

Erosión en la cuenca del río Yaguanabo usando Cesio-137 como radiotrazador

Erosion in the basin of the Yaguanabo river using Cesium-137 as radiotracer

Rita Y. Sibello Hernández¹, J. M. Febles González²

1. Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos. Carretera Castillo de Jagua - Km. 1 1"2. Cienfuegos, Cuba.

2. Universidad Agraria de La Habana, Autopista Nacional y Carretera de Tapaste, San José de las Lajas, a Habana, Cuba.

E-mail: rita@cea.cu; febles@ish.edu.cu

RESUMEN. Hoy día cobra gran fuerza a nivel internacional lo relacionado con la protección de los recursos naturales, lo cual conduce inexorablemente al desarrollo de proyectos de Ordenación Integral de Cuencas Hidrográficas en el país. La presente investigación tuvo como objetivo cuantificar los procesos erosivos en la cuenca hidrográfica de Yaguanabo, catalogada como un Área Protegida de la región central, donde la deforestación aunada al desarrollo ganadero ha reforzado el desarrollo de los procesos erosivos, así como la pérdida del hábitat de varias especies en estos frágiles ecosistemas de laderas. La erosión fue cuantificada aplicando la técnica nuclear del Cesio – 137 (¹³⁷Cs), la cual fue previamente validada, quedando demostrada su factibilidad y aplicabilidad. Complementariamente fueron empleados el Modelo Proporcional y el Modelo de Balance de Masa Simplificado, obteniendo valores de pérdidas de suelos de 20,13 y 29.70 t/ha/año respectivamente; para obtener un valor promedio de 24.91±6.77 t/ha/año. Estos resultados constituyen la base para el reordenamiento integral de la cuenca.

Palabras clave: Cesio-137, cuenca, erosión, río Yaguanabo.

ABSTRACT. Today's have great importance at international level the related with the protection of the natural resources, that which leads to the development of projects of Integral Ordination of Basins hydrographics in Cuba. The present investigation had as objective to quantify the erosive processes in the basin hydrographic of Yaguanabo, classified as a Protected Area of the central region, where the deforestation joined to the cattle development has reinforced the development of the erosive processes, as well as the loss of the habitat of several species in these fragile ecosystems of hillsides. The erosion was quantified applying the nuclear technique of the Cesium-137 (¹³⁷Cs), which was previously validated, being demonstrated its feasibility and applicability. Complementarily they were employees the Proportional Pattern and the Pattern of Simplified Balance of Mass, obtaining values of losses of soils of 20,13 and 29.70 t/ha/year respectively; to obtain a value average of 24.91±6.77 t/ha/year. These results constitute the base for the integral marshaling resources of the basin.

Key words: Cesium-137, basins, erosion, Yaguanabo river

INTRODUCCIÓN

La erosión acelerada de los suelos y unida a ella la degradación de la tierra, representan un problema serio para la intensificación de una producción agrícola sostenible. Esto es particularmente caótico en los países en vías de desarrollo, caracterizados por tierras limitadas y recursos hídricos limitados y un rápido crecimiento poblacional (Lal, 2000; Walling, 2002; Zapata, 2003). La erosión de los suelos y la deposición de sedimentos asociados son procesos naturales, pero estos pueden ser acelerados por la intervención humana a través de la deforestación, el pastoreo y malas prácticas de

cultivos. Estas no sólo causan la degradación de un recurso natural en el lugar; pero también ocasionan problemas en otros sitios, como por ejemplo el arrastre de sedimentos y deposición en embalses de agua, trae consigo pérdidas de la capacidad de almacenamiento de los embalses y la eutrofia de las aguas (Clark, 1985; Ritchie y McHenry, 1990).

En la cuenca del río Yaguanabo, en la provincia de Cienfuegos, Cuba, hay evidencias de los procesos erosivos, quedando al descubierto en algunos casos, el lecho de roca madre. La erosión, en este contexto,

ha sido incrementada por la deforestación aunada al desarrollo ganadero y por la presencia de un ecosistema de ladera. Por otra parte, el arrastre de sedimentos, tiene también un impacto significativo en la Barrera Coralina vinculada a los puntos de Buceo del Centro Turístico Villa Guajimico. Por tales motivos, en el marco de este trabajo, nos propusimos como objetivo principal, cuantificar las pérdidas de suelo en una parcela dedicada al autoconsumo, un área representativa de la cuenca. El conocimiento de los valores de las tasas de erosión nos posibilita saber la magnitud del problema y rediseñar planes de manejo que minimicen la erosión y logren una ordenación integral de la cuenca y ayuden por tanto a proteger al medio ambiente. Con este fin, se aplicó la técnica del Cesio-137 (^{137}Cs), que es un radionucleido artificial, presente en el medio

MATERIALES Y MÉTODOS

Síntesis de las Bases de la Técnica del ^{137}Cs para Cuantificar la Erosión.

La técnica que usa al ^{137}Cs como radiotrazador para cuantificar la erosión se basa en el comportamiento de este elemento en el suelo, el cual se fija fuertemente a sus partículas y sólo interviene en su movimiento la movilidad física del suelo. En un suelo virgen, que no haya sido afectado ni por la erosión ni por el depósito, el inventario total de ^{137}Cs en ese sitio, debe corresponderse con el total de ^{137}Cs depositado en el mismo. Estos lugares son denominados Sitios de Referencia y el Inventario Total de ^{137}Cs determinado es reconocido como Inventario de Referencia. Para cuantificar las pérdidas o ganancias de suelo en un lugar determinado, es suficiente con establecer el inventario total de ^{137}Cs en ese sitio y por comparación con el inventario de referencia establecido para un sitio de referencia lo más cercano posible al lugar de estudio se puede inferir si es un sitio erosionado (menor inventario que el de referencia) o si es un sitio de depósito (mayor inventario). Luego aplicando modelos matemáticos es posible cuantificar las pérdidas de suelo (Walling; He y Appleby, 2002).

Características generales del área de estudio

La Cuenca del río Yaguanabo posee una extensión territorial de 42,6 Km² y está enmarcada entre las

coordenadas 225 500 y 234 500 de Latitud Norte y 580 250 y 586 250 de Longitud Oeste, limitando al sur con la Cuenca del Río San Juan y el mar Caribe y al este con la cuenca del Río Hondo. Se localiza al sureste de las alturas de Trinidad pertenecientes al grupo Guamuahaya. La temperatura media anual es de 25,8^oC y tiene una precipitación media anual de 1400mm. Esta área está caracterizada por la presencia de un típico valle intramontano, bien conformado, de origen tectónico fluvial, con un relieve muy diseccionado donde el río principal corre por la zona central. La red de drenaje pluvial está bien definida.

La parte baja del Valle posee altimetría entre 0 y 150 m caracterizado por ser una llanura muy ondulada y diseccionada con índice de erosión fluvial altos. Bordeando la llanura se encuentran alturas bajas desde los 250 m hasta 700 m siendo la parte Este la más elevada con pendientes abruptas y escarpes. Las pendientes oscilan alrededor del 20%. Gran parte de las laderas están degradadas por el pastoreo que ha intensificado los procesos erosivos con pérdidas considerables de suelos (ENPA, 1993).

Selección del Sitio de Referencia en Yaguanabo.

Como la selección de un sitio de referencia en la práctica es algo difícil, lo más recomendable es seleccionar más de un sitio que pudiera ser de referencia. (tabla 1)

Tabla 1. Características de los sitios seleccionados como posibles sitios de referencia

Sitio	Ubicación
Referencia 1	Latitud: 229-500 Longitud: 585-385
Referencia 2	Latitud: 229-240 Longitud: 584-600
Tipo de Suelo	
$IXA3_3 \frac{P^3 h^3 e^3}{f c_3 W_4} 33t_3 m_4$	

Selección del Sitio de Estudio.

Se seleccionó un Área de Autoconsumo por localizarse en el área de mayor impacto antrópico, donde además se encuentran representadas las dos actividades fundamentales desarrolladas en la Cuenca del Yaguanabo: ganadería y cultivos varios.

El Área de Autoconsumo abarca una extensa área prácticamente en el centro del valle, convirtiéndola en lo más representativo dentro del contexto de los diferentes mosaicos de suelo existentes en el área.

Toma de muestras de suelo.

Para cuantificar la erosión del suelo utilizando la tecnología que usa al ^{137}Cs como radiotrazador, es necesario tomar muestras de suelo en todo el perfil que contenga a este radionuclido. Por otra parte, el muestreo de suelo en dichos perfiles por capas pequeñas nos permite determinar la distribución de ^{137}Cs en toda la profundidad del suelo y la misma varía según se trate de un suelo virgen, erosionado o de depósito. Por tales motivos las muestras de suelo fueron tomadas con incrementos de la profundidad de 2,5 cm o de 5 cm, hasta completar todo el perfil deseado a muestrear.

Preparación de las muestras

Todas las muestra fueron desagregadas y secadas en la estufa a $60^{\circ}\text{C}/24$ horas, se trituraron con ayuda de un mortero y tamizaron a través de una malla de 2 mm. Cada una de las fracciones fue pesada y de la fracción fina se tomó una muestra de 50 g, para su medición.

Medición de las muestras y cálculo de actividades

Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Ensayos Ambientales del Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, en un espectrómetro gamma con detector HpGe; previamente calibrado para determinar la actividad de ^{137}Cs en la energía de 661.8 Kev de sus cuantos gamma. Como geometría de medición se utilizó un envase cilíndrico plástico hermético, de diámetro 54 mm y altura 20 mm, el cual se colocó encima del detector. Durante la colección de los espectros se emplearon tiempos de medición superiores a los 60 000 s. El procesamiento de los espectros se realizó con el software Silena, que incluye la identificación de picos y cálculo de áreas. El cálculo de las actividades se realizó con una hoja de cálculos sobre EXCEL y previamente validada.

A partir de esta actividad se calculó el inventario de ^{137}Cs para cada muestra de suelo correspondiente a una profundidad de suelo dada, según la ecuación (1).

$$\text{IM} = (\text{AESM} * \text{CPF}) / \text{ASH} \quad (1)$$

Donde:

IM inventario de ^{137}Cs de la muestra (Bq/m^2)

AESM actividad específica de la muestra entregada para el análisis espectrométrico Bq/kg .

CPF: peso corregido de la fracción fina de la muestra (kg).

$\text{CPF} = \text{PT} - \text{PG}$

PT: Peso Total de la muestra seca.

PG: Peso de la fracción gruesa.

ASH: Area superficial horizontal de la muestra.

El residuo porcentual X (%) ofrece cualitativamente la pérdida o ganancia de ^{137}Cs y de suelo en el sitio referenciado (redistribución actual de suelo) y se determinó como:

$$X (\%) = (\text{I} - \text{I}_{\text{ref}}) / \text{I}_{\text{ref}} * 100,$$

Donde:

I es el inventario de ^{137}Cs en el sitio estudiado.

I_{ref} es el inventario de ^{137}Cs en el sitio de referencia.

Selección de los Modelos Matemáticos para la cuantificación de la erosión.

Se aplicaron dos modelos para suelos cultivados, cuyas consideraciones, ventajas y limitaciones están bien identificadas (Walling; He y Appleby, 2002).

Modelo Proporcional

$$Y = 10 \frac{BdX}{100T}$$

Donde:

Y = pérdida anual de suelo ($\text{t}/\text{ha}/\text{año}$)

d = profundidad del arado (m).

B = densidad del suelo (kg/m^3).

T = tiempo transcurrido desde el inicio de la acumulación del ^{137}Cs (años).

X = por ciento de reducción del inventario total de ^{137}Cs .

Modelo Balance de Masa Simplificado

$$Y = \frac{10dB}{P} \left[1 - \left(1 - \frac{X}{100} \right)^{1/(t-1963)} \right]$$

Donde:

Y = pérdida media anual de suelo ($\text{t}/\text{ha}/\text{año}$).

d = profundidad del lecho cultivado (m).

B = densidad del suelo (kg/m^3).

X = por ciento de reducción del inventario total de ^{137}Cs .

P = factor de corrección del tamaño de las partículas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla. No 2. se reportan los inventarios de ^{137}Cs por profundidad del suelo en los sitios seleccionados como referencias.

Tabla 2. Distribución del inventario del ^{137}Cs en los perfiles de suelo de los posibles sitios de referencias

Profundidad [cm]	Inventario de Cs-137 [Bq/m ²]	
	Referencia 1	Referencia 2
2.5	117.58±25.99	147.78±27.24
5	60.73±17.03	148.67±27.31
7.5	155.82±34.83	215.70±40.45
10	56.46±18.47	168.25±29.04
12.5	31.01±15.84	213.67±31.54
15	110.85±30.99	47.47±15.60
17.5	80.64±40.64	66.83±33.87
20	28.53±9.57	48.68±24.53
22.5	79.18±39.90	79.10±22.82
25	22.77±7.38	25.00±12.60
27.5	39.41±19.86	
30	8.10±4.23	
35		
Inven. Total	791.09±25.05	1161.15±25.22

De los posibles sitios de referencia se analizó la distribución de ^{137}Cs con los incrementos de profundidad y se determinó que sólo constituye un verdadero sitio de referencia el Referencia 2, con un Inventario Total de Referencia de 1161.15 ± 25.22 Bq/m². En la Fig 1. se representa gráficamente la distribución de ^{137}Cs en todo el perfil de suelo, obsérvese la curva exponencial decreciente con el incremento de la profundidad, típica de los suelos donde no ha ocurrido ni la erosión ni el depósito. Para el Referencia 1, se observa cierta homogenización en los primeros 20 cm de suelo, lo cual puede ser indicativo del laboreo del suelo y uso del arado.

En la Tabla No.3 se reportan los resultados de la distribución del inventario de ^{137}Cs en los perfiles de los puntos muestreados, en toda el área de la parcela del Área de Autoconsumo, seleccionada para cuantificar la erosión usando el ^{137}Cs como radiotrazador. De estos valores es evidente, que en la mayoría de los puntos de muestreo, los inventarios de ^{137}Cs son menores que el inventario de referencia, lo cual infiere que las pérdidas de suelo es el proceso predominante en la parcela estudiada. (Tabla 3)

Tabla 3. Distribución del inventario de Cesio-137 por perfiles en los puntos ubicados en la parcela de estudio

Prof- [cm].	Inventario de Cesio-137 [Bq/m ²].										
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6	Punto 7	Punto 8	Punto 9		
5	209.43±48.74	82.34±19.91	2.09±1.05	167.70±43.73	65.09±17.07	219.24±23.61	52.08±25.87	404.74±92.90			
10	361.59±69.82	126.15±39.06	46.02±12.92	349.81±64.46	127.52±31.09	225.02±41.97	71.45±18.25	367.13±71.13	376.74±133.81		
15	239.78±53.45	80.23±40.72	211.16±53.8	285.66±61.79	42.99±14.40	93.40±18.67	121.14±57.75	201.83±74.41			
20	231.17±56.40	127.45±33.83	108.81±55.24	72.94±36.76	74.64±21.04	378.83±33.61	68.68±35.04	204.40±64.49	93.12±46.93		
25	128.50±37.19	45.73±23.34	176.22±41.08	90.05±45.38	54.25±26.95	172.53±23.93	119.93±57.27	133.54±69.75	77.25±43.48		
30	286.32±52.73	59.32±29.89	48.17±24.27	51.50±25.95							
35											
Total	1456.80±53.93	521.22±32.05	592.46±37.40	1017.66±48.25	364.49±22.95	1089.01±29.56	433.28±42.06	1311.65±75.17	547.11±85.63		

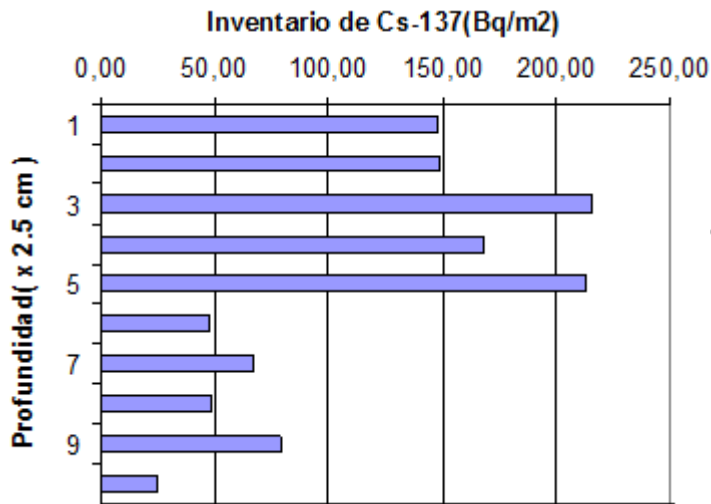


Figura 1. Distribución del inventario de Cesio-137 en el sitio de referencia. Obsérvese la distribución exponencial decreciente con el aumento de la profundidad

De los valores mostrados en la Tabla 4 referentes al porcentaje de redistribución X (%) de ¹³⁷Cs, se infiere también la redistribución del suelo, teniendo en cuenta que la magnitud y dirección de la desviación medida desde los niveles de referencia locales proveen de una estimación cualitativa de la redistribución de suelo (Walling y Quine, 1993). El signo “+” significa depósito de suelo y el signo “-” erosión de suelo.

Tabla 4. Redistribución de suelo en la parcela estudiada y cuantificación de la erosión utilizando diferentes modelos matemáticos

Punto de Muestreo	Actividad Total de Cs-137 (Bq/kg)	Inventario Total de Cs-137 [Bq/m ²]	Redistribución de Suelo X[%]	Pérdida de suelo [t/ha/año]	
				Modelo Proporcional	Balace de Masa Simplificado
1	20.17	1456.80	+25.46	20.13	29.70
2	8.04	521.22	-55.11		
3	7.54	592.46	-48.98		
4	13.7	1017.66	-12.36		
5	5.57	364.49	-68.60		
6	14.1	1089.01	-6.21		
7	6.19	433.28	-62.68		
8	19.54	1311.65	+12.96		
9	4.32	547.11	-52.88		
Valor Medio	11.02	814.85		24.91±6.77	

En este estudio, para convertir las mediciones de ¹³⁷Cs a estimados cuantitativos de las tasas de erosión y depósito, usamos el Modelo Proporcional y el Modelo de Balance de Masa (Walling; He y Appleby, 2002). Estos modelos son fáciles de usar y sólo requieren los valores de los inventarios de ¹³⁷Cs, conocer la profundidad del arado y la densidad del suelo. También tienen algunas limitaciones, como es el caso que no tienen en consideración la remoción del ¹³⁷Cs antes que se incorpore al lecho arado, lo cual puede traer consigo una sobre estimación de las pérdidas de suelo. El Modelo de Balance de Masa aventaja al Modelo Proporcional en otra de sus limitaciones y es que tiene en cuenta la dilución del ¹³⁷Cs debido a la incorporación de las capas inferiores del suelo con menor o ningún

contenido de ¹³⁷Cs, pero asume que la total deposición del ¹³⁷Cs ocurrió en 1963 en lugar de todo el período desde 1954 a la mitad de 1970. En la Tabla No. 4 se muestran los resultados obtenidos de la estimación de las pérdidas de suelo mediante la aplicación de estos modelos. De los valores presentados podemos decir que los valores obtenidos por ambos modelos arrojan pérdidas de suelo en el mismo orden de grandeza.

A pesar de las limitaciones de estos modelos, los valores obtenidos proporcionan un patrón confiable de las tasas de erosión y deposición en la cuenca y permiten demostrar el impacto del sistema de manejo y de las prácticas agrícolas en los procesos erosivos del área.

CONCLUSIONES

Con la aplicación de la tecnología nuclear fue suficiente un muestreo de suelo según la estrategia prevista para este fin y las correspondientes mediciones gamma espectrométricas para la determinación de los inventarios de ^{137}Cs en los perfiles de suelo estudiados y finalmente la aplicación adecuada de los modelos matemáticos para la cuantificación de las pérdidas de suelo. Fueron determinadas de una manera rápida pérdidas de suelo de 24.91 ± 6.77 t/ha/año en la parcela seleccionada como representativa de la cuenca Yaguanabo. La aplicación de la técnica del ^{137}Cs para estimar las pérdidas de suelo tiene el mérito de poner en relieve el impacto de las prácticas agrícolas y de contribuir a evaluar las tasas de erosión en un período de tiempo prolongado para áreas donde otros datos cuantitativos son escasos. La subestimación de las tasas de erosión derivadas del Modelo Proporcional en comparación con las obtenidas por el Modelo de Balance de Masa, indican claramente la influencia de los efectos de dilución del suelo en el lecho arado por suelos de las capas más bajas de la profundidad del arado.

sedimentation investigations. Chapter 7. Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation using Environmental Radionuclides. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2002.

7. Walling D.E. Recent advances in the use of environmental radionuclides in soil erosion investigations. [Proceedings of the FAO/IAEA International Symposium on Nuclear Techniques in Integrated Plant Nutrient, Water and Soil Management, Vienna, Austria], 279-301, 2002. IAEA C & S Paper Series 11/P, Vienna, Austria.

8. Zapata F. and García Agudo E. Future prospects for the ^{137}Cs technique for estimating soil erosion and sedimentation rates. *Acta Geológica Hispánica*, 35, n^o 3-4, 197-205, 2000.

9. Zapata F. The use of environmental radionuclides as tracers in soil erosion and sedimentation investigations: recent advances and future developments. *Soil & Tillage Research*, 69, 3-13, 2003.

Recibido: 11/01/2010

Aceptado: 15/11/2010

BIBLIOGRAFÍA

1. Clark II E.H. The off-site cost of soil erosion. *J. Soil Water Conserv.* 40, 19-22, 1985.
2. ENPA. Plan de Manejo Integral del Valle Yaguanabo, 1993.
3. Lal R. Soil management in the developing countries. *J. Soil Sci.*, 165, 57-72, 2000.
4. Ritchie J.C., McHenry J.R. Application of Radioactive Fallout Cesium-137 for Measuring Soil Erosion And Sediment Accumulation Rates and Patterns: A Review. *J. Environ. Qual.*, 19, 215-233, 1990.
5. Sibello Hernández R. Determinación del impacto de la erosión en los suelos usando el Cesio-137 como radiotrazador. Tesis de Maestría en Ingeniería en Saneamiento Ambiental. Facultad de Química Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, 2003.
6. Walling D.E; He.Q. y Appleby. Conversion Models for use in soil-erosion, soil-redistribution and