

Aplicación de técnicas nucleares para estimar la degradación de suelos por erosión, en cultivos bajo medidas de conservación

Yanna Llerena Padrón¹, Reinaldo Gil Castillo¹, José Luis Peralta Vital¹,
Yusleidy M. Cordoví Miranda¹, Leonides Bravo Leiva¹, Andrés Fuentes Soto²

¹ Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR)

² Instituto de Suelos (IS)

yanna@cphr.edu.cu

Resumen

La erosión del suelo es uno de los fenómenos ambientales que más negativamente impactan al planeta, atentando contra la sostenibilidad de la tierra a todos los niveles. Evaluar la redistribución del suelo, cuantificando sus pérdidas, determina sus vulnerabilidades y es muy relevante para la implementación de estrategias nacionales sobre el manejo sostenible de tierras. El uso de técnicas nucleares como herramienta de evaluación de riesgos por erosión de suelos, posee muchas ventajas, siendo utilizada internacionalmente e introducida en diferentes agrosistemas nacionales. El trabajo muestra el uso de la técnica nuclear FRN (fallout radionúclidos) en el "Polígono Nacional de Conservación de suelos, agua y bosques" y evaluó las concentraciones del ¹³⁷Cs como radionúclido caído en la lluvia, determinando los impactos de la erosión del suelo y la factibilidad de las medidas tomadas para su conservación y mejora. En cumplimiento de los protocolos de muestreo y representatividad de la muestra, para la colecta son usados transeptos en dirección de la pendiente. Para interpretar los resultados de laboratorio y obtener tasas de redistribución de suelo (t/ha.a) fue empleado un software complemento de MSExcel "Modelos de conversión", aplicando los Modelos Proporcional, Balance de Masa I y Balance de Masa II. Las concentraciones de ¹³⁷Cs caracterizaron el estado de erosión del suelo en el área de estudio a mediano plazo, confirmando deposición de suelo a causa de beneficios de las medidas antierosivas implementadas al obtenerse valores altos de redistribución en esta área (-30.2 a 41.8) t/ha.a, en comparación con el sitio de referencia (-43.1 t/ha.a).

Palabras clave: erosión; radisótopos; suelos; emigración de los radinúclidos; conservación del suelo agrícola.

Application of nuclear techniques to estimate soil degradation by erosion, in crops under conservation measures

Abstract

The soil erosion is one of the environmental phenomena that most negatively impact the planet, attempting against the land sustainability at all levels. Assessment the land redistribution, quantifying its losses, determines its vulnerabilities and it is very relevant for the national strategies implementation on the sustainable lands management. The nuclear techniques use as a tool for assessing soil erosion risks, has many advantages, being currently widely used internationally and introduced in different national agro-systems. The paper shows the use of the nuclear technique FRN (fallout radionuclides) in the "National Polygon of soil, water and forest conservation and valued the concentration of the ¹³⁷Cs, as fallen radionuclide in the rain, determining the impacts of the soil erosion and assess the feasibility of the measures taken for its conservation and improvement. In compliance of sampling protocols and representativeness of the sample, for the collection transects are used in direction of the slope. In order to interpret the laboratory results and obtain soil redistribution rate, complementary software of MSExcel "Conversion Model" was used, applying the "proportional model", "mas balance I" and "mass balance II". The ¹³⁷Cs concentration characterized the soil erosion status in the study area in the medium term, confirming soil deposition due to the benefits of anti-erosion measures as high redistribution values were obtained in this area (-30.2 a 41.8) t/ha.a, compared to the reference site (-43.1 t/ha.a).

Key words: erosion; radioisotopes; soils; radionuclide migration; soil conservation.

Introducción

En la actualidad los cambios climáticos que se están produciendo en el planeta, con periodos de intensas lluvias y de extremas sequías, han provocado una degradación de los suelos, tanto por la desecación de los suelos como por la erosión, que facilitan tanto la pérdida del espesor de los horizontes del mismo como también la pérdida de nutrientes de la primera capa de suelo, afectando de forma sistemática las tierras de cultivos y haciéndolas cada vez menos productivas.

La Estrategia Ambiental Cubana 2016-2020 [2] en su capítulo II, epígrafe 2.2 establece siete problemas principales ambientales del país los cuales son, la degradación de los suelos, afectaciones a la cobertura forestal, contaminación, pérdida de la diversidad biológica y deterioro de los ecosistemas, carencia y dificultades con el manejo, la disponibilidad y calidad del agua, impactos del cambio climático, deterioro de la condición higiénica sanitaria en los asentamientos humanos.

De estos siete problemas antes mencionados cinco están vinculados al deterioro de los suelos, por lo que se hace necesario su cuidado y vigilancia ya que es un recurso importante para la sostenibilidad alimentaria del país. Siendo la degradación de los suelos uno de los problemas más serios que se presenta en la agricultura.

Principales procesos de degradación:

- Erosión.
- Compactación.
- Acidificación.
- Salinización.

La **EROSIÓN** es la forma más completa e integral de la degradación de los suelos. Es un proceso que altera las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, afectando procesos que regulan la productividad de los ecosistemas agrícolas. Su expresión depende de los agentes actuantes, tales como la erosión hídrica (el agua) y la erosión eólica (el viento). La erosión afecta gravemente en las propiedades físicas de los suelos (actuando en el espesor de la capa superficial o arable); en las propiedades químicas (a través del lavado o remoción de los elementos nutricionales del suelo); y en las propiedades biológicas (actuando sobre la materia orgánica y la biota edáfica).

Factores que intervienen en el proceso de erosión

- Clima
- Tipos de suelo
- Relieve
- Usos de suelo
- Vegetación
- Hombre

Principales causas de la erosión

Las fundamentales causas de la erosión es la deforestación, el sobre pastoreo, el mal manejo y cambio de uso de los suelos, la sobre explotación de cultivos intensivos anuales y la quema para la agricultura migratoria.

Las técnicas nucleares se utilizan como herramientas novedosas, para evaluar la degradación de los suelos, como apoyo a las estrategias nacionales de manejo sostenible del suelo, potenciando el manejo integrado de los suelos, para estos estudios se aplican dos técnicas nucleares, una referida al uso de los radionúclidos provenientes de la precipitación radiactiva (FRN: ^{137}Cs ; ^7Be ; ^{210}Pb) y otra a los compuestos específicos de isótopos estables (que estudia el origen del suelo mediante los ácidos grasos de la cadena del carbono). Estas técnicas permiten obtener la tasa de erosión de los suelos y su redistribución en el paisaje, además facilitan la adopción de mejoras en cultivos bajo medidas de conservación de los suelos, garantizando su menor movimiento y pérdida.

En Cuba desde el año 2010 se crearon los polígonos demostrativos como modelos para crear capacidades de enfrentamiento al cambio climático y preservar los recursos naturales del suelo, el agua y los bosques. En los mismos se aplican experimentalmente un grupo de medidas agrotécnicas para reducir los niveles de degradación de tierras.

Ubicación del objeto de estudio

El área de estudio se ubica dentro del Polígono Nacional de conservación de suelos, agua y bosque en la finca la Victoria 1 (figura 1). La misma se ubica en las coordenadas centrales 82.20849° Oeste y 23.07526° Norte, al iniciar la carretera hacia el poblado de Peñalver. Limita al oeste con el río Bacuranao y al este con la finca la Victoria 1. Tiene un área total de 29 hectáreas; dedicada a cultivos varios entre ellos arroz, frutales, y un área de bosques y pastos.



Figura 1. Ubicación del área de estudio.

La investigación desarrolla el uso de la técnica de radionúclidos ambientales (^{137}Cs) proveniente de la precipitación radiactiva "fallout"; el estudio se desarrolló en la finca la Victoria 1 en el llamado **Campo 2**; con un área de 2.5 hectáreas, la pendiente media es de 16 %, (figura 2). En este sector se ubican 6 barreras vivas; una de plátano burro de 400 m de largo a 0.80 m entre plantas (puntos A6 y B7); dos barreras de King grass morado de 50 m de largo y a 0.20 m de distancia entre plantas (puntos A1, A2, B1, B2, C2 y C3) y tres barreras de King grass morado de 100 m de longitud a 0.20 m de distan-

cia entre plantas (puntos A3, A4, A5, B3, B4, B6, C5 y C6). La equidistancia entre barreras es de 10 m. Todas las barreras se ubican a una hilera simple.

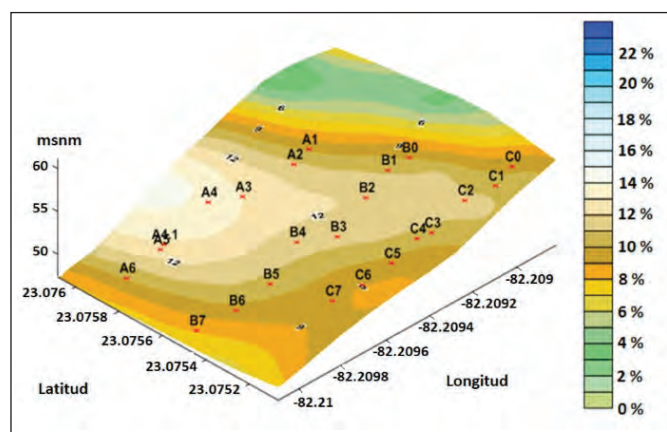


Figura 2. Nivel de pendientes en el área de estudio.

Los resultados de la investigación prevén confirmar la importancia y relevancia de las técnicas nucleares como herramienta científico-técnica para estimar la degradación del suelo por la erosión hídrica, en etapas en que los cultivos están bajo medidas de conservación del suelo.

Materiales y métodos

La cuantificación de la redistribución de suelos es importante para la aplicación de estrategias de manejo sostenible de la tierra, con el objeto de apoyar el establecimiento de políticas para su conservación. Las técnicas nucleares que emplean el ^{137}Cs y otros radioisótopos han permitido evaluar las pérdidas y ganancias de suelo, siendo ampliamente empleadas a nivel internacional y en diferentes agrosistemas del país. Estas técnicas nucleares son herramientas que poseen ventajas sobre las tradicionales al ser aplicables a diferentes factores ambientales, con ellas se pueden estimar los niveles erosivos a corto, mediano y largo plazo, necesitando un mínimo de visitas al campo para poder obtener resultados. Sus estimaciones se pueden asociar espacialmente (por puntos de muestreo) lo que facilita su incorporación en mapas y sistemas de información geográficos.

Teniendo en cuenta la topografía del área de estudio (figura 3), y una variada información (meteorológica, geomorfológica, edafológica, geológica y de uso de la tierra, etc.), se desarrolla una estrategia de muestreo a través de varias transectas en el área demostrativa, siempre en cumplimiento de su representatividad espacial y en número, durante la colecta de las muestras. Las muestras colectadas fueron analizadas en el laboratorio, siendo medidas por un sistema gamma espectrométrico "Detector Systems GmbH (DSG)". En las mediciones fue usado un detector de germanio hiperpuro (HPGe) coaxial con ventana de carbono epóxico, tipo NGC3019, número de serie GI-886, criostato VD-SL, Dewar de 30 L, alto voltaje de 3000 V negativo, 30 % de eficiencia relativa y 1,9 keV de resolución

(FWHM) para la energía de 1332,50 keV del Co-60 . Para caracterizar el estado de la erosión del área de estudio se emplearon las metodologías de los modelos descritos de conversión. [1, 5-7, 9-14, 17-18].

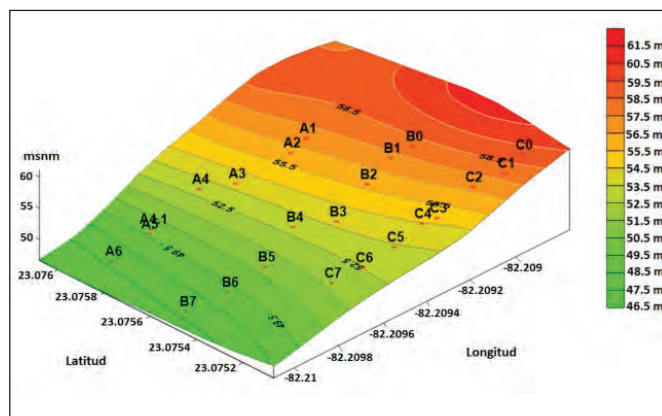


Figura 3. Relieve del área de estudio y puntos de muestreo.

Atendiendo al proceso de degradación de los suelos y cumplir con las exigencias de los protocolos de muestreo que dicta la técnica nuclear FRN se establece una secuencia de etapas para evaluar los niveles de redistribución de suelo en la zona de estudio.

Estrategia de muestreo de suelo

El sector de estudio bajo medidas antierosivas se evaluó mediante 3 transectas (A, B, C) en las direcciones de máxima pendiente, la distancia entre puntos fue variable y tomada a criterio de experto, de acuerdo a las características topográficas del área y a la presencia de las barreras ubicadas entre 5 y 17 m de distancia entre ellas. El muestreo se llevó a cabo mediante un muestreador de núcleo, hasta los 40 cm de profundidad, permitiendo incorporar todo el ^{137}Cs en el perfil del suelo y la parte superficial del ^{40}K .

Para garantizar la representatividad de la muestra, en cada punto se tomaron cuatro muestras para conformar una muestra compuesta, colectando finalmente un total de 29 puntos. Se incluyeron en este total 6 muestras ubicadas en red regular de 5x5 m en un sitio comparativo (sitio R), un área cercana (a 300 m del sitio de estudio) que no está cultivada, con cobertura de matorrales y de bajo nivel de pendiente (1 %). Estas características permiten esperar bajos niveles de erosión hídrica, por lo que se seleccionó para establecer comparaciones con el sitio de estudio en áreas agrícolas (campo 2).

Por las características del lugar de estudio, no pudo seleccionarse un sitio de referencia que cumpliera las exigencias de ser un lugar no perturbado por un tiempo no menor de 40 años, por esta razón fueron estimados los valores de densidad superficial de actividad (Bq/m^2) teniendo en cuenta las coordenadas del lugar y los niveles de precipitaciones anuales. Con estos valores, empleando el modelo para la conversión de las mediciones de los radionúclidos ambientales (^{137}Cs ; ^{210}Pb y ^7Be) se determinó el nivel de referencia del ^{137}Cs en el área [18].

Pretratamiento de las muestras

En esta etapa se preparan las muestras de suelos para las mediciones espectrométricas de los niveles de ^{137}Cs en el laboratorio. Esto se realizó acorde al procedimiento PR/LVRA/03 "Tratamiento de las Muestras" del Laboratorio de Vigilancia Radiológica Ambiental del Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR) [3]. El suelo fue desagregado mecánicamente para su homogenización, secado en la estufa y tamizado a 2 mm. Posteriormente se hicieron mediciones de pesos de las distintas fracciones según el tamizado y la fracción de suelo menor de 2 mm se ubicó en envases cilíndricos para la realización de las mediciones gamma espectrométricas.

Mediciones de ^{137}Cs y ^{40}K por espectrometría gamma

Las determinaciones de ^{137}Cs y ^{40}K se realizaron mediante espectrometría gamma en el laboratorio de ensayos ambientales del Centro de Estudios Aplicados de Cienfuegos (CEAC). Las densidades máscas de actividad (Bq/kg) del ^{137}Cs y ^{40}K en las muestras de suelos, fueron medidas por un sistema gamma espectrométrico "Detector Systems GmbH (DSG)".

La densidad máscas de actividad (Bq/kg⁻¹) para cada muestra se convirtió a la densidad superficial de actividad (Bq/m⁻²) para poder aplicar los modelos de conversión para estimar la tasa de redistribución de suelo (t/ha.a). Se determinó la concentración de actividad de ^{40}K y ^{137}Cs en los materiales de referencia certificados IAEA-326 y IAEA-327, y en las muestras de suelo y sedimento provenientes de los ensayos de aptitud IAEA-TEL-2011-04 e IAEA-TEL-2014-04 respectivamente, convocados por la Agencia Internacional de la Energía Atómica para la Red Internacional de Laboratorios Analíticos para Mediciones de Radiactividad Ambiental (ALMERA).

Los modelos de conversión empleados para la obtención de las tasas de redistribución de suelo obtenidas (t/ha.a) fueron estimadas mediante la aplicación del Modelo Proporcional (MP), Modelo de Balance de Masa I (MBM I), Modelo de Balance de Masa II (MBM II) [8-9, 14-15, 18].

Un software (Complemento de MS Excell) [18] se empleó para la aplicación de los modelos de conversión en la evaluación de la redistribución de suelo en los sectores del estudio.

Resultados y discusión

Los resultados de las mediciones de laboratorio para el ^{137}Cs y el ^{40}K se muestran en la tabla 1, mostrando densidad máscas de actividad (DMA) en Bq/kg para cada uno de los puntos muestreados.

Preliminarmente el comportamiento del ^{137}Cs y el ^{40}K puede ser correlacionado a lo largo de las transectas estudiadas. Se logran identificar similitudes en la distribución de ambos radionúclidos, llegando a ser su correlación significativa de 0.83 y 0.88 para la transecta C y el sitio R respectivamente. Los valores máximos de

DMA de ambos radionúclidos en el punto C7 al final de la transecta C están claramente vinculados a la zona de deposición relativa en la parte más baja del área de estudio, similar análisis es válido para los resultados al final de la transecta A (puntos A5 y A6) (figura 4). La transecta C ubicada en la cercanía del límite sur del Campo 2 registra los mayores niveles de pérdida en los puntos iniciales e intermedios y los menores niveles de erosión reportados en el estudio en el punto C7, donde también deposita el suelo del campo agrícola 3 no incorporado en el estudio. Los niveles de pérdida elevados de esta transecta se asocian a los elevados niveles de pendientes en la primera mitad de sus puntos.

Tabla 1. Resultados de las mediciones del laboratorio para ^{137}Cs y ^{40}K (Bq/kg).

Puntos	^{137}Cs (Bq/kg)	Incertidumbre expandida	^{40}K (Bq/kg)	Incertidumbre expandida
A1	2.06	±0.32	394	±16
A2	1.16	±0.20	278	±11
A3	1.01	±0.17	280	±11
A4	1.04	±0.20	307	±12
A4.1	3.09	±0.36	261	±12
A5	2.62	±0.40	338	±16
A6	2.95	±0.42	310	±16
B0	1.31	±0.22	287	±11
B1	1.39	±0.24	271	±12
B2	1.5	±0.22	248	±11
B3	1.54	±0.28	267	±13
B4	1.09	±0.20	299	±11
B5	1.93	±0.36	264	±13
B6	0.94	±0.18	232.4	±9.8
B7	1.15	±0.18	236.7	±8.8
C0	0.57	±0.11	240.9	±7.8
C1	1.04	±0.17	233.1	±8.8
C2	0.84	±0.14	253.5	±9.0
C3	0.82	±0.16	257.4	±9.2
C4	1.01	±0.18	207	±8.8
C5	0.95	±0.17	296	±11
C6	1.22	±0.22	276	±11
C7	6.8	±1.1	365	±30
R1	0.383	±0.074	69.1	±3.6
R2	1.35	±0.24	106.5	±6.8
R3	0.69	±0.12	94.9	±4.6
R4	0.35	±0.060	73.1	±3.2
R5	1.63	±0.26	124.9	±7.4
R6	0.65	±0.11	105.7	±4.6

Los resultados principales obtenidos de los tres modelos de conversión empleados (proporcional y de balance de masa I y II) para el sitio de estudio se resumen en la figura 5, donde los valores negativos representan las pérdidas de suelo en t/ha.a. Como muestra la figura 5, existen coincidencias cualitativas para los diferentes modelos; en ningún punto se estimó aportes de suelos

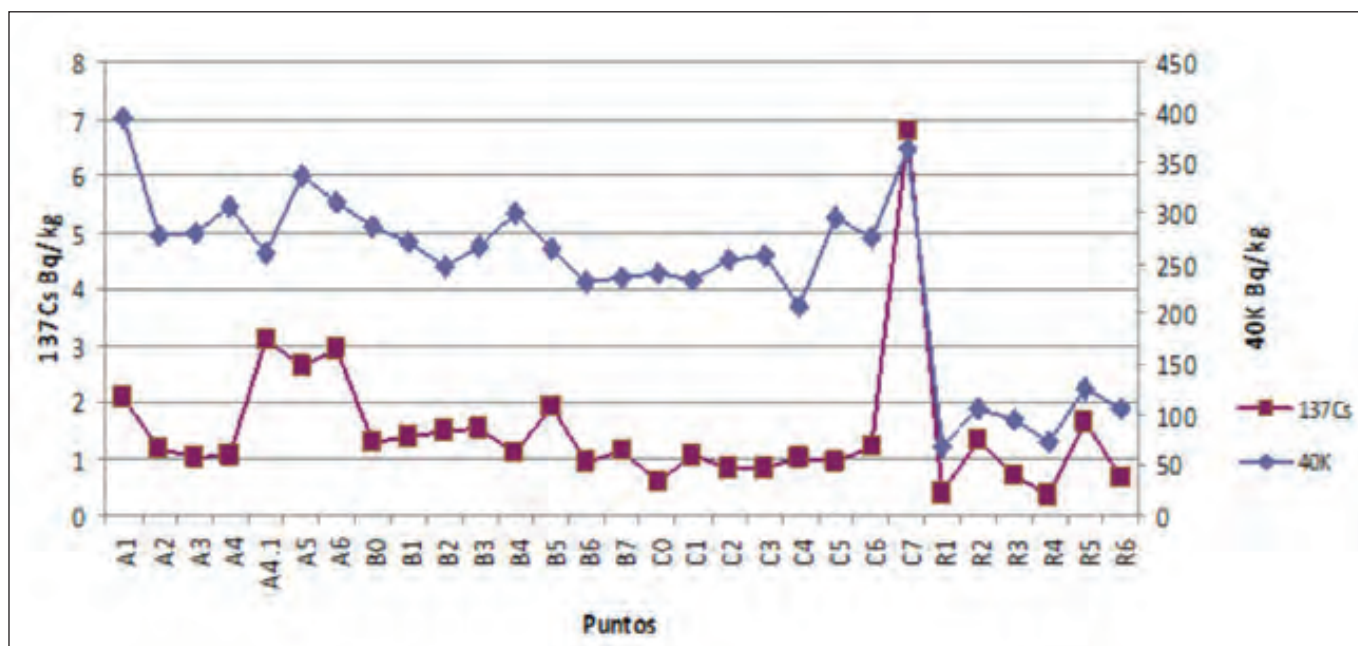


Figura 4. Distribución de la DSA del ^{137}Cs y el ^{40}K en los puntos evaluados.

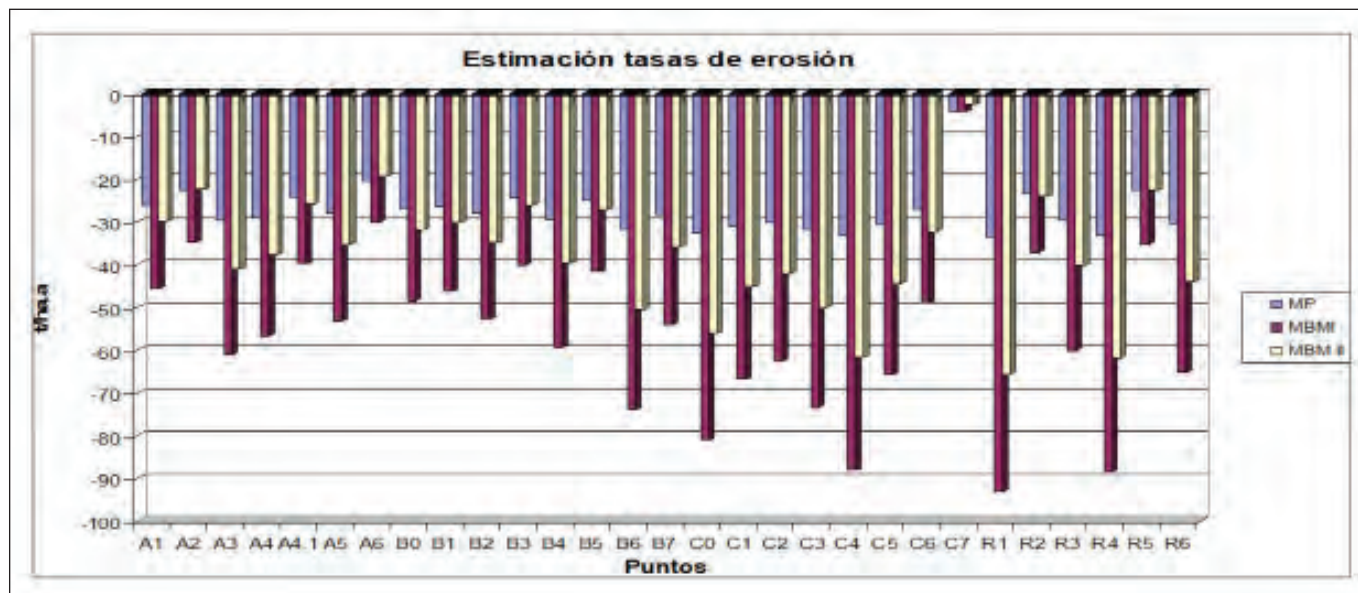


Figura 5. Tasas de redistribución de suelos (t/ha.a) en los puntos de las transectas medidas para los modelos proporcional y de balance de masa I y II.

y solo en el punto C7 son menores las pérdidas, con valores absolutos entre 2 a 4 t/ha.a.

Existen variaciones cuantitativas en la redistribución del suelo para los tres modelos evaluados. El MP va desde -4.11 a -33.73 t/ha.a siendo el de menor variación y el MBM I va desde -4.35 a -93.18 t/ha.a, la variación cuantitativa más grande. Por otro lado, el MBM II va desde -2.68 a -65.63 t/ha.a; estas diferencias se asocian a los diferentes procesos y premisas incorporados en los modelos.

Las estimaciones reportan total predominio de los fenómenos erosivos en las 3 transectas y el sitio R, los valores netos estimados de redistribución de suelo se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Estimados de tasas netas redistribución de suelos.

Sitios de muestreo	Tasas de redistribución neta t/ha.a		
	MP	MBM I	MBM II
Transecta A	-25.8	-45.9	-30.2
Transecta B	-27.5	-52.1	-34.6
Transecta C	-27.6	-61.4	-41.8
Sitio R	-28.9	-63.3	-43.1

De forma general, en los 3 modelos evaluados, la transecta A posee las menores tasas de pérdidas de suelo y la transecta C las mayores. De todos los sitios estudiados, el sitio R posee valores máximos de tasas netas de redistribución de suelos, para los tres modelos analizados. Este resultado puede asociarse a la factibilidad de las medidas antierosivas implementadas (barreras vivas) en el sitio de cultivo donde se

ubicar las transectas en el polígono. Estas medidas permitieron, comparativamente, reducir los niveles erosivos por debajo de los del sitio R, aunque sin medidas antierosivas, por sus características (no cultivado, con cobertura vegetal y pendiente casi horizontal) debería poseer bajos valores erosivos.

Las figuras 6, 7 y 8 muestran la tasa de redistribución de suelos sobre la topografía del sitio de estudio dada para cada uno de los modelos utilizados en la investigación. Todos los modelos de conversión empleados muestran un claro comportamiento de la erosión asociado a agrupamiento de niveles erosivos. Se identifican los valores menores de pérdidas de suelo en el entorno del punto C7 y en menor medida en el A6 relacionados en parte a la topografía por ser puntos de cotas bajas. Puntos a mayores alturas o medios (A3, A4, B4, C0, C1, C3, C4) poseen los niveles más altos de pérdidas de suelos.

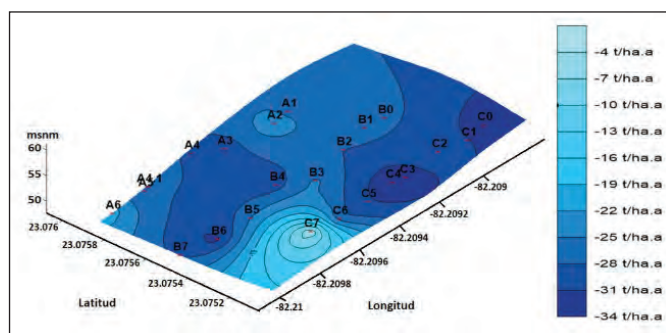


Figura 6. Tasas de redistribución del suelo según el Modelo Proporcional.

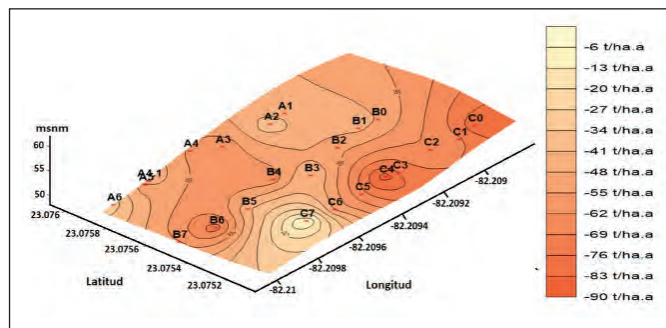


Figura 7. Tasas de redistribución del suelo según el Modelo de Balance de Masa I.

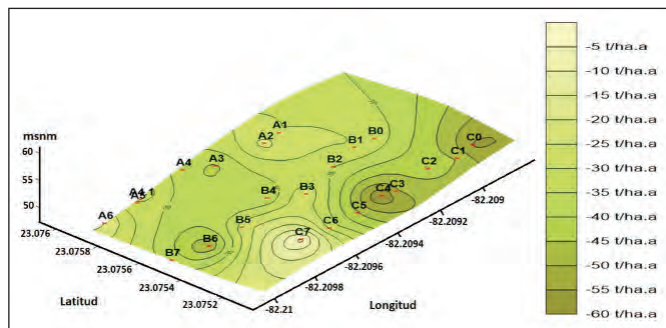


Figura 8. Tasas de redistribución del suelo según el Modelo de Balance de Masa II.

Para interpretar resultados de laboratorio, se emplearon modelos de conversión, siendo el Modelo "Balance de Masa II" el que proporcionó mejores resultados al analizar la variación temporal del ^{137}Cs en su incorporación en la precipitación radiactiva (Fallout) y su distri-

bución inicial en la superficie del suelo. Las concentraciones de ^{137}Cs , caracterizaron el estado de la erosión del suelo en el área de estudio a mediano plazo, confirmando deposición de suelo a causa de los beneficios de las medidas antierosivas implementadas al obtenerse valores altos de redistribución en esta área (-30.2 a 41.8) t/ha.a, en comparación con el sitio de referencia (-43.1 t/ha.a). El sitio de estudio, originalmente estaba fuertemente erosionado por las prácticas agrícolas pasadas y sus condiciones naturales (topografía, etc.). En el año 2010 se iniciaron en el polígono las prácticas actuales de agricultura conservacionista con buenos resultados, implementando medidas antierosivas, tales como, las barreras vivas y muertas, bordo de desagües, zanjas de infiltración, corrección de cárcavas, siembras en curvas del nivel. Estas medidas y otras permitieron la recuperación paulatina de los niveles de suelo y de producción en los sitios intervenidos dentro del polígono nacional [4, 16]. La técnica del ^{137}Cs hace estimaciones de redistribuciones de suelo a mediano plazo, tomando en cuenta el pico del fallout del año 1963, las tierras bajo estudio tuvieron un uso agrícola intensivo en los últimos 40 años, removiéndose gran parte de los inventarios del ^{137}Cs en el suelo, por esto, a pesar de la recuperación del suelo por las medidas, los modelos aplicados mostraron niveles de pérdidas relativas en el área de estudio.

Los resultados confirman la presencia de elevados niveles de pérdidas de suelos a mediano plazo (promedio para 55 años) asociados al área de estudio que afectan además zonas sin actividad agrícola, con cobertura vegetal perenne y baja pendiente. A su vez confirma la necesidad de continuar el programa de medidas de conservación de suelos que permita mitigar los impactos negativos de la erosión hídrica.

Conclusiones

1. Las concentraciones de ^{137}Cs , caracterizaron el estado de la erosión del suelo en el área de estudio a mediano plazo, confirmando deposición de suelo a causa de los beneficios de las medidas antierosivas implementadas al obtenerse valores altos de redistribución en esta área (-30.2 a 41.8) t/ha.a, en comparación con el sitio de referencia (-43.1 t/ha.a).
2. Todos los puntos estudiados se identifican como pérdida de suelo, asociado a que esta técnica estima la erosión de suelo a una escala media de tiempo superior a los 50 años.
3. Mediante un comparativo, se identificaron los beneficios de las medidas antierosivas realizadas en la zona de cultivo en relación a un sitio con ventajas naturales (cobertura vegetal, baja pendiente) donde no están implementadas.
4. La distribución del ^{40}K muestra cierta dependencia/relación directa con los valores de densidad másica de actividad del ^{137}Cs , lo que se asocia a que las pérdidas y ganancias de este nutriente en el suelo, también se vinculan, entre otros, a los fenómenos erosivos.

5. Queda demostrado que el uso de las técnicas nucleares es una herramienta fundamental tanto en la evaluación de las degradaciones del suelo por erosión, como en la valoración de la factibilidad de las medidas de conservación de la Tierra.

Referencias bibliográficas

- [1]. AHMAD MA, RAFIQUE M, IQBAL N, et. al. Study of soil redistribution in cultivated fields using fallout cesium-137 at Fateh Jang, Attock, Pakistan. PINSTECH-214. Pakistan Institute of Nuclear Science and Technology, Islamabad, Pakistan, p 1-30. 2009.
- [2]. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA). Estrategia Ambiental Nacional 2016-2020.
- [3]. Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR). Procedimiento PR/LVRA/03. Tratamiento de las muestras del Laboratorio de Vigilancia Radiológica Ambiental. 2007.
- [4]. FUENTES A, ROSALES DEL TORO U, RODRÍGUEZ D, CASTELLANO N. Polígono Nacional de Conservación de Suelos, Agua y Bosques. Forma de adaptación a los cambios climáticos y de preservación del medio ambiente y los recursos naturales. La Habana: Editorial PALCOGRAF, 2019. ISBN 978-959-285-058-3.
- [5]. GIL R, PERALTA JL, CARRAZANA J, et. al. Aplicación de las determinaciones de ^{137}Cs para evaluar niveles de erosión en suelos agrícolas del Occidente de Cuba. Nucleus. 2004; (36): 23-27.
- [6]. GIL R, PERALTA JL, CARRAZANA J, et. al. Metodología para evaluar la erosión en suelos cultivados, aplicando la técnica del ^{137}Cs . Revista Contribución a la Educación y la Protección del Medio Ambiente. 2004; 5: 1-13.
- [7]. GUZMÁN G, QUINTON JN, NEARING MA, et. al. Sediment tracers in water erosion studies: current approaches and challenges. Journal of Soil and Sediments. 2013; (4): 816- 833.
- [8]. IURIAN A, MABIT L, BEGY R, COSMA C. Comparative assessment of erosion and deposition rates on cultivated land in the Transylvanian Plain of Romania using ^{137}Cs and ^{210}Pb . J Environ Radioact. 2013; 125: 40-49.
- [9]. LI HAO, ZHANG X; WANG K & WEN A. Assessment of sediment deposition rates in a karst depression of a small catchment in Huanjiang, Guangxi, southwest China, using the cesium-137 technique. Journal of Soil and Water Conservation. 2010; 65(4): 223-232.
- [10]. LI S, LOBBA DA, TIESSENAC KH, McCONKEY B. Selecting and applying cesium-137 conversion models to estimate soil erosion rates in cultivated fields. J Environ Quality. 2010; 39(1): 204-219.
- [11]. MABIT L, KLIK A. Assessment of erosion and deposition rates within an Austrian agricultural watershed by combining ^{137}Cs , ^{210}Pb and conventional measurements. Geoderma. 2009; (150): 231-239.
- [12]. MABIT L. Erosion/disposition data derived from fallout radionuclides (FRNS) using geostatistics. In: Impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality. IAEA-TECDOC 1665. Vienna: IAEA, 2011. p 185-194.
- [13]. PORTO P, WALLING D, CAPRA A. Using ^{137}Cs and ^{210}Pb measurements and conventional surveys to investigate the relative contributions of interrill/rill and gully erosion to soil loss from a small cultivated catchment in Sicily. J Soil & Tillage Reviews. 2014; 135: 18-27.
- [14]. PSCHULLER P, CASTILLO A, WALLING D, IROUME A. Use of fallout caesium-137 and beryllium-7 to assess the effectiveness of changes in tillage systems in promoting soil conservation and environmental protection on agricultural land in Chile. In: Impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality. IAEA-TECDOC 1665. Vienna: IAEA, 2011. p 241-257.
- [15]. RAFIQ M, AHMAD M, IQBAL N, et. al. Assessment of soil losses from managed and unmanaged sites in a subcatchment of Rawal Dam, Pakistan using fallout radionuclides. In: Impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality. IAEA-TECDOC 1665. Vienna: IAEA, 2011. p 73-86.
- [16]. RIVEROL M, PEÑA F, FUENTES A. Programa nacional de mejoramiento y conservación de suelos. Instituto de Suelo. Ministerio de la Agricultura. La Habana: Agrinfor, 2001. p. 1-40. ISBN 959-246-042-6.
- [17]. SIBELLO R, FEBLES J. Estudio de la erosión de los suelos en áreas protegidas de Cienfuegos, utilizando el cesio 137 como radiotrazador. Nucleus. 2011; (50): 31-35.
- [18]. WALLING D, ZHANG X, QUINE HE. Models for converting measurements of environmental radionuclide inventories (^{137}Cs , Excess ^{210}Pb , and ^7Be) to estimates of soil erosion and deposition rates (Including Software for Model Implementation). Report to IAEA. EX4 4RJ U.K. Department of Geography. University of Exeter, Exeter, 2007. p1-182.

Recibido: 06 de octubre de 2022

Aceptado: 18 de octubre de 2022

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

CRedit / Conceptualización: Yanna Llerena Padrón, José L. Peralta Vital, Reinaldo Gil Castillo. **Fuentes:** Yanna Llerena Padrón, José L. Peralta, Reinaldo Gil Castillo, Yusleidy M. Cordoví Miranda. **Software:** Yanna Llerena Padrón, Reinaldo Gil Castillo. **Análisis formal:** Yanna Llerena Padrón, José L. Peralta Vital. **Supervisión:** Yanna Llerena Padrón, José L. Peralta Vital, Reinaldo Gil Castillo. **Validación:** Yanna Llerena Padrón, José L. Peralta Vital, Reinaldo Gil Castillo, Andrés Fuentes Soto. **Investigación:** Yanna Llerena Padrón, José L. Peralta Vital, Reinaldo Gil Castillo, Yusleidy M. Cordoví Miranda. **Visualización:** Yanna Llerena Padrón, José L. Peralta Vital, Reinaldo Gil Castillo, Yusleidy M. Cordoví Miranda. **Metodología:** Yanna Llerena Padrón, José L. Peralta Vital, Reinaldo Gil Castillo, Yusleidy M. Cordoví Miranda. **Escritura – borrador original:** Yanna Llerena Padrón, Reinaldo Gil Castillo. **Redacción – revisión y edición:** Yanna Llerena Padrón.