

CUANTIFICACIÓN DE LA EROSIÓN DE LOS SUELOS EN ZONAS DE INTERÉS ECONÓMICO Y AMBIENTAL DE LA PROVINCIA DE CIENFUEGOS, CUBA, UTILIZANDO EL CESIO-137 COMO RADIOTRAZADOR

R. Y. SIBELLO HERNÁNDEZ¹; J. M. FEBLES GONZÁLEZ²

1. Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, Carretera Castillo Del Jagua km 1 ½, Ciudad Nuclear, Cienfuegos. C.P. 59 350. Teléfono: (5343). 965566. E - mail: rita@ceac.cu
2. Universidad de La Habana, Zapata y G, Vedado, Plaza de la Revolución, La Habana, C.P: 10 400. Teléfono: (537). 8702060. E - mail: febles@rect.uh.cu

Resumen

El presente trabajo está sustentado en los resultados obtenidos de la investigación durante más de una década (1999 - 2012), dedicada a uno de los problemas ambientales de mayor importancia a nivel global: la erosión de los suelos. El objetivo principal de la investigación fue introducir, en la provincia de Cienfuegos, la técnica nuclear que usa el ¹³⁷Cs como radiotrazador para estudiar los movimientos físicos del suelo. Se demostró la factibilidad de la técnica en nuestras condiciones, enriqueciendo el conocimiento sobre su aplicación en la zona tropical. La técnica del ¹³⁷Cs quedó validada, así como los modelos de conversión utilizados, se obtuvo una buena correspondencia entre los valores obtenidos por esta vía y los obtenidos por otros métodos. Se comprobó que la técnica nuclear es un método dinámico y representativo del sitio de estudio y que posibilita cuantificar de forma retrospectiva las pérdidas de suelo en los últimos 49 años, lo que la hace ventajosa. El uso de la técnica del ¹³⁷Cs posibilitó cuantificar las pérdidas de suelo en zonas de interés económico y ambiental en la provincia de Cienfuegos, poniendo al relieve la utilidad de la técnica para cuantificar la erosión y las potencialidades de extender su uso a otras regiones del país. Los resultados obtenidos durante la investigación contribuyen a la estandarización a nivel nacional del uso de la técnica del ¹³⁷Cs en correspondencia con los protocolos desarrollados internacionalmente con estos fines. Desde el punto de vista económico se evidenció la rentabilidad de su uso.

Palabras clave: suelo, erosión, Cesio -137.

Introducción

La degradación de los suelos se encuentra entre los problemas más apremiantes de la crisis alimentaria mundial. Este deterioro es más acentuado y acelerado en regiones tropicales y subtropicales debido a las interacciones de las características de los suelos y el clima con las prácticas agrícolas (Santana *et al.*, 1999) y las transformaciones de los bosques en sabanas por la influencia antropogénica (Morales *et al.*, 2003).

Únicamente mediante la cuantificación precisa de las tasas de redistribución de suelo se pueden identificar las áreas con mayores pérdidas de suelo, con el objetivo de implementar medidas antierosivas. Los métodos tradicionales utilizados para la cuantificación de la erosión, tienen como principal limitante que por lo general, lo que hacen es correlacionar la pérdida de suelo con alguno de los factores que la originan, lejos de cuantificarla, otros necesitan observaciones prolongadas, dificultando y demorando su aplicación. La utilización de nomenclaturas y técnicas de medición diferentes, han generado problemas de comparación y son frecuentes estimaciones de pérdidas disímiles del estado de erosión de los suelos en el país (Febles, 2007).

La técnica basada en la utilización del ¹³⁷Cs para la cuantificación de la erosión aventaja a los métodos tradicionales (Walling y Quine, 1995). Esta técnica ha sido utilizada satisfactoriamente en diferentes países; sin embargo sobre su uso en las latitudes tropicales la información

Medición de las muestras y cálculo de actividades

Las muestras fueron analizadas en un sistema espectrométrico gamma con detector de alta pureza de germanio HpGe, del tipo NGC 3019, con resolución (FWHM) de 1,9 keV y un 30% de eficiencia relativa para la energía de 1 332 keV de Cobalto – 60 (⁶⁰Co), el mismo fue previamente calibrado para determinar la actividad de ¹³⁷Cs en la energía de 661.8 Kev de sus cuantos gamma. Como geometría de medición se utilizó un envase cilíndrico plástico hermético, de diámetro 75 mm y altura 30 mm, el cual se colocó encima del detector. Durante la colección de los espectros se emplearon tiempos de medición de 24 horas. El procesamiento de los espectros se realizó con el software WIN XP / WINNER 6.0, el cual incluye la identificación de picos y cálculo de áreas.

Cálculo de los inventarios de ¹³⁷Cs

A partir de las actividades medidas se determinan los inventarios según:

$$IM = (AESM \times CPF) / ASH \quad (1)$$

Donde:

IM = inventario de ¹³⁷Cs de la muestra (Bq m⁻²).

$AESM$ = actividad específica de la muestra entregada para el análisis espectrométrico (Bq kg⁻¹).

CPF = Peso corregido de la fracción fina de la muestra (kg).

$$CPF = PT - PG$$

PT = Peso total de la muestra seca (kg).

PG = Peso de la fracción gruesa (kg).

ASH = Área superficial horizontal de la muestra (m²).

Modelos de conversión utilizados en este trabajo

Los modelos de conversión utilizados fueron: el modelo proporcional, el modelo de aproximación gravimétrica y el modelo de balance de masa simplificado (Walling y He, 2001).

b) Métodos predictivos

- Modelo MMF (Morgan, Morgan y Finney 1984 y Morgan, 2001)

Este modelo ha sido desarrollado para predecir las pérdidas anuales de suelo en parcelas de dimensiones limitadas situadas en laderas. (Morgan et al. 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Validación de la técnica del ¹³⁷Cs como radiotrazador para cuantificar las pérdidas de suelos por erosión

En la Tabla 1 se muestran los resultados de la actividad específica y el inventario del ¹³⁷Cs en suelos ubicados en diferentes sectores de la ladera.

Tabla 1. Valores obtenidos de la actividad específica de ¹³⁷Cs en suelos ubicados en diferentes sectores de la ladera. Microcuenca No.2 de Barajagua.

Prof. (cm)	Cima		Sector superior de la ladera		Sector inferior de la ladera		Depósito	
	Actividad Espec. (BqKg ⁻¹)	Inventario (Bq m ⁻²)	Actividad Espec. (BqKg ⁻¹)	Inventario (Bqm ⁻²)	Actividad Espec. (BqKg ⁻¹)	Inventario (Bqm ⁻²)	Actividad Espec. (BqKg ⁻¹)	Inventario (Bqm ⁻²)
5,00	<0,09	<8,90	4,49±1,12	254,62±65,49	5,23±0,91	267,54±49,49	4,48±0,83	128,32±25,10

10,00	<0,58	<29,81	4,61±0,95	345,38±74,41	3,51±0,68	214,14±43,61	3,60±0,67	237,32±46,62
15,00	<1,48	<94,65	1,54±0,46	119,67±36,53	3,08±0,71	207,58±49,60	5,76±1,15	450,92±94,38
20,00	1,46±0,38	93,14±24,94	0,88±0,26	61,34±18,53	2,96±0,67	264,30±62,09	3,48±0,74	257,12±57,01
25,00	0,97±0,25	82,58±21,91			0,73±0,20	62,15±17,47	3,20±0,66	238,22±51,36
30,00	<0,01	<0,80			1,32±0,31	87,16±27,05	2,83±0,60	282,04±62,37
35,00					0,36±0,05	25,30±3,70	6,16±0,60	422,76±49,00
40,00							0,15±0,04	10,05±3,07
Total		200±50		800±90		1100±90		2100±80

A partir de estos valores se aplicó el modelo proporcional, obteniendo así las tasas de redistribuciones de suelo y la distribución espacial de ^{137}Cs en la microcuenca de Barajagua (Tabla 2).

Tabla 2. Estimación de la erosión ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$), en la subcuenca de Barajagua aplicando el modelo proporcional.

Sectores de muestreo	Residuo porcentual ($I - I_{\text{ref}} / I_{\text{ref}} \cdot 100^*$)	Erosión estimada ($\text{t ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$) Modelo proporcional
Cima (interfluvio)	-85,62	-37,0 ± 0,8
Parte superior de la ladera	-36,08	-16,0 ± 2,0
Parte media de la ladera	-7,67	-3,0 ± 0,9
Parte inferior de la ladera (depósito)	+65,87	+29,0 ± 0,1

* I, I_{ref} son el inventario total y de referencia respectivamente.

En efecto, es posible advertir que se han perdido como promedio en un período de 42 años (1963 – 2005) $37,00 \pm 0,80 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$ de suelo que sobrepasan los valores umbrales de tolerabilidad de pérdidas establecidos por Soil Survey Staff (1984) y Mc Cormack *et al.*, (1982) y con los estudios realizados en este mismo territorio por Riverol *et al.*, (1999).

El valor obtenido aplicando la técnica nuclear $37,00 \pm 0,80 \text{ t ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$, se encuentra dentro del intervalo reportado por la Estación de Barajagua y muy próximo al valor promedio reportado (Riverol, 1999). Esto demuestra la factibilidad de la técnica que emplea el ^{137}Cs como radiotrazador para cuantificar las pérdidas de suelo en la región tropical y la validez de la metodología y el modelo matemático empleado en este caso.

Estimación de las pérdidas de los suelos Pardos Grisáceos Típicos, según el modelo de erosión MMF, en la Estación Experimental Escambray

▪ **Estimación de la tasa de erosión por impacto (F)**

Para ello se evaluaron las ecuaciones de F y de G en el modelo de Morgan *et al.*, (1984), Tabla 3.

Tabla 3. Estimación de las pérdidas de suelos por desprendimiento por salpicadura F y por la capacidad de transporte del flujo superficial G

Año	Precipitación anual R (mm)	Días de lluvia R _n	Energía de la lluvia E (J/m ²)	Desprendimiento por salpicadura F (t ha ⁻¹)	Capacidad transporte del flujo superficial G (t ha ⁻¹ año ⁻¹)
EFFECTOS DE LA EROSIÓN SIN MEDIDAS ANTIEROSIVAS					
1981	1365,5	77	32,86	51,32	56,98
1982	1131,1	77	27,22	42,51	26,86
1983	1384,2	94	33,30	52,02	40,44
1984	1110,9	62	26,73	41,75	38,42
1985	1364,3	84	32,83	51,27	48,16
1986	1207,2	67	29,05	45,37	45,83
1987	1819,2	88	43,77	87,79	26,38
1988	2541,9	98	61,16	122,66	155,64
1989	1348,9	96	32,46	90,09	48,52
1990	1503,2	107	36,17	100,39	60,23
APLICACIÓN DE MEDIDAS ANTIEROSIVAS					
1991	1392,4	105	33,50	67,19	6,14
1992	1046,2	80	25,17	50,48	3,34
1993	1673,7	107	40,27	80,77	13,13
1994	1470,5	86	35,38	70,96	12,21
1995	1529,9	91	36,81	73,83	12,77
1996	1887,1	102	45,41	91,07	9,26
1997	1434,0	84	34,50	53,89	4,54
1998	1448,0	70	34,84	54,42	3,73
1999	1990,1	96	47,89	96,04	4,25

Para calcular F y G se requiere del cálculo previo de algunos parámetros, para lo cual se tuvo en cuenta los datos reportados por la Estación Experimental de Barajagua y valores reportados por Recursos Hidráulicos, referidos a la cobertura edáfica y las precipitaciones respectivamente para el período (1981-1999) y otros parámetros fueron estimados a partir de las tablas de valores propuestas por los autores del modelo.

Estos valores de pérdidas de suelos coinciden con los reportados por Riverol *et al.*, (1999), que arrojaron pérdidas de hasta 60 t ha⁻¹ año⁻¹ y que sobrepasan los límites permisibles en términos de erosión (Garduño, 1977), indicando la intensidad que ha alcanzado el proceso erosivo.

Los resultados obtenidos en la aplicación del modelo MFF (Morgan *et al.* 1984 y Morgan 2001), fueron comparados con otros métodos (Tabla 4) y las magnitudes de pérdidas de suelos fueron similares, lo que confirma la posibilidad de su utilización en estos ambientes de laderas, como en otros similares de Cuba.

De los valores calculados por el modelo MMF de pérdidas de suelos se infiere que el valor medio anual para el período 1981 - 1999 fue de 32, 4 t ha⁻¹ año⁻¹. Este valor está en el mismo orden que

el determinado por el método del ^{137}Cs obtenido por Sibello (2005), y dentro del rango de pérdidas de suelos reportadas por Riverol (1999), demostrando la validez de los métodos.

Tabla 4 Evaluación de la erosión actual mediante la aplicación de los diferentes métodos en la Estación Experimental Escambray.

Estudio en parcelas de escurrimiento (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Aplicación de la técnica de ^{137}Cs (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	Modelo erosión MMF (t ha ⁻¹ año ⁻¹)
20 – 60	37,00 ± 0,80	G = 32,47

Toda vez que la técnica nuclear quedó validada se utilizó para estimar los valores de erosión en sitios de interés económico y ambiental de Cienfuegos, en la Tabla 5 se reportan los resultados de la redistribución del suelo en los sitios seleccionados como representativos del área protegida Guanaroca.

El valor estimado de las pérdidas de suelo por erosión natural: 10,0 ± 1,0 t ha⁻¹año⁻¹, en una parcela con pendiente representativa del área (60°), con vegetación natural de arbustos silvestres, es superado por el valor estimado para un suelo cultivado sin inclinación: 23,0 ± 7,0 t ha⁻¹año⁻¹. Estos valores se corresponden con la clasificación de erosión baja y erosión moderada, respectivamente, de acuerdo a la evaluación brindada por FAO (1980).

En el área de Yaguanabo se aplicó la técnica nuclear en una parcela cultivada y en otra no cultivada. En la parcela no cultivada se obtuvieron valores de pérdidas de suelo ligeramente inferiores (-16.0 ± 2.0 t ha⁻¹año⁻¹), a las pérdidas ocurridas en la parcela cultivada (19.0 ± 5.0 t ha⁻¹año⁻¹), aún cuando la pendiente del terreno en el suelo no cultivado era mayor que en la parcela cultivada, lo que corrobora los efectos benéficos de la vegetación, Hammond Bennett (1950), Sandoval et al. (1994), Ellies (2000).

Estos resultados esclarecen la magnitud de los procesos erosivos en las Áreas Protegidas estudiadas, lo cual facilita la propuesta de planes de reordenamiento del uso del suelo más aceptados sobre la base de datos confiables, con los objetivos de combatir las consecuencias negativas de la erosión y lograr la recuperación de los hábitat y ecosistemas dañados, de tanto valor ambiental en las Áreas Protegidas.

Tabla 5. Redistribución de suelo en la parcela estudiada perteneciente al Área Protegida Guanaroca y cuantificación de la erosión utilizando diferentes modelos matemáticos.

Ubicación de puntos de muestreo	Altitud (msnm)	Inventario total de Cs-137 (Bq / m ²)	Redistribución del suelo X (%)	Pérdida de suelo (t ha ⁻¹ año ⁻¹) Modelo de distribución del perfil (suelos no cultivados)
Sector superior de la ladera	108,7	721,16 ± 31,78	-33,70	
Sector superior de la ladera	110,5	914,54 ± 45,25	-15,92	
Sector superior de la ladera	112,1	595,33 ± 28,65	-45,27	

Sector medio de la ladera	100,8	1470,74 ± 45,41	+35,21		
Sector medio de la ladera	--	1261,55 ± 58,69	+15,98		
Sector medio de la ladera	97,5	779,11 ± 26,27	-28,37		
Sector inferior de la ladera		975,66 ± 44,62	-10,30		
Sector inferior de la ladera	80,0	1323,34 ± 45,20	+21,66		
Sector inferior de la ladera	60,7	1663,22 ± 39,01	+52,91		
V.Medio		1078,29			10,0±1,0
Punto 1 campo de maíz	57,5	896,00 ± 45,04	-17,63	M. Proporción.	Balance de Masa Simplif.
Punto 2 campo de maíz	59,2	806,38 ± 44,21	-25,87		
Punto 3 campo de maíz	53,6	555,81 ± 26,17	-48,90		
Punto 4 campo de maíz	49,7	827,92 ± 29,28	-23,80		
Valor Medio		771,53		18,17	27,66
		23,0 ± 7,0			

CONCLUSIONES

- La técnica del ^{137}Cs para la cuantificación de las pérdidas de suelos por erosión y los modelos de conversión utilizados en la provincia de Cienfuegos, mostraron una buena correspondencia con los valores obtenidos por otros métodos, lo cual posibilita su aplicación en ambientes de laderas de Cuba.
- La aplicación del modelo MMF durante una secuencia histórica entre 1981 - 1999 permitió determinar por primera vez, la magnitud de las pérdidas de los suelos Pardos Grisáceos Típicos en ambientes de pre montaña del Escambray, que sobrepasan los límites permisibles de tolerabilidad por erosión.
- En los sitios estudiados fueron determinados valores de erosión correspondientes a la clasificación de baja y moderada hasta valores que sobrepasan los límites de tolerabilidad.

Bibliografía más relevante

Bujan A., Santanatoglia O., Chagas C., Massobrio M., Castiglioni M., Yañez M., Ciallella H., Fernández J. 2000. Preliminary study on the use of the ^{137}Cs technique for soil erosion investigation, in the Pampean Region of Argentina. *Acta Geol. Hispánica* 35, 271-277.

Ellies A. 2000. Soil erosion and its control in Chile. An overview. *Acta Geológica Hispánica*, v. 35, n° 3-4, 279-284.

FAO. 1980. Metodología Provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos, vol. 1, FAO, Roma, Italia, 86.

Febles, J. M.; Vega, M.; Bóveda, M. M., Jerez, L. 2007. Experiencias en la aplicación de indicadores de sostenibilidad agroecológica en comunidades agrícolas de Ibero América.

- Memorias, del Congreso de Agroecología e Agricultura Ecológica en Galiza. ISBN 978 – 84 – 690-4156-7
- Garduño, M. A. 1977. Manual de conservación de suelos y del agua. Colegio de Posgraduados de Chapingo, México, 76 pp.
- Golosov V. 2003. Application of Chernobyl-derived ^{137}Cs for the assessment of soil redistribution within a cultivated field. *Soil & Tillage Research* **69**, 85-98.
- Mc Cormack D.E., Young KK, Kimberlin LW, 1982, Current criteria for determining soil loss tolerance, In: Schmidt BL, Allmaras RR, Mannering JV, Papendick RI (eds), Determinants of soil loss tolerance, ASA Publication N° 45, American Society of Agronomy - Soil Science of America.
- Morales M, Hernández A, Vantour A. 2003. Los cambios globales y su influencia en el contenido de materia orgánica en los suelos de Cuba. *Agricultura Orgánica* 9 (2): 15 – 18.
- Morgan R. P. C., Morgan D.D.V., Finney H. J. 1984. A predictive model for the assessment for soil erosion risk. *J. Agric. Eng. Res.* 30: 245.
- Morgan R.P.C. 1996. Erosión y Conservación del Suelo. ISBN: 84-7114-679-7. España.
- Morgan R.P.C. 2001. A simple approach to soil loss prediction. A revised Morgan – Morgan-Finney model. *Catena* 44 : 305.
- Navas A. 1995. Cuantificación de la erosión mediante el radioisótopo Cesio-137. Sociedad Española de Geomorfología. Geofoma Ediciones. Logroño.
- Ritchie J.C., Ritchie C.A. 2008. Bibliography of publications of caesium-137 studies related to erosion and sediment deposition. USDA. Agricultural Research Service.
- Riverol M. et al. 1999. Informe final del Proyecto “Uso y Manejo de los suelos afectados por la erosión en los agrosistemas de las provincias occidentales y centrales del país”. Programa Nacional Científico-Técnico: Los cambios globales y la evolución del medio ambiente.
- Sandoval M., Peá L., Carrasco P. 1994. Labranza de conservación de suelos en terrenos de lomaje de la precordillera: Cuenca del Río Bio Bio. In. Terceras Jornadas nacionales de Cero Labranza. INIA. Serie Carrillanca 43, 129-139.
- Santana, M. J.; Fuentes, B.; Benítez, L.; Coca, J.; Córdoba, R.; Hernández, S.; Arcia, J.; Hernández, J.; Hernández, I.; y Socarrás, D. 1999. Principios básicos para la aplicación de tecnologías de preparación de suelos en el marco de una agricultura conservacionista y sostenible. INICA-MINAZ -IIMA- CNCA. Cuba. 77p.
- Sibello Hernández R.Y., Cartas Aguila H.A., Martín Pérez J. 2005. Uso del Cesio-137 como radiotrazador en la cuantificación de la erosión en suelos tropicales. *Rev. Nucleus* 38: 19-24.
- Soil Survey Staff. 1984. Procedures for collecting soil samples and methods of analysis for soil survey, Soil Survey Investigations, Report No, **1**, **SCS-USDA**, Gov't, Printing Office, Washington, **D,C.**
- Vega M.B., Febles J.M. 2005. La investigación de los suelos erosionados: Métodos e índices de diagnóstico. *Minería y Geología. Revista de Ciencias de la Tierra.* Volumen 21. Número 2. ISSN 1993-8012.
- Walling D.E., Quine T.A. 1995. The use of fallout radionuclide measurements in soil erosion investigations. IAEA. [Proceedings of the International FAO/IAEA Symposium on Nuclear Techniques in Soil-Plant Studies for Sustainable Agriculture and Environmental Preservation.], 597-619. IAEA, Vienna, Austria. IAEA Proc. Series STI/PUB/947.
- Walling D.E., He. Q. 2001. Models for converting Cesium-137 measurements to estimates of soil redistribution rates on cultivated and undisturbed soil (including software for model implementation). Report to IAEA. Exeter. University of Exeter.