

# Estudio de la erosión mediante el radiotrazador de Cesio 137 en suelos de la unidad geográfica de la laguna de Tiscapa, Managua (Nicaragua)\*


Study of erosion using the Cesium-137 radiotracer in soils of the geographical unit of the Tiscapa Lagoon, Managua (Nicaragua)

Yader Santiago Caballero Arbizú<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación de Recursos Acuáticos (UNAN-Managua/CIRA), Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua).

Correo: [yadercaballero@cira.unan.edu.ni](mailto:yadercaballero@cira.unan.edu.ni).  0000-0002-2742-6103.

**Citar como:** par Caballero Arbizú, Y. S. (2026). Estudio de la erosión mediante el radiotrazador de Cesio 137 en suelos de la unidad geográfica de la laguna de Tiscapa, Managua (Nicaragua). *CITAS*, 12(1), 94-104.

 <https://doi.org/10.15332/24224529.10958>

Recibido: 06/05/2025  
Aceptado: 14/11/2025



## Resumen

La erosión que sufren los suelos a nivel mundial es una grave amenaza para el desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente, pues disminuye la extensión de los suelos agrícolas. La deforestación en áreas de montaña es el principal paso hacia la degradación de los suelos en Nicaragua. En este contexto, la alcaldía de Managua financió esta investigación en la laguna de Tiscapa, ubicada en la parte baja de la ciudad de Managua, con el fin de conocer la redistribución del suelo y estimar la erosión, mediante el uso del radiotrazador de Cesio 137 (<sup>137</sup>Cs). Las muestras de suelo fueron colectadas en transectos en dirección de la pendiente, analizadas en un espectrómetro gamma y, a partir de las actividades de <sup>137</sup>Cs, se utilizó el modelo proporcional para cuantificar las tasas de erosión o deposición de suelos. El comportamiento de la

\*Artículo de investigación. Proyecto de Investigación “Estudio de la dinámica de flujo superficial, subterráneo y tasa de sedimentación de la Laguna de Tiscapa” financiado por la alcaldía de Managua (ALMA) y ejecutado por el Centro de Investigación de Recursos Acuáticos de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN-Managua/CIRA).

redistribución del  $^{137}\text{Cs}$  en las zonas de estudio 1, 2 y 3 mostraron pérdida de suelo entre 0.498 a 1.103 ton ha año<sup>-1</sup>, que corresponde a la clasificación de erosión ligera y constituye una alerta de los procesos erosivos que pueden acelerar el proceso de azolvamiento de la laguna de Tiscapa. Los resultados de esta investigación evidencian el efecto del uso y tipo de suelo, así como la pendiente en las actividades de  $^{137}\text{Cs}$ , en los suelos de la unidad geográfica de la laguna.

**Palabras clave:**

tasa de erosión, radiotrazador, técnica radiométrica, actividades de Cesio 137, pérdida de suelo.

**Abstract**

The erosion suffered by soils worldwide is a serious threat to sustainable development and environmental protection, as it reduces the extent of agricultural soils. Deforestation in mountainous areas is the main step towards soil degradation in Nicaragua. In this context, the Managua city council funded this research in the Tiscapa Lagoon, located in the lower part of the city of Managua, in order to understand soil redistribution and estimate erosion using the Cesium-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) radiotracer. Soil samples were collected along transects in the direction of the slope, analyzed in a gamma spectrometer, and based on  $^{137}\text{Cs}$  activities, the proportional model was used to quantify soil erosion or deposition rates. The behavior of  $^{137}\text{Cs}$  redistribution in study areas 1, 2, and 3 showed soil loss ranging from 0.498 to 1.103 ton ha year<sup>-1</sup>, which corresponds to the classification of light erosion and constitutes a warning of the erosive processes that may accelerate the siltation of Tiscapa Lagoon. The results of this research highlight the effect of land use and soil type, as well as slope, on  $^{137}\text{Cs}$  activities in the soils of the lagoon's geographic unit.

**Keywords:**

erosion rate, radiotracer, radiometric technique, Cesium 137 activities, soil loss.

**Introducción**

La degradación que sufren los suelos a nivel mundial representa un grave problema para la sostenibilidad de los agroecosistemas, la productividad de la tierra y la protección del medio ambiente, pues disminuye los suelos productivos y contribuye al avance de la desertificación (Gaspar, 2011). Actualmente, los cambios climáticos con previsión de modificaciones en los patrones de distribución de la lluvia a lo largo del año (Meehl et al., 2005), largos periodos de sequía y mayor frecuencia de acontecimiento de lluvias extremas (Alpert et al., 2002; Tapiador et al., 2007), así como algunas actividades humanas no sostenibles, como la deforestación y la mala gestión de tierras (Tarakanov, 2024), han provocado una degradación de los suelos por erosión y desecación, ocasionando pérdida del espesor de los horizontes y de los nutrientes de la primera capa del suelo, lo que termina por afectar las tierras de cultivo y las hace menos productivas.

La erosión es un proceso en el que se va perdiendo la capa superficial del suelo, que proporciona a las plantas la mayoría de los nutrientes y el agua que necesitan. Cuando el suelo se desplaza por la erosión deteriora la calidad del agua y la biota acuática, pues la lluvia transporta el suelo degradado hasta ríos y lagos que pueden obstruirse con los sedimentos o presentar florecimientos de algas debido a los nutrientes que esta transporta (Tarakanov, 2024). El mayor impacto que ocasiona es la acumulación de grandes cantidades de sedimentos, lo que constituye un riesgo para la flora y es nocivo para la sostenibilidad del ecosistema acuático.

Las investigaciones realizadas sobre el impacto de la erosión en suelos han revelado que es más acentuada y acelerada debido a las interacciones de las características de los suelos, el clima y actividades antropogénicas, como las prácticas agrícolas (Santana et al., 1999). En Latinoamérica, países como Brasil pierden aproximadamente 115 ton. ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>, al igual que Venezuela, Bolivia, Colombia y Perú; por su parte, El Salvador y Costa Rica, por presentar pérdidas de suelo, están severamente degradados. Nicaragua no está exenta de esta problemática, la deforestación es un problema ambiental ya que conlleva una pérdida devastadora de bosques y su biodiversidad. La tala indiscriminada de árboles para la expansión de la agricultura, la

extracción de madera y el desarrollo urbano desenfrenado han provocado la degradación del suelo. El radionucleido de Cesio 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) se utiliza como trazador para la estimación de la erosión de los suelos y la deposición en tierras agrícolas (Mabit et al., 2008; Ritchie & McHenry, 1990; Walling & Quine, 1995). Esta herramienta novedosa se usa para identificar las zonas con gran erosión y transporte de sedimentos, permite determinar mejor las medidas de conservación del suelo para controlar y mitigar su pérdida a causa de la erosión y ayuda a reducir su impacto ambiental (IAEA, 2011). En tal sentido, para este estudio se utilizó el radioisótopo ambiental proveniente de la precipitación radiactiva (FRN) de Cesio 137 (en adelante,  $^{137}\text{Cs}$ ) de origen natural en perfiles de suelos de la unidad geográfica de la laguna de Tiscapa, para evaluar la erosión del suelo y los procesos de sedimentación. A menudo, este complementa o sustituye técnicas tradicionales.

En este contexto, la alcaldía de Managua, preocupada por la situación ambiental provocada por el vertimiento de desechos y sedimentos hacia la laguna de Tiscapa, ha financiado este estudio sobre erosión, para identificar los sitios más susceptibles a las pérdidas de suelo en la unidad geográfica y conocer el impacto en la laguna. Actualmente, los usos potenciales del agua de la laguna se ven limitados debido a la contaminación por aguas residuales domésticas e industriales, residuos plásticos, basura y por los sedimentos originados por actividades antropogénicas, como la agricultura en la parte alta de la unidad geográfica, que, por las precipitaciones en la época lluviosa, llegan directamente a la laguna a través de los cauces.

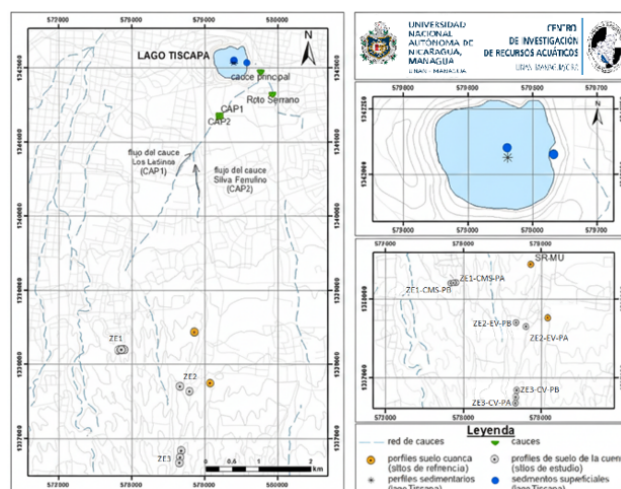
Para cumplir con el objetivo del estudio se utilizó la técnica nuclear de  $^{137}\text{Cs}$  para conocer la redistribución del suelo y cuantificar las tasas de erosión y depósito en perfiles de suelo de la unidad geográfica de la laguna de Tiscapa, con el fin de facilitar la protección y conservación de los suelos, y garantizar menor movimiento y pérdida de estos.

## Materiales y métodos

La laguna de Tiscapa se encuentra en la parte sur del lago Xolotlán, en la ciudad de Managua (figura 1), y tiene importancia desde el punto de vista turístico y recreativo. Según López & Flores (1991), la laguna se originó por el hundimiento o colapso de una explosión volcánica que cortó la parte más alta del volcán Tiscapa, seguido por un movimiento brusco que dio lugar a la fosa de agua.

**Figura 1**

*Ubicación de los sitios de muestreo en el área de estudio.*



Fuente: ALMA (2019).

## Erosión

El isótopo artificial  $^{137}\text{Cs}$  tiene una vida media de 30.17 años y es de origen antropogénico. Procede de la fisión nuclear y es introducido en la estratósfera como subproducto de los ensayos nucleares que comenzaron en 1954 (Ritchie & Ritchie, 1995); se distribuyó globalmente en la estratósfera gracias a las corrientes atmosféricas. Su depósito inició en 1955, asociado principalmente a las precipitaciones y al depósito seco por gravedad, finalizó en 1983 y alcanzó su pico máximo en 1963.

La aplicación de la técnica radiométrica se fundamenta en la alta reactividad de los FRNs que, una vez depositados en el suelo, son fuertemente fijados por los componentes finos de este (arcillas y materia orgánica), de forma que las tasas de migración vertical son bajas (Schuller et al., 1999). Esta técnica se basa en la comparación de los inventarios de referencia local del radioisótopo específico en el área de estudio con sus valores de actividad en los distintos puntos de muestreo (Ritchie & McHenry, 1974).

En este contexto, los sitios de estudio deben corresponder a sitios afectados por erosión y/o depósito de sedimentos, y el sitio de referencia debe ser estable y haber permanecido inalterado desde que se produjo el depósito máximo de  $^{137}\text{Cs}$  en 1963, es decir, un sitio no afectado (IAEA, 2011). La tasa de erosión se estimó utilizando el modelo proporcional para obtener información confiable sobre el movimiento y distribución del  $^{137}\text{Cs}$  en los suelos que pertenecen a las microcuencas Los Ladinos y Silvia Ferrufino. Este modelo se basa en la simple premisa de que el  $^{137}\text{Cs}$  es completamente mezclado dentro del lecho arado o de cultivo, y que la pérdida de suelo es directamente proporcional a la cantidad de este radionucleido removido desde el perfil de suelo desde que comenzó a acumularse este radioisótopo (Walling & Quine, 1995).

## Muestreo

Para estimar la erosión en los suelos de la microcuenca de la laguna de Tiscapa se realizó una gira de campo de reconocimiento, con el objetivo de seleccionar un sitio de referencia y tres zonas de estudio. El sitio de referencia seleccionado fue la Colonia Memorial Sandino, específicamente un sitio que no mostró evidencia de erosión y deposición de sedimentos (suelo virgen). Las tres zonas de estudio seleccionadas fueron ubicadas en la Colonia Memorial Sandino, Entrada a las Viudas y Camino a las Viudas; estas zonas se seleccionaron dado que mostraron pérdida de suelo con base en los diferentes usos. En estas zonas se buscó conocer la redistribución de  $^{137}\text{Cs}$  y las tasas de erosión o deposición del suelo.

Posteriormente, se realizaron dos giras de campo para el muestreo de perfiles de suelos en las zonas de estudio y el sitio de referencia, en los meses de julio y agosto, correspondientes a la canícula (disminución de lluvias). Las muestras fueron tomadas en la parte alta y baja de cada zona de estudio de la Colonia Memorial Sandino (ZE1), CMS-PA en la parte alta y CMS-PB en la parte baja; Entrada a las Viudas (ZE2), EV-PA en parte alta y EV-PB en la parte baja; y Camino a las Viudas (ZE3), CV-PA en la parte alta y CV-PB en la parte baja.

## Estrategia de muestreo

Las muestras se colectaron en cada sitio de estudio y de referencia con un muestreador tipo Split tube de 40 cm de profundidad en 4 estratos en los perfiles de suelo para el sitio de referencia y sitio de estudio, a profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 y 20-30 cm, para un total de 4 muestras de suelo en el sitio de referencia y 32 en los sitios de estudio. El área de muestreo se dividió en tres sitios de estudio, correspondiendo la ZE1 a la zona más baja de la cuenca de estudio, la ZE2 a una intermedia y la ZE3 a la más alta de la cuenca. Por cada una de las zonas se tomaron 2 perfiles de suelo, la primera muestra ubicada en el punto más alto accesible, y la segunda, en la parte baja de la zona, con el fin de garantizar una mayor área de cobertura dentro de la cuenca de estudio y obtener resultados significativos.

Las muestras se almacenaron en bolsas de plástico de 25 lb y fueron transportadas para ser analizadas de acuerdo con el Procedimiento Operativo Normalizado (PON) del análisis de  $^{137}\text{Cs}$  en suelos y sedimento del

laboratorio de Radioquímica Ambiental del Centro de Investigación de Recursos Acuáticos de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua/CIRA).

Las muestras de los perfiles de suelo fueron secadas a 45 °C en un horno de convección durante 24 horas; luego, fueron maceradas con mortero y tamizadas a través de una malla de 2 mm, y se almacenaron en bolsas de plástico (Ziploc) en el laboratorio de Radioquímica Ambiental de UNAN-Managua/CIRA, para ser enviadas al laboratorio de Geoquímica Isotópica y Geocronología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICML). Se pesaron aproximadamente 4.5 gr de muestra de suelo, se colocaron en viales de polietileno de 40 mm de largo y 10 mm de diámetro (4 mL de capacidad) y se sellaron con tapones de goma y cinta teflón; posteriormente, fueron analizadas en un detector gamma (Ortec-Ametek Sistema Coaxial de Pozo, Serie GWL-HPGe) durante 48 horas.

## Resultados

### Distribución de la actividad específica e inventario de $^{137}\text{Cs}$ en el sitio de referencia

Los resultados obtenidos de la medición de las actividades específicas de  $^{137}\text{Cs}$  en el sitio de referencia en el perfil de suelo ubicado en la Colonia Memorial Sandino (CMS) variaron entre 1.01 y 2.1 Bq kg<sup>-1</sup>, mientras que los valores de los inventarios de  $^{137}\text{Cs}$  variaron entre 1.09 y 2.08 Bq m<sup>-2</sup> (tabla 1). Como se observa en el perfil de  $^{137}\text{Cs}$ , el sitio de referencia CMS presentó un comportamiento normal ya que la actividad disminuyó con respecto a la profundidad, a excepción de las secciones de 10-20 cm y 20-30 cm que presentan la misma actividad.

Tabla 1. Valores de la actividad específica e inventario de  $^{137}\text{Cs}$  en el sitio de referencia

Sitio de referencia	Profundidad (cm)	Actividad de $^{137}\text{Cs}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	Inventario de $^{137}\text{Cs}$ (Bq m <sup>-2</sup> )
Colonia Memorial Sandino (CMS)	0-5	2.1	2.10
	5-10	1.8	1.75
	10-20	1.1	1.10
	20-30	1.1	1.12

Fuente: ALMA (2019).

### Distribución de la actividad específica e inventario de $^{137}\text{Cs}$ en los sitios de estudio

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos para la actividad específica de  $^{137}\text{Cs}$ , que variaron entre valores mínimos no detectables a 1.2 Bq kg<sup>-1</sup> en la zona ZE1, entre valores mínimos no detectables a 1.5 Bq kg<sup>-1</sup> en la zona ZE2 y entre valores mínimos no detectables a 2.1 Bq kg<sup>-1</sup> en la zona ZE3. En lo que respecta a los valores obtenidos en los inventarios de  $^{137}\text{Cs}$ , en el sitio ZE1 variaron entre no detectable hasta 1.21 Bq m<sup>-2</sup>, entre no detectable hasta 1.44 Bq m<sup>-2</sup> en la ZE2 y entre no detectable hasta 2.03 Bq m<sup>-2</sup> en la ZE3.

Tabla 2. Resultados de las mediciones de la actividad específica y el inventario correspondiente al  $^{137}\text{Cs}$  en los sitios de estudios

Zona	Sitio de estudio	Profundidad (cm)	Actividad específica de $^{137}\text{Cs}$ ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )	Inventario total de $^{137}\text{Cs}$ ( $\text{Bq m}^{-2}$ )	
Zona de estudio 1 (ZE1)	Colonia Memorial Sandino parte alta (CMS-PA)	0-5	ND	ND	
		5-10	ND	ND	
		10-20	0.9	0.90	
		20-30	0.7	0.67	
	Colonia Memorial Sandino parte baja (CMS-PB)	0-5	ND	ND	
		5-10	ND	ND	
		10-20	1.2	1.21	
		20-30	ND	ND	
	Zona de estudio 2 (ZE2)	Entrada a Las Viudas parte alta (EV-PA)	0-5	1.3	1.25
			5-10	ND	ND
			10-20	1.5	1.44
			20-30	ND	ND
Entrada a Las Viudas parte baja (EV-PB)		0-5	1.4	1.31	
		5-10	1.1	1.09	
		10-20	ND	ND	
		20-30	ND	ND	
Zona de estudio 3 (ZE3)		Camino a las Viudas parte alta (CV-PA)	0-5	ND	ND
			5-10	ND	ND
			10-20	1.3	1.30
			20-30	ND	ND
	Camino a las Viudas parte baja (CV-PB)	0-5	ND	ND	
		5-10	2.1	2.03	
		10-20	ND	ND	
		20-30	ND	ND	

ND: Valor no detectado.

Fuente: ALMA (2019).

### Estimación de la redistribución del $^{137}\text{Cs}$ y la erosión

Las tasas de erosión en suelos cultivados se estimaron mediante la aplicación del modelo proporcional y se obtuvieron las tasas de redistribuciones de suelo y la distribución espacial de  $^{137}\text{Cs}$  en los sitios de estudio (tabla 3).

Tabla 3. Estimación de la redistribución del  $^{137}\text{Cs}$  y tasas de erosión en perfiles de suelo de las tres zonas de estudio de la unidad geográfica de la laguna de Tiscapa

Zona	Sitio de estudio	Profundidad (cm)	Redistribución de $^{137}\text{Cs}$ (pérdida (-) y depósito (+))	Pérdida de suelo ( $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ )
Zona de estudio 1 (ZE1)	Colonia Memorial Sandino parte alta (CMS-PA)	0-5	0	0.646
		5-10	0	
		10-20	-19.34	
		20-30	-36.39	
	Colonia Memorial Sandino parte baja (CMS-PB)	0-5	0	0.498
		5-10	0	
		10-20	-80.01	
		20-30	0	
Zona de estudio 2 (ZE2)	Entrada a Las Viudas parte alta (EV-PA)	0-5	-79.37	1.103
		5-10	0	
		10-20	-76.32	
		20-30	0	
	Entrada a Las Viudas parte baja (EV-PB)	0-5	-77.87	0.996
		5-10	-82.10	
		10-20	0	
		20-30	0	
Zona de estudio 3 (ZE3)	Camino a las Viudas parte alta (CV-PA)	0-5	0	0.833
		5-10	0	
		10-20	-66.52	
		20-30	0	
	Camino a las Viudas parte baja (CV-PB)	0-5	0	0.531
		5-10	-78.56	
		10-20	0	
		20-30	0	

Nota: El signo positivo (+) significa depósito y el negativo (-) pérdida.

Fuente: ALMA (2019).

## Discusión

Los valores encontrados en el sitio de referencia representan la actividad específica de  $^{137}\text{Cs}$  en el suelo hasta la fecha de muestreo. Este no ha sido perturbado ni por la erosión ni por el depósito de partículas de sedimentos, por lo que el sitio cumple con los requisitos como sitio de referencia. Las áreas de referencia deben ser estables y haber permanecido inalteradas desde que se produjo el depósito máximo de  $^{137}\text{Cs}$  en 1963 (Fulajtar et al., 2017). Por otro lado, el inventario de  $^{137}\text{Cs}$  encontrado en el sitio de referencia disminuye con la profundidad en relación con las actividades específicas encontradas. La típica distribución con la profundidad del inventario de referencia mostró que las dos primeras capas de 0-5 y 5-10 cm contienen mayor actividad de  $^{137}\text{Cs}$ . Este comportamiento podría estar asociado a la fuerte retención de  $^{137}\text{Cs}$  por el tipo de suelo en las capas superiores; además, se comprobó que este sitio de referencia seleccionado sí cumple el criterio de suelo no perturbado.

La distribución del  $^{137}\text{Cs}$  en los perfiles del sitio ZE1 en los primeros 10 cm de profundidad mostró una clara correspondencia con el uso del suelo. Este comportamiento posiblemente está asociado al desprendimiento de las partículas del suelo durante la preparación para fines agrícolas, las cuales son transportadas por escorrentía superficial hacia la parte más baja del sitio de estudio (CMS-PB), llevando consigo el  $^{137}\text{Cs}$ . En lo que respecta a los inventarios de  $^{137}\text{Cs}$ , en los primeros 10 cm fue prácticamente nulo, lo que denota que se ha perdido en su totalidad el suelo en las primeras capas del perfil. Solamente se encontró  $^{137}\text{Cs}$  en las capas correspondientes a 10-20 y 20-30 cm de profundidad, situación que refleja cierta homogeneidad en sus contenidos debido al laboreo, lo que corrobora los estudios realizados por Walling & Quine (1995) y Sibello & Febles (2011).

Cabe señalar que entre los 10 a 20 cm de profundidad, la actividad específica de  $^{137}\text{Cs}$  encontrada en el CMS-PB fue mayor que la registrada en el sitio CMS-PA; esto pudo estar asociado a la ubicación del sitio CMS-PB, que favorece el depósito de sedimento provocando un incremento en el contenido de  $^{137}\text{Cs}$  en el perfil de suelo. Por tanto, el sitio CMS-PA ubicado en la cima de la ZE1 fue el más afectado por erosión.

El comportamiento del  $^{137}\text{Cs}$  en la parte alta y baja de la ZE2 en la primera capa del perfil de suelo 0-5 cm no mostró pérdida, posiblemente por el tipo de suelo, mientras que entre 5-10 cm, la distribución del  $^{137}\text{Cs}$  no fue el característico, debido a que en esta profundidad debería encontrarse. Es relevante mencionar que los suelos en el sitio EV-PA son molisoles ricos en materia orgánica, los cuales favorecen la presencia del  $^{137}\text{Cs}$  porque logran retenerlo en los primeros cm del perfil. Sin embargo, se observó un incremento del contenido de  $^{137}\text{Cs}$  hacia las capas entre los 10-20 cm, lo que posiblemente estuvo relacionado con el manejo y tipo de labranza en la preparación del suelo para el cultivo de maíz.

Según la Fundación Chile (2011), en la preparación del suelo para el cultivo de maíz se recomienda pasar el arado hasta 15 o 20 cm de profundidad, dependiendo del tipo de suelo, ya sea liviano o pesado. El inventario de  $^{137}\text{Cs}$  en el perfil de suelo de la ZE2 fue completamente diferente al obtenido en los sitios ZE1 y ZE3, porque se encontró  $^{137}\text{Cs}$  en los primeros 5 cm de profundidad, lo que indica que no hubo pérdida de suelo en los perfiles en los primeros 5 cm de profundidad en la ZE2.

Las actividades específicas reportadas fueron mayores que las encontradas en el sitio EV-PA, probablemente por mayor arrastre de las partículas del suelo ubicado en la parte alta de ZE2 hacia la parte más baja. Esta situación provocó un incremento del contenido de  $^{137}\text{Cs}$ , lo que influyó para que el proceso predominante en el sitio EV-PB sea el depósito. El cálculo del inventario de  $^{137}\text{Cs}$  mostró un comportamiento diferente con respecto a todos los sitios estudiados, porque se encontró  $^{137}\text{Cs}$  en los primeros 10 cm de profundidad. El sitio EV-PB mostró que está recibiendo partículas de suelo por escorrentías superficiales del sitio EV-PA ubicado en la cima de la ZE2; además, este sitio, por estar ubicado en la parte baja, no fue afectado por la topografía ya que no tiene pendiente.

El comportamiento del  $^{137}\text{Cs}$  en el perfil de suelo ubicado en la ZE3 fue similar al reportado en ZE1. La pérdida de suelo en CV-PA se debe posiblemente al uso del suelo para cultivos agrícolas, por las escorrentías superficiales que transportan partículas del suelo provocando la pérdida de  $^{137}\text{Cs}$  y al tipo de pendiente del terreno. El cálculo del inventario de  $^{137}\text{Cs}$  en este sitio tuvo un comportamiento similar a los sitios ubicados

en ZE1, debido a que en los primeros 10 cm de profundidad no se encontró  $^{137}\text{Cs}$ , posiblemente por pérdida de suelo. En el perfil de CV-PB, la distribución del  $^{137}\text{Cs}$  presentó mayor contenido que el encontrado en la parte alta de la ZE3. Estos resultados muestran que en la medida en que se descendió en el sitio de estudio, incrementó el contenido de  $^{137}\text{Cs}$ , el cual ha sido transportado por las escorrentías superficiales. Asimismo, es importante mencionar que el  $^{137}\text{Cs}$  encontrado mostró clara correspondencia con el uso del suelo y la pendiente.

Las actividades específicas encontradas en ambos perfiles de suelos de la ZE3 mostraron claramente pérdida de suelo en las primeras capas del perfil de suelo. También evidenciaron que el sitio CV-PA está afectado por pérdida de suelo y que el CV-PB está siendo favorecido por depósito de partículas de suelo provenientes de la parte alta de la zona de estudio.

De los valores mostrados en la tabla 3, referentes al porcentaje de redistribución  $X$  (%) de  $^{137}\text{Cs}$ , 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, 1995). El signo “+” significa depósito de suelo y el signo “-” erosión de suelo. Como se observa en la tabla 3, los resultados de la redistribución del  $^{137}\text{Cs}$  en las tres zonas de estudio seleccionadas mostraron un predominio de pérdida de suelo en la unidad geográfica de la laguna. Ninguna de las zonas estudiadas superó el valor estimado de las pérdidas de suelo por erosión natural ( $10.0 \pm t/\text{ha}/\text{año}$ ) después de los 10 cm de profundidad, lo que se corresponde con la clasificación de erosión ligera establecida por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (1980). La ZE1, ubicada en la microcuenca Los Ladinos, y la ZE3, ubicada en la microcuenca Silvia Ferrufino, son los sitios más críticamente afectados por erosión, porque ambos perfiles de suelo mostraron pérdidas de suelos en los primeros 10 cm de profundidad, de acuerdo con el contenido de  $^{137}\text{Cs}$  encontrado.

Los resultados obtenidos de las estimaciones de erosión evidenciaron pérdidas de suelo después de los 10 cm de profundidad en las tres zonas de estudio ZE1, ZE2 y ZE3. Es importante señalar que estos resultados constituyen una señal de alerta frente a la magnitud de los procesos erosivos en la microcuenca, así como una justificación para estudios futuros de cuantificación de pérdida de suelo.

De la misma manera, cabe destacar que la ZE2 mostró la mayor pérdida de suelo por erosión, siendo el manejo inadecuado de los suelos, la topografía y la pendiente, los factores que favorecieron el arrastre de partículas del suelo por las escorrentías superficiales. Los suelos de la ZE2 posiblemente están expuestos a técnicas inadecuadas de cultivos, lo que les hace más propensos a los procesos erosivos. Además, es importante mencionar que estos suelos presentan una pendiente entre 7 y 2.7 %, situación que favorece el transporte de materiales por escorrentías superficiales desde la cima hasta la parte más baja de la microcuenca.

## Conclusión

Las actividades de  $^{137}\text{Cs}$  caracterizaron el estado de la erosión del suelo en las tres zonas de estudio (ZE1, ZE2 y ZE3), confirmando pérdida de suelo nula o ligera.

Se identificaron las distintas tasas de redistribución de suelo entre las tres zonas estudiadas; ZE1 y ZE2 fueron las más afectadas por los procesos de erosión del suelo. Esto se debió, en gran parte, por el manejo inadecuado de los suelos y también por su topografía y pendiente, factores que favorecieron el arrastre de partículas del suelo por las escorrentías superficiales.

Las estimaciones de erosión en el área de estudio constituyen una señal de alerta de la magnitud de los procesos erosivos en la microcuenca, que pueden acelerar el proceso de azolvamiento de la laguna de Tiscapa. Estos resultados constituyen una justificación para estudios futuros de cuantificación de pérdida de suelo.

## Agradecimientos

A la alcaldía de Managua (ALMA), por financiar este estudio y autorizar la publicación de los resultados, permitiendo agregar este artículo en la revista. Al Centro de Investigación de Recursos Acuáticos (CIRA) por el apoyo a esta investigación. En especial al personal que apoyó el estudio.

## References

- ALMA. (2019). *Estudio de la dinámica de flujo superficial, subterráneo y tasa de sedimentación de la Laguna de Tiscapa. (II)*. Alcaldía de Managua.
- Alpert, P., Ben-Gai, T., Baharad, A., Benjamini, Y., Yekutieli, D., Colacino, M., Diodato, L., Ramis, C., Homar, V., Romero, R., Michaelides, S., & Manes, A. (2002). The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Geophysical Research Letters*, 29(11), 31–34. <https://doi.org/10.1029/2001GL013554>
- Fulajtar, E., Mabit, L., Renschler, C., & Lee, A. (2017). *Use of <sup>137</sup>Cs for soil erosion assessment*. Food; Agriculture Organization of the United Nations / International Atomic Energy Agency.
- Gaspar, L. (2011). *Evaluación de la movilización y pérdida de suelo en agrosistemas de secano mediante los radiotrazadores de <sup>137</sup>Cs y <sup>210</sup>Pb* [Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza]. <http://hdl.handle.net/10261/42084>
- IAEA. (2011). *Impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality* (Nos. IAEA-TECDOC-1665). International Atomic Energy Agency.
- López, I., & Flores, S. (1991). Estudio físico químico del agua de la laguna de Tiscapa. *Memoria Del Primer Congreso Científico de La UNAN-Managua*. <http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/2583>
- Mabit, L., Bernard, C., Makhoulouf, M., & Laverdière, M. R. (2008). Spatial variability of erosion and soil organic matter content estimated from <sup>137</sup>Cs measurements and geostatistics. *Geoderma*, 145, 245–251. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.03.013>
- Meehl, G. A., Arblaster, J. M., & Tebaldi, C. (2005). Understanding future patterns of increased precipitation intensity in climate model simulations. *Geophysical Research Letters*, 32(18). <https://doi.org/10.1029/2005GL023680>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. FAO.
- Ritchie, J. C., & McHenry, J. R. (1974). Estimating soil erosion from the redistribution of fallout caesium-137. *Soil Science Society of America Proceedings*, 38, 137–138.
- Ritchie, J. C., & McHenry, J. R. (1990). Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: A review. *Journal of Environmental Quality*, 19(2), 215–233. <https://doi.org/10.2134/jeq1990.00472425001900020006x>
- Ritchie, J. C., & Ritchie, C. A. (1995). In *Assessment of soil degradation in latin america* (pp. 111–124). International Atomic Energy Agency.
- Santana, M., Fuentes, B., Benítez, L., Coca, J., Córdoba, R., Hernández, S., Arcia, J., Hernández, J., Hernández, I., & 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.
- Schuller, P., Sepúlveda, A., Ellies, A., & Castillo, A. (1999). Utilización de <sup>137</sup>Cs en cuantificación de erosión y sedimentación en un Palehumult de la IX Región. *Agro Sur*, 27(1), 29–36.
- Sibello, R., & Febles, J. M. (2011). Estudio de la erosión de los suelos en áreas protegidas de Cienfuegos, utilizando el Cesio 137 como radiotrazador. *Nucleus*, 50, 31–35. <http://scielo.sld.cu/pdf/nuc/n50/nuc065011.pdf>
- Tapiador, F. J., Sánchez, E., & Gaertner, M. A. (2007). Regional changes in precipitation in Europe under an increased greenhouse emissions scenario. *Geophysical Research Letters*, 34(6). <https://doi.org/10.1029/>

[2006GL029035](#)

- Tarakanov, V. (2024). *¿Qué es la erosión del suelo? ¿Cómo se puede estudiar y mitigar con técnicas nucleares?* Ciencia Nuclear en detalle, IAEA. <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-la-erosion-del-suelo>
- Walling, D., & Quine, T. (1995). The use of fallout radionuclide measurements in soil erosion investigations. In *Nuclear techniques in soil-plant studies for sustainable agriculture and environmental preservation* (pp. 597–619). International Atomic Energy Agency [IAEA].