a 50. Se deben cotejar todas las partes de cada referencia contra la publicación original antes de presentar el artículo. Las referencias se deben enumerar en el texto con números arábigos, entre corchetes, en el lugar en

que se apliquen y siguiendo un orden de aparición consecutivo. Las referencias, con todos los datos requeridos (apellido, nombre del autor (es), título del trabajo, título de la publicación, año; volumen, número de la publicación, página inicial–página final), se incluirán después de las Conclusiones, o de los Agradecimientos, en caso de existir estos últimos. Si tiene 5 o más autores, se mencionarán los 4 primeros, seguidos de «et al.». Los títulos de las publicaciones periódicas se deben adecuar al sistema INIS (véase IAEA–INIS–11).

A continuación, a modo de ejemplo, se presentan dos referencias de trabajos en publicaciones periódicas:

[12] HILLEGONDS DJ, FRANKLIN S, SHELTON DK, VIJAYAKUMAR S, VIJAYAKUMAR V. The Management of Painful Bone Metastases with an Emphasis on Radionuclide Therapy. *J. Natl. Med. Assoc.* 2007; (99): 785–794.

[24] SRIVASTAVA SC. Treatment of joint and bone pain with electron emitting radiopharmaceuticals. *Indian J. Nucl. Med.* 2004; 19(3): 89–97.

Las referencias a trabajos publicados en Memorias de un evento deberán incluir la siguiente información: apellido, nombre del autor (es), título del trabajo; memorias de que evento (su denominación en el idioma original o transliteración en caso de idioma con alfabeto distinto al latino), lugar y fecha de la realización del mismo, así como entidad organizadora del evento y fecha de la publicación. A continuación se ofrecen referencias, a modo de ejemplo:

[13] WHITE JR, CHAPMAN DM, BISWAS D. Fuel Management Optimization Based on Generalized Perturbation Theory. *Proceedings of the Conference on Advances in fuel Management.* Toronto, Canada, June 9–12 1986. Canadian Nuclear Society. 1986.

[4] DI GEORGIO M. Respuesta multidisciplinaria desarrollada en Argentina ante un suceso radiológico. VIII Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear. I Congreso Latinoamericano del IRPA. V Congreso Nacional de Protección Radiológica. 11 al 15 de octubre 2010. Medellín, Colombia. 2010.

Las referencias a trabajos de revistas en Internet deben incluir: Los autores (4 como máximo, et al). Título del artículo. Abreviatura de la revista. Año ; Volumen (número): páginas. Disponible en: URL del artículo. A modo de ejemplo:

[17] GUPTA M, CHOUDHURY PS. Systemic radionuclide therapy for bone pain palliation in cancer patients. *Cancer News.* 2014, (consultado 20 de Jun 2016). 18(2): 12–14. Disponible en: <http://www.rgcirc.org/UserFiles/cancer-news-june-2014.pdf>

Contribución de autoría (CREDIT): Los roles de autoría serán identificados en el orden siguiente, se incluye a cada autor en el rol que le corresponde y omitiendo los roles que no procedan en cada caso:

1. Conceptualización: xxxxxx
2. Curación de datos: xxxxxx
3. Análisis formal: xxxxxx
4. Adquisición de fondos: xxxxxx
5. Investigación: xxxxxx
6. Metodología: xxxxxx

7. Administración del proyecto: xxxxxx
8. Recursos: xxxxxx
9. Software: xxxxxx
10. Supervisión: xxxxxx
11. Validación: xxxxxx
12. Visualización: xxxxxx
13. Redacción – borrador original: xxxxxx
14. Redacción – revisión y edición: xxxxxx

Cada rol se define de la siguiente forma:

1. **Conceptualización:** ideas; formulación o evolución de los objetivos y metas generales de la investigación.
2. **Curación de datos:** actividades de gestión para anotar (producir metadatos), depurar datos y mantener los datos de la investigación (incluido el código de software, cuando sea necesario para interpretar los propios datos) para su uso inicial y su posterior reutilización.
3. **Análisis formal:** aplicación de técnicas estadísticas, matemáticas, computacionales u otras técnicas formales para analizar o sintetizar datos de estudio.
4. **Adquisición de fondos:** adquisición del apoyo financiero para el proyecto que conduce a esta publicación.
5. **Investigación:** realización de una investigación y proceso de investigación, realizando específicamente los experimentos, o la recolección de datos/evidencia.
6. **Metodología:** desarrollo o diseño de la metodología; creación de modelos.
7. **Administración del proyecto:** responsabilidad de gestión y coordinación de la planificación y ejecución de la actividad de investigación.
8. **Recursos:** suministro de materiales de estudio, reactivos, materiales, pacientes, muestras de laboratorio, animales, instrumentación, recursos informáticos u otras herramientas de análisis.
9. **Software:** programación, desarrollo de software; diseño de programas informáticos; implementación del código informático y de los algoritmos de apoyo; prueba de los componentes de código existentes.
10. **Supervisión:** responsabilidad de supervisión y liderazgo en la planificación y ejecución de actividades de investigación, incluyendo la tutoría externa al equipo central.
11. **Validación:** verificación, ya sea como parte de la actividad o por separado, de la replicabilidad/reproducción general de los resultados/experimentos y otros productos de la investigación.
12. **Visualización:** preparación, creación o presentación del trabajo publicado, específicamente la visualización/presentación de datos.
13. **Redacción–borrador original:** preparación, creación o presentación del trabajo publicado, específicamente la redacción del borrador inicial (incluyendo la traducción sustantiva).
14. **Redacción – revisión y edición:** preparación, creación o presentación del trabajo publicado por los miembros del grupo de investigación original, específicamente revisión crítica, comentario o revisión – incluyendo las etapas previas o posteriores a la publicación.

Abreviaturas, siglas y símbolos: Deben ser los aceptados internacionalmente. Las abreviaturas y siglas se deben explicar la primera vez que se mencionan. Los símbolos y caracteres griegos, al igual que los subíndices y supraíndices, se deben definir claramente. Los símbolos que no sean de uso corriente deberán ser descritos con claridad en el texto.

Tablas: Se deben ordenar con numeración arábica e incluirse al final del trabajo. No se pondrá punto al final del encabezamiento de la tabla.

Figuras: Los términos, las abreviaturas y los símbolos utilizados en las figuras deben ser los mismos que aparecen en el texto. No se utilizarán caracteres, ni símbolos poco frecuentes (son preferibles los círculos, cuadrados o triángulos en blanco o rellenos). Si son muy complejos se deben aclarar en una leyenda concisa. Los símbolos y caracteres deben ser claros y de tamaño suficiente, de manera que al reducirlos para la publicación sean legibles. Cuando se confirme que el número a publicar de la revista incluirá la variante impresa, para la diferenciación de varias curvas que concurren en una misma figura no se utilizarán colores, sino diferentes tipos de caracteres.

Ecuaciones y fórmulas: Las ecuaciones matemáticas se deben escribir en letras cursivas, con precisión, en especial los subíndices y supraíndices. Evite el uso de exponentes complicados y la repetición de expresiones elaboradas.

El significado de los símbolos se explica debajo de la ecuación. En la descripción de los símbolos se utilizan dos puntos (:).

Ejemplo:

$$e = v \cdot t$$

donde:

e: Espacio recorrido

v: Velocidad

t: Tiempo

El producto de dos o más unidades en forma de símbolos se indica con una cruz (x) como signo de multiplicación.

Ejemplo:

N x m (Newton metro)

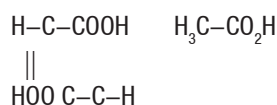
T x km (toneladas kilómetro)

En la división de unidades expresada en símbolos, se utiliza la línea horizontal (—), la línea oblicua (/) o las potencias negativas.

Ejemplo:

km/m, km x h⁻¹

En las fórmulas químicas los enlaces deben ir centrados y lo más unido posible a los átomos que se enlazan.



Unidades: Como norma general se deberá emplear el Sistema Internacional de Unidades y prescindir de símbolos y abreviaturas inadecuados.

Escritura de números

1. Los números enteros con más de tres dígitos se escriben en períodos de tres, de derecha a izquierda, dejando entre sí un espacio. Se exceptúan los números de télex, teléfonos, números de casas en las direcciones, páginas, años, leyes, decretos, resoluciones y patentes.
2. En la numeración decimal, la separación de la parte entera de la decimal, se hace mediante una coma (,). La parte entera, se escribe en grupos de tres dígitos, de derecha a izquierda, a partir de la coma, separada entre sí, por un espacio. La parte decimal se escribe también en grupos de tres dígitos, de izquierda a derecha, a partir de la coma.
3. Cuando se escriben números seguidos unos de otro, se separan con puntos y coma (;) si son decimales, y mediante comas (,) si todos los relacionados son enteros.
4. Después de un valor numérico cualquiera, los símbolos se escriben dejando un espacio entre dicho valor y la primera letra del símbolo. Ejemplos: 15 %, 10 °C.

Para la redacción de manuscritos a publicar en Otras Secciones

Los artículos de las demás secciones de la revista deben tener como objetivo difundir, con rigor científico y de forma asequible al público en general, temas relacionados con la energética nuclear, las diversas aplicaciones de las técnicas nucleares, energía nuclear, la seguridad nuclear, la protección radiológica, salvaguardias y no proliferación. Los trabajos no deben exceder las 10 cuartillas, incluidas ilustraciones y tablas. Deben contener resumen y título en español e inglés. El título, las tablas e ilustraciones, así como las referencias bibliográficas, seguirán las mismas indicaciones que rigen para los artículos de la sección Ciencias Nucleares e Innovación Tecnológica. Las secciones son las siguientes:

- Panorama Nuclear
- Ámbito Regulatorio
- Salvaguardias y No Proliferación
- En la Espiral
- De Interés.

Los artículos de estas secciones están sujetos a la aprobación del Consejo Editorial. A consideración del Consejo Editorial podrán ser sometidos también a arbitraje.

INFORMACIÓN GENERAL

La revista será publicada únicamente en versión digital, excepto que previamente se confirme por la editorial la publicación también en la variante impresa. Nucleus es revista arbitrada, certificada por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, que acredita oficialmente el carácter científico-tecnológico de la publicación seriada, y que contribuye a su homologación internacional. Los autores serán informados oportunamente acerca del estado del proceso editorial de sus trabajos. En particular, acerca de la acep-

tación o no por el Consejo Editorial de los artículos para su publicación en la revista.

Cuando la revista se publique en versión impresa, los autores recibirán de forma gratuita dos ejemplares de la revista en la que aparece publicado su artículo.

VÍAS DE PRESENTACIÓN DE LOS MANUSCRITOS

En la redacción de la revista:

Calle 20 No 4111–4113 e/ 18–A y 47, Playa, Ciudad de La Habana, Cuba

Por correo electrónico: nucleus@cubaenergia.cu

Por la web: www.cubaenergia.cu/nucleus/nucleus.htm

Instructions for AUTHORS to publisher on nucleus...

Devoted to **Nuclear Science** and **Technological Innovation**

- Original papers should not exceed 10 pages (one column) including tables (up to 5) and illustrations (up to 5). Papers shall be either sent by email, in Word format, Arial 12th size font with 1,5 line spacing, or shall be directly delivered to the Editorial Department of the journal in an electronic medium. There is a maximum of 30 lines per page.
- Papers shall have the following order: Summary (in English and Spanish) Introduction, Materials and methods, Results, Discussion, Conclusions, Recommendations (optional), Acknowledgements (optional) and Bibliographic References. These sections should be well defined, though not necessarily with headlines.
- Each work must be accompanied by a letter signed by the corresponding author, stating that there is no **Conflict of Interest** between the authors and also confirming that said work has not been previously submitted to another publication.
- Papers are subject to a peer review and approval of the Editorial Board.
- Contributions to the journal are distributed free of charge to authors. Once selected for their approval, copyright is owned by the publishing house.

Author(s): Specify full name(s) and surname(s) as well as the institution.

Title: It should be both in English and Spanish and should not exceed 120 characters, or 20 words, nor include acronyms, abbreviations, chemical formulas or registered names (instead of generic names). Exceptionally, including acronyms of general use in Scientific and technical literature shall be accepted.

Abstract: It should not exceed 250 words, nor should contain acronyms, abbreviations or references. It should indicate the main objectives and scope of the research, describe the used methods, summarize the results and state the main conclusions. It should be written impersonally, in past tense in both Spanish and English. The document content will be based on 3 to 10 key words at the bottom of the abstract, arranged in order of importance, both in Spanish and in English at the bottom of the corresponding abstract in each language. INIS shall include its appropriate descriptor index(es) in each paper.

ORCID: (unique identification code for researchers): Represents an unequivocal identification of an author of a publication. This code is free and to acquire it it is necessary to register on the site <https://orcid.org/register>.

Introduction: Explain the nature and scope of the research as clearly as possible, review relevant literature; indicate the research methods, if necessary; mention the main research results and state the conclusion or main conclusions drawn by the results.

Materials and methods: Most of this section should be written in past tense and full details shall be provided. The main purpose is to make a description and reproduce the results. The materials should include technical specifications, the exact quantities used, as well as the source or preparation method. Generic or chemical names should be used.

Results: A broad, clear and simple description of experiments should be made, providing an overview but without repeating the details on the materials and methods used in the experiments. The most representative data should be provided. The statement should be written in the past tense.

Discussion: Principles, relationships and generalizations from the results must be set out. Exceptions of lack of correlation should be noted, and unresolved issues should be identified. It is important to show how consistent (or not) are the results and interpretations with previously published papers. The theoretical implications of the work and its possible practical applications should be stated. Evidence supporting each conclusion should be summarized. Present and past tenses are to be used.

Conclusions: It should be made as clear as possible. Bibliographic references shall not be included.

Recommendations (optional): Only options considered to provide a sound basis to support the topic of the article and feasible to be implemented shall be included.

Acknowledgements (optional): Include acknowledgements for any major technical assistance received from any person who has contributed to the review and submission of a paper, experiment or provision of equipment, special materials, etc.

Bibliographic References: All consulted documents must be listed under this heading. Footnotes are not to be used. Only important and recently published papers should be included by priority order. Manuscripts should not exceed 20 quotations, revisions – from 25 to 50. All parts of each reference listing should be checked against the original before submitting the article. The references in the text should be numbered with Arabic numerals in square brackets in their corresponding place in the paper and following a consecutive order of appearance. References with all its required data i.e. last name, name of author(s), title, journal title, year, volume (number): initial page – final page are to be included after the Conclusions or Acknowledgments in case there are some of the latter. If there are 5 or more authors, only the first 4 should be mentioned, followed by “et al.” The titles of journals must conform to the INIS System (see IAEA–INIS–11).

Two bibliographic references of journals are included here below as examples:

[12] HILLEGONDS DJ, FRANKLIN S, SHELTON DK, VIJAYAKUMAR S, VIJAYAKUMAR V. The Management of Painful Bone Metastases with an Emphasis on Radionuclide Therapy. *J. Natl. Med. Assoc.* 2007; (99): 785–794.

[24] SRIVASTAVA SC. Treatment of joint and bone pain with electron emitting radiopharmaceuticals. *Indian J. Nucl. Med.* 2004; 19(3): 89–97.

References to papers published in the Proceedings of a meeting or conference should include the following information: surname, author's name (s), title of the paper; it should also specify in which meeting or conference Proceedings it was included (its denomination in the original language or transliteration in case of language with an alphabet other than Latin), place and date of the event, as well as the organizing institution and date of publication. The following references are included as an example:

[13] WHITE JR, CHAPMAN DM, BISWAS D. Fuel Management Optimization Based on Generalized Perturbation Theory. Proceedings of the Conference on Advances in fuel Management. Toronto, Canada, June 9–12 1986. Canadian Nuclear Society. 1986.

[4] DI GEORGIO M. Respuesta multidisciplinaria desarrollada en Argentina ante un suceso radiológico. VIII Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear. I Congreso Latinoamericano del IRPA. V Congreso Nacional de Protección Radiológica. 11 al 15 de octubre 2010. Medellín, Colombia. 2010.

References to articles published in internet should include:

The authors (4 as maximum, et al). Title of the article. Abbreviation of the journal. Year; Volume (Number): pages. Available in: the article's webpage. As for example:

[17] GUPTA M, CHOUDHURY PS. Systemic radionuclide therapy for bone pain palliation in cancer patients. *Cancer News.* 2014, (consulted on June 20th 2016). 18(2): 12–14. Available in: <http://www.rgcirc.org/UserFiles/cancer-news-june-2014.pdf>

Authorship contribution (CREDIT): The authorship roles will be identified in the following order, each author is included in the role that corresponds to him and omitting the roles that are not applicable in each case:

1. Conceptualization
2. Data curation
3. Formal analysis
4. Acquisition of funds
5. Research
6. Methodology
7. Project administration
8. Resources
9. Software
10. Supervision
11. Validation
12. Visualization
13. Writing – original draft
14. Writing – proofreading and editing

Each role is defined as follows:

1. Conceptualization: ideas; formulation or evolution of the objectives and general goals of the investigation.
2. Data curation: Management activities to annotate (produce metadata), clean data, and maintain research data (including software code, where necessary to interpret the data itself) for initial use and subsequent reuse.
3. Formal analysis: application of statistical, mathematical, computational or other formal techniques to analyze or synthesize study data.
4. Acquisition of Funds: Acquisition of financial support for the project leading to this publication.
5. Investigation: conducting an investigation and investigative process, specifically conducting the experiments, or collecting data/evidence.
6. Methodology: development or design of the methodology; model creation.
7. Project administration: responsibility for managing and coordinating the planning and execution of the research activity.
8. Resources: supply of study materials, reagents, materials, patients, laboratory samples, animals, instrumentation, computer resources or other analysis tools.
9. Software: programming, software development; computer software design; implementation of computer code and supporting algorithms; Test existing code components.
10. Supervision: responsibility for supervision and leadership in the planning and execution of research activities, including external mentoring to the core team.
11. Validation: Verification, either as part of the activity or separately, of the overall replicability/reproducibility of the results/experiments and other products of the research.
12. Display: Preparation, creation, or presentation of published work, specifically the display/presentation of data.
13. Writing–original draft: preparation, creation, or presentation of published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).
14. Writing – revision and editing: preparation, creation or presentation of the published work by the members of the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including the pre- or post-publication stages.

Abbreviations, acronyms and symbols: should be those internationally accepted. The abbreviations and acronyms should be explained the first time mentioned. Symbols and Greek characters

Figures: The terms, abbreviations and symbols used in the Figures should be the same of the text. Do not use characters or uncommon symbols (blank or filled in triangles, circles or squares are preferred). If they are too complex, they must be specified in a concise caption. Symbols and characters must be clear and readable when reduced in size.

Whenever it is confirmed that the journal to be published shall include a printed version, in order to differentiate the various curves included in a single figure, different types of characters and not colours shall be used.

Equations and formulas: mathematical equations should be written accurately, especially subscripts and superscript. Avoid using complex exponents and repetition of elaborate expressions. The meaning of symbols is explained below the equations. To describe symbols a colon is used. [:]

Example:

$$e = v.t$$

Where:

e: Space travelled

v: Speed

t: Time

The product of two or more units in the form of symbols is indicated by a cross (x) as a sign of multiplication.

Example:

N x m (Newton meter)

T x km (tonnes)

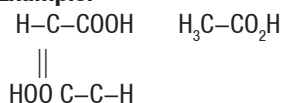
In the division of units expressed in symbols, a colon [:], a slash or slant [/] or negative exponents are to be used.

Example:

km / m, km x h⁻¹

In chemical formulas the bonds must be centered and as close as possible to the bonded atoms.

Example:



Units: As a general rule, the International System of Units must be used and inadequate symbols and abbreviations must be avoided.

Writing numbers

1. Whole numbers with more than three digits are written in groups of three, from right to left, leaving a space between them. Exceptions to the preceding rule are telex numbers, telephones, house numbers in addresses, pages, years, laws, decrees, resolutions and patents
2. In decimal numbering, a comma (,) is used to separate whole numbers and its decimal portion. The whole number is written in groups of three digits, from right to left, from the comma, separated from each other, by a space. The decimal

portion is also written in groups of three digits, from left to right, from the comma.

3. When numbers are written next to each other, they are separated by semicolons (;) if they are decimals, and by commas (,) if all the numbers mentioned are whole.
4. After any numeric value, the symbols are written leaving a space between that value and the first letter of the symbol. Examples: 15 %, 10 °C.

Publications in OTHER SECTIONS

The articles in other sections of the journal should be aimed at disseminating, with scientific rigor and in a way accessible to the public in general, issues related to nuclear energy, the different applications of nuclear technology, nuclear safety, radiation protection, safeguards and non proliferation. Papers should not exceed 10 pages, including illustrations and tables. They should contain an abstract and title in English and Spanish. The title, tables and illustrations shall follow the same directions applied to papers from the Nuclear Science and Technological Innovation Section. The sections are:

- Nuclear Outlook
- Regulatory Area
- Safeguards and Non-proliferation
- In the Spiral
- Matters of Interest

The articles in these sections are subject to the approval of the Editorial Board. Considering the editorial board suggestions, the articles could be also submitted to arbitration.

GENERAL INFORMATION

The journal is only to be published in electronic format, except in case the publication of a printed version of the journal is previously confirmed by its Editorial Board. Nucleus is a peer-reviewed journal, approved by the Ministry of Science, Technology and Environment of Cuba, which officially certifies its scientific and technological character, and contributes to its recognition as a journal equivalent to other international publications.

The authors shall be duly informed about the editorial process of their papers, in particular, about the approval or not by its Editorial Board of the papers to be published.

Whenever the journal is published in a printed version, the authors shall receive free of charge two copies of the journal in which the paper in question is published.

ARTICLES SHALL BE EITHER SENT BY ORDINARY MAIL TO THE JOURNAL'S POSTAL ADDRESS:

Nucleus Editorial Dept.

Calle 20 No. 411 e/ 41 y 47, Miramar, Playa, CP 11300, Havana, Cuba;

BY Electronic mail: nucleus@cubaenergia.cu

OR Website: www.cubaenergia.cu/publicaciones>nucleus

aenta

Agencia de Energía Nuclear
y Tecnologías de Avanzada

Ciencias nucleares y tecnologías de avanzada para el desarrollo sostenible

Misión:

Gestionar conocimientos, servicios y productos relacionados con la tecnología nuclear, fuentes renovables de energía y otras tecnologías de avanzada, de acuerdo con las prioridades de desarrollo sostenible del país.

Aplicaciones tecnológicas en:

Salud, Industria, Agricultura,
Energías Renovables y Medio Ambiente

Instituciones:

- Centro de Isótopos (**CENTIS**)
- Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (**CPHR**)
- Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (**CEADEN**)
- Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (**CUBAENERGIA**)
- Centro de Ingeniería Ambiental de Camagüey (**CIAC**)
- Instituto de Cibernética, Matemática y Física (**ICIMAF**)



Calle 20 No. 4109 e/ 41 y 47 Miramar, Playa, La Habana
Teléf.: 202 2524 Fax: (537) 204 1188
www.aenta.cu
Contacto AENTA: presidencia@aenta.cu