



Aplicación de la técnica nuclear de Cesio - 137 para estimar la erosión de los suelos en la subcuenca del Río Ochomogo

Yader Caballero¹

Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua.

RESUMEN

El uso de la contaminación radiactiva por ^{137}Cs (Cesio - 137) en la atmósfera ha sido usado como trazador en este estudio para estimar la erosión y conocer su redistribución en perfiles de suelos ubicados en la subcuenca del Río Ochomogo. Se colectaron al azar 10 submuestras del perfil de suelos en los cinco sitios de estudio y dos de referencia en las dos zonas de estudio. Los suelos seleccionados se usan para diferentes cultivos como son caña de azúcar, arroz, plátano, maíz y pasto para ganado. Las muestras se colectaron en perfiles de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm, totalizando 28 muestras y fueron analizadas en un espectrómetro gamma. A partir de las actividades de ^{137}Cs se calculó el inventario para cada muestra y se determinaron las pérdidas de suelo aplicando el Modelo Proporcional. Se registraron actividades de ^{137}Cs de entre no detectables hasta 0.72 Bq kg^{-1} e inventarios de hasta 114.81 Bq m^{-2} .

Los resultados de las mediciones de ^{137}Cs mostraron que la actividad en los suelos de los sitios de estudio está fuertemente condicionada por el uso y tipo del suelo. Los suelos que presentaron más erosión en orden descendente son los utilizados para el cultivo de maíz, caña de azúcar, plátano, pasto para ganado y arroz. En general, los valores de las pérdidas de suelos estimados en los perfiles analizados se corresponden con la clasificación de erosión nula o ligera de acuerdo a las directrices internacionales establecidas. Todas las estimaciones calculadas para los suelos en las dos zonas de estudio implicaron la importancia del proceso de erosión lo que podría convertirse en un problema ambiental de primera magnitud en la subcuenca.

Palabras claves: Erosión, Cesio-137, Actividad de Cesio 137.

ABSTRACT

The use of radioactive contamination of ^{137}Cs (Cesium - 137) in the atmosphere has been used as a tracer in this study for the estimation of erosion and know its

redistribution in soil profiles located in the sub-basin of the Ochomogo river. 10 subsamples of soil profiles were randomly collected in five study sites and two reference

¹ Datos del autor

Teléfono: +505 58082844

Correo electrónico: yadercaballero@cira.unan.edu.ni

sites in the two study areas. The selected soils are used for different crops as sugar cane, rice, plantain, corn and cattle grazing. The samples were collected on profiles of 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm and 20-30 cm, totaling 28 samples that were analyzed in a gamma spectrometer. From the activities of ^{137}Cs , the inventory for each sample was calculated and the soil loss were determined applying "the proportional model". Activities of ^{137}Cs were recorded from undetectable up to 0.72 Bq kg^{-1} and inventories of up to 114.81 Bq m^{-2} . The results of the ^{137}Cs measurements showed that the activity in the soils of the study sites is strongly conditioned by the use and soil

type. Soils that had more erosion in descending order are used for the cultivation of corn, sugar cane, plantains, grass for cattle and rice. In general, the values of soil losses estimated in the analyzed profiles correspond to the classification of null or light erosion according to established international guidelines. All the estimates calculated for the soils in the study areas imply the importance of the erosion process that can become a major environmental problem in the sub-basin.

Keywords: Erosion, ^{137}Cs , Activity of ^{137}Cs .

INTRODUCCIÓN

La erosión de los suelos es un problema grave en el mundo porque afecta áreas con poca cubierta vegetal, incluyendo superficies con cultivos, así como pastizales degradados (Lal, 1994). En América Latina la degradación de los suelos está avanzando rápidamente a consecuencia de la erosión, provocando alteraciones en el nivel de fertilidad del suelo y consecuentemente en su capacidad de sostener una agricultura productiva. Según la Organización Internacional de Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés) (2008), las principales causas de la erosión son la deforestación (43%), el sobrepastoreo (29%) y el mal manejo de los suelos (24%). Nicaragua no está exenta de esta problemática ya que la erosión de los suelos ha aumentado en los últimos veinte años y afecta a un 20% de las tierras agrícolas, a un 15% de los pastizales y a un 30% de los bosques, según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2008).

En Nicaragua la degradación de los suelos tiene su principal causa en la mala gestión de la tierra (Caballero, 2007). El incremento de la agricultura y la falta de técnicas para el uso y manejo de los suelos, agua y vegetación en

épocas anteriores en la subcuenca del Río Ochomogo, ha generado serios problemas ambientales y sociales como la deforestación, reducción de la cobertura vegetal, pérdidas de suelo y de biodiversidad y la alteración de las características físicas y químicas de los suelos y agua (Caballero, 2007). Estas no solo causan la degradación de los suelos en la subcuenca si no que ocasionan arrastre de sedimentos los cuales son depositados por el flujo del Río Ochomogo hacia el lago Cocibolca provocando sedimentación y eutrofización de las aguas.

Para la planificación del uso del suelo y desarrollo de estrategias de conservación, es necesario estimar las tasas de erosión e identificar las áreas vulnerables. A través de los años diversas técnicas han sido utilizadas para conocer el comportamiento de la erosión de los suelos y entre estas destacan las mediciones directas (huellas geológicas, sistema de información geográfica, sin embargo, estas requieren mucho tiempo y son costosas) y las indirectas siendo la más conocida la ecuación universal de pérdidas del suelo (USLE), la cual considera en su análisis que el proceso erosivo de un área es el resultado entre la interacción de factores

naturales como el clima, suelo y topografía y antropogénicos como el uso y manejo del suelo (Wischmeier & Smith, 1978).

La búsqueda de técnicas alternativas para la estimación de la erosión de los suelos para complementar los métodos existentes ha dirigido la atención al uso del radioisótopo ^{137}Cs ; es la más moderna y aventaja a los métodos tradicionales ya que es un método directo y dinámico, no necesita observaciones prolongadas, es capaz de cuantificar las pérdidas de suelo a mediano plazo (< 50 años) independientemente de los factores que la han originado y además nos permite conocer la redistribución del suelo en el campo (Walling & Quine, 1995).

Por medio de esta investigación se pretende mejorar la capacidad científica técnica en el uso de técnicas isotópicas en Nicaragua para generar información sobre la redistribución de suelos y la cuantificación de las tasas de erosión en la subcuenca del Río Ochomogo. Estos resultados sirven de base para proponer una planificación de uso del suelo en la subcuenca encaminados a minimizar las consecuencias negativas de la erosión para proteger el medio ambiente a nivel de cuencas hidrográficas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El uso de las mediciones de ^{137}Cs para estimar las tasas de erosión y deposición se basa en la comparación de este radiotrazador en sitios individuales de muestreo con el inventario de referencia representativo de la entrada local de ^{137}Cs , así el inventario en los sitios de estudio debe corresponder a sitios afectados por erosión y/o depósito de sedimentos y el de referencia debe ser correspondiente al de un sitio que no haya sido afectado. Si el inventario correspondiente a un punto individual de muestreo es menor que el inventario de referencia es indicativo de la erosión; mientras que un inventario mayor que el valor de referencia indica depósito (Walling

& Quine, 1995). Para la estimación de las tasas de erosión se utilizó el Modelo Proporcional para obtener información confiable sobre el movimiento y distribución del ^{137}Cs en los suelos pertenecientes a la subcuenca del Río Ochomogo. Este modelo se basa en la premisa que el ^{137}Cs proveniente de la precipitación radiactiva está completamente mezclado dentro del lecho arado o de cultivo y que la pérdida de suelo es directamente proporcional a la cantidad del radionúclido removido del perfil de suelo desde que éste comenzó a acumularse (Sibello, 2013).

La presencia del ^{137}Cs en el ambiente es debido a las pruebas de armas nucleares o a la liberación de los reactores nucleares (Walling & Quine, 1995). Este se introduce a la estratósfera donde circula globalmente siendo transportado por el aire hacia la tropósfera y después a la superficie de la tierra por acción de las precipitaciones (Davis, 1963; Longmore, 1982; Ritchie & McHenry, 1990). Esta incorporación del ^{137}Cs a los ecosistemas terrestres ha permitido la realización de estudios ambientales a nivel de cuencas hidrográficas.

Muestreo

Selección de sitios de referencia y de estudio

Se colectaron al azar un total de 10 submuestras para constituir una muestra compuesta del perfil de suelos en los cinco (5) sitios de estudio y en los dos (2) de referencia de las dos zonas de estudio en la subcuenca del Río Ochomogo. Para la zona de estudio I (ZE-I) ubicada en la parte baja de la subcuenca se seleccionó un sitio de referencia en El Dorado correspondiente a un suelo virgen (no cultivado) y tres sitios de estudio correspondientes a suelos utilizados para cultivos de caña de azúcar en La Barraza, de arroz en La Enramada y de plátano en Paso Real (Figura 1). En lo que respecta a la zona de estudio II (ZE-II)

localizada en la parte Central de la subcuenca se seleccionó un sitio de referencia en Valle Menier y dos sitios de estudio correspondientes a cultivo de maíz en La Calera y pasto para ganado en la Hacienda San Antonio (Figura 1).

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 cuatro estratos: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm, haciendo un total de 28 muestras. Estas se almacenaron en bolsas de plástico de

25 lb y fueron transportadas cuidadosamente para ser analizadas de acuerdo al Procedimiento Operativo Normalizado (PON) del análisis de ^{137}Cs en suelos y sedimento del Laboratorio de Radioquímica Ambiental del CIRA/UNAN-Managua. Este procedimiento sigue las recomendaciones emanadas del Proyecto Regional Latinoamericano RLA 5/051 (ARCAL C): Uso de radionúclidos ambientales como indicadores de degradación de suelos en ecosistemas de Latino América, El Caribe y el Antártico (IAEA, 2008).



Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo de referencia (amarillo) y de estudio (rojo) para análisis de ^{137}Cs en suelos de la subcuenca del Río Ochomogo, junio y agosto, 2015.

Pre-tratamiento, análisis y cálculo de los inventarios de ^{137}Cs en las muestras de suelo

Las muestras de los perfiles de suelo fueron secadas a $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un horno de convección (GS Blue M, Modelo OV-184) durante 24 horas; luego fueron maceradas con mortero y tamizadas a través de una malla de 2 mm. En un recipiente Marinelli se pesaron 900 g de muestra para ser analizadas en un

espectrómetro gamma Canberra Packard, GS4018 (Viena, Austria) conectado a un detector de alta pureza de germanio, con una eficiencia de salida de 85.2 % para determinar la actividad de ^{137}Cs en la energía de 661.7 keV. El tiempo de conteo estuvo entre 68400 y 82800 segundos.

El procesamiento de los espectros se llevó a cabo con el software GENIE 2000 (Gamma Acquisition & Analysis, Versión 3.2), el cual

incluye la identificación de picos y cálculo de áreas. A partir de las actividades de ^{137}Cs se calculó el inventario de Cesio 137 para cada muestra de suelo correspondiente a una determinada profundidad según la ecuación (1) y se determinaron las pérdidas de suelos aplicando el Modelo Proporcional de acuerdo a la ecuación (3).

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

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^{-1})

CPF: Peso corregido de la fracción fina de la muestra (kg), según la ecuación (2).

$$CPF = PT - PG \quad (2)$$

Donde:

PT: Peso Total de la muestra seca (g)

PG: Peso de la fracción gruesa (g)

ASH: Area superficial horizontal de la muestra (m^2)

Para la cuantificación de la erosión se utilizó el modelo proporcional según la ecuación (3)

$$Y = 10. B. D. X / 100TP \quad (3)$$

Donde:

Y: Pérdida media anual de suelo ($\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$)

B: Densidad aparente del suelo (kg m^{-3})

D: Profundidad del arado o el lecho de cultivo (m)

X: Porcentaje de reducción del inventario total de ^{137}Cs

T: Tiempo transcurrido desde el inicio de la acumulación del ^{137}Cs

P: Factor de corrección del tamaño de las partículas, según la ecuación (4)

$$X = \left(\frac{I - I_{ref}}{I_{ref}} \right) * 100 \quad (4)$$

Donde:

I: Inventario total de ^{137}Cs de la muestra (Bq m^{-2})

I_{ref}: Inventario local de referencia (Bq m^{-2})

La técnica se basa en la comparación de los inventarios en cada sitio de estudio con el inventario de referencia lo más cercano posible al área de estudio. Si el inventario del sitio de estudio es menor que el de referencia se puede inferir que es un sitio erosionado o si es mayor es un sitio de depósito (mayor inventario en el sitio de estudio que el de referencia) (IAEA, 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Actividades y distribución del inventarios de Cesio 137 en los sitios de referencia

En la Tabla 1 se presentan los valores obtenidos de la medición de las actividades específicas de Cesio 137 en los sitios de referencia ubicados en los perfiles de suelos de las zonas de estudio ZE-I (El Dorado) y ZE-II (Valle Menier) en la subcuenca del Río Ochomogo y varían entre valores mínimos no detectables a máximos de 0.84 Bq kg^{-1} , mientras que los valores del cálculo de los inventarios de Cesio 137 varían entre no detectables a máximos de 165.17 Bq m^{-2} .

Tabla 1

Valores de actividades específicas y distribución del inventario de Cesio 137 en perfiles de muestras compuestas de suelos de los sitios de referencia de las zonas de estudio ZE-I (El Dorado) y ZE-II (Valle Menier), subcuenca del Río Ochomogo, 2016.

Sitios de referencia	Profundidad (cm)	Actividad de ^{137}Cs (Bq kg^{-1})	Inventario de ^{137}Cs (Bq m^{-2})
El Dorado (ZE-I)	0 – 5	0.53	108.02
	5 – 10	0.41	83.24
	10 – 20	No detectado	No detectado
	20 – 30	0.27	55.50
	Total	1.21	246.76
Valle Menier (ZE-II)	0 – 5	0.31	62.86
	5 – 10	0.82	140.58
	10 – 20	0.84	165.17
	20 – 30	0.39	62.57
	Total	2.36	431.19

El perfil de Cesio 137 en el sitio de referencia El Dorado presentó un comportamiento normal ya que la actividad disminuyó con la profundidad a excepción de la sección de 10-20 cm que no presentó actividad detectable. Estos resultados representan la actividad de Cesio 137 que ha sido estabilizada en el suelo hasta la fecha de muestreo y que no ha sido afectada por erosión y deposición de partículas de sedimentos por lo que el sitio cumple con los requisitos para ser utilizado como referencia.

Por otro lado, el sitio de referencia ubicado en Valle Menier también presentó una distribución normal de Cesio 137 a partir de la sección de 5-10 cm y hasta la de 20-30 cm

de profundidad, encontrándose un comportamiento anormal en el estrato superficial (0-5 cm). Es posible que la baja actividad medida en la primera capa del perfil del suelo esté relacionada con el tipo de suelo prevalente en el área de estudio. Los inventarios de Cesio 137 en los sitios de referencia mostraron un patrón decreciente con la profundidad en concordancia con las actividades de Cesio 137 encontradas.

Las diferencias en la distribución y los inventarios de Cesio 137 podrían estar relacionadas a las características en el perfil del suelo en ambos sitios de referencia. Según un estudio realizado por Caballero (2007), los suelos en Valle Menier son del tipo alfisol con texturas desde arcilloso a franco arcilloso y franco arenoso lo que posibilita la difusión del Cesio 137 hacia capas más profundas. En El Dorado se encontraron suelos vertisoles con textura arcillosa provocando la retención del Cesio 137 en la primeras capas del perfil de suelo y disminuyendo a medida que aumenta la profundidad.

Actividades de Cesio 137 en los sitios de estudio

Los valores de las actividades específicas de Cesio 137 (Bq kg^{-1}) y de distribución de los inventarios de Cesio 137 (Bq m^{-2}) en todos los sitios de estudios ubicados en las zonas ZE-I y ZE-II de la subcuenca del Río Ochomogo se presentan en la Tabla 2. Las actividades específicas de Cesio variaron entre valores mínimos no detectables a máximos de 0.60 Bq kg^{-1} en la zona ZE-I y hasta 0.68 Bq kg^{-1} en la zona ZE-II. Los valores calculados para la distribución de los inventarios de Cesio 137 variaron entre mínimos no detectables hasta 88.77 Bq m^{-2} en la zona ZE-I y hasta 114.81 Bq m^{-2} en la zona ZE-II.

Tabla 2

Actividades específicas y distribución del inventarios de Cesio 137 en los perfiles de suelo en las zonas de estudio I y II de la subcuenca del Río Ochomogo.

Zonas de estudio	Sitios de estudio	Tipo de cultivo	Profundidad (cm)	Actividad de ^{137}Cs (Bq kg^{-1})	Inventario de ^{137}Cs (Bq m^{-2})
ZE-I	La Barraza	Caña de azúcar	0 - 5	0.44	82.09
			5 - 10	0.42	49.92
			10 - 20	0.43	66.75
			20 - 30	0.04	6.07
			Total	1.33	204.83
	La Enramada	Arroz	0-5	0.13	23.09
			5-10	No detectado	No detectado
			10-20	No detectado	No detectado
			20-30	No detectado	No detectado
			Total	0.13	23.09
	Paso Real	Plátano	0 - 5	0.60	87.07
			5 - 10	0.48	67.25
			10 - 20	0.55	88.20
			20 - 30	0.59	88.77
			Total	2.22	331.28
ZE-II	Hacienda San Antonio	Pasto	0 - 5	0.23	40.49
			5 - 10	0.12	22.79
			10 - 20	0.09	16.42
			20 - 30	0.27	48.84
			Total	0.72	128.54
	La Calera	Maíz	0 - 5	0.62	103.35
			5 - 10	0.68	114.81
			10 - 20	0.31	57.05
			20 - 30	No detectado	No detectado
			Total	1.62	275.22

Zona de estudio I (ZE-I)

Sitio de estudio La Barraza (SE-LB)

El perfil de suelo ubicado en la Barraza presentó valores de Cesio 137 muy similares desde 0 hasta 20 cm de profundidad ($0.42\text{-}0.44 \text{ Bq kg}^{-1}$) disminuyendo drásticamente al llegar al último estrato muestreado (Tabla 2). Este comportamiento pudiera estar asociado al uso de maquinaria agrícola en la preparación del suelo para el cultivo de la caña de azúcar en la que se mezclan los primeros estratos (0-25 cm), que es donde se encuentra el Cesio 137 (Walling & Quine, 1995). Además, este sitio por estar ubicado en la parte baja de la subcuenca del Río Ochomogo presenta poca pendiente la cual no favorece el arrastre de las partículas de suelo por escorrentía superficial debilitando los procesos de erosión y por ende el movimiento del Cesio 137. Otra posible explicación a lo encontrado es el tipo de suelo de la zona, que es vertisol (Caballero, 2007) que se caracteriza por tener alto contenido de arcilla lo que podría generar una fuerte retención del Cesio 137 en las capas superficiales del suelo. La mayor parte del Cesio 137 depositado es fuertemente absorbido por intercambio iónico sobre las partículas del suelo, siendo este proceso muy rápido en las arcillas (Sibello & Febles, 2011). Por lo tanto, la distribución del radioisótopo mostró clara correspondencia con las características del tipo de suelo del sitio de estudio.

Sitio de estudio La Enramada (SE-LE)

El Cesio 137 en el perfil de suelo del sitio La Enramada (SE-LE) se encontró solamente en los primeros cinco cm de profundidad (Tabla 2) y pudiera estar asociado al manejo y el tipo de labranza utilizada en la preparación del suelo para el cultivo de arroz. Según Muñoz (2016), en cultivos como el arroz el encharcamiento puede generar circulación de agua hacia abajo, lo que provoca la lixiviación de las sales y nutrientes debido a

la pérdida de partículas finas de arcilla y limo; provocando probablemente también la pérdida del Cesio 137 que ha sido incorporado al suelo por la precipitación. Otra posible causa de este hallazgo es que el uso creciente de pases de rastra o gradas como sistema más común de preparación de suelos en el cultivo de arroz entre los primeros 5 a 10 cm de profundidad causa compactación (Muñoz, 2016); lo que crea pérdida en la capacidad de infiltración del agua, costras superficiales e intensificación de procesos erosivos (Murillo, 2006). Esto a su vez puede afectar la distribución y reducción del tamaño de los poros en el suelo (Bissonnais, 1996); provocando el aumento del transporte de grandes cantidades de materiales sueltos del suelo por escorrentía superficial arrastrando presuntamente consigo al Cesio 137 e impidiendo que este migre hacia las capas más profundas del suelo.

Sitio de estudio Paso Real (SE-PR)

La distribución del Cesio 137 en el perfil de suelo ubicado en Paso Real reflejó cierta homogeneidad en su contenido de 0 a 30 cm de profundidad porque durante la preparación del terreno para el cultivo de plátano se realizan grandes movimientos del suelo con arados hasta una profundidad de 0.40 m, además de rastrear para desmenuzar los terrones e incorporar rastros (CENTA, 2010). Es relevante mencionar que el inventario de Cesio 137 en este sitio de estudio es menor que el inventario del sitio de referencia, lo cual podría implicar que el depósito de suelo es el proceso predominante (Sibello, 2013). Esta situación pudo ser favorecida por el tipo de suelo (Vertisol) el cual contiene partículas de arcillas (Caballero, 2007), logrando retener el Cesio 137 en la matriz.

Las actividades de Cesio 137 encontradas en la capa de 5-10 cm del perfil de suelo fue inferior a las de 10-20 cm y 20-30 cm (Tabla

2) y se explica por los procesos de erosión, transporte de sedimento y la propia acción de laboreo de la tierra ya que para el cultivo de plátano se realizan movimientos del suelo con el arado a grandes profundidades. El Cesio 137 encontrado en este sitio está relacionado con el uso, el tipo de suelo y por la pendiente que favorece el transporte del suelo desde la parte más alta del área cercana hacia el sitio de estudio ubicado en la parte baja.

Zona de estudio II (ZE-II)

Sitio de estudio Hacienda San Antonio (SE-HSA)

En el perfil de suelo localizado en la Hacienda San Antonio el contenido de Cesio 137 disminuyó con respecto al incremento de la profundidad en las primeras tres capas del perfil (0-5 cm, 5-10 cm y 10-20 cm), a excepción de la capa más profunda del perfil que presenta incremento en su contenido de Cesio 137 (Tabla 2). Esta distribución del Cesio 137 en la última capa del perfil del suelo de 20-30 cm no es la característica debido a que en esta profundidad no debería encontrarse Cesio 137. Cabe mencionar, que este sitio de estudio se utiliza para pasto del ganado, sin embargo, posiblemente alguna práctica de laboreo anteriormente mezcló todo el perfil del suelo en la zona de estudio. Además los suelos en este sitio de estudio son del tipo molisoles, los cuales presentan textura de franco arenoso a franco arcilloso provocando poca retención del Cesio 137 y migración hacia las capas más profundas en el perfil de suelo. Los suelos en la subcuenca del Río Medina son del tipo molisol (Caballero, 2007).

Sitio de estudio La Calera (SE-LC)

El perfil de suelo ubicado en La Calera mostró en las dos primeras capas (0-5 cm y 5-10 cm) valores muy similares de Cesio 137 disminuyendo con el incremento de la

profundidad hasta no ser detectable por debajo de los 30 cm (Tabla 2). En este sitio de estudio se observa una homogenización del Cesio 137 posiblemente porque alguna técnica de cultivo mezcló el suelo en los primeros 10 cm de profundidad. 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 (Fundación Chile, 2011).

Distribución del inventario de Cesio 137 en los perfiles de suelo de los sitios de estudio

Los valores de los inventarios totales en la mayoría de los perfiles de suelo en los sitios de estudio son menores al compararlo con los inventarios del sitio de referencia; lo que demuestra que la mayoría de los sitios de estudio están afectados por erosión. Sin embargo el inventario total en el sitio de estudio utilizado para cultivo del plátano ubicado en Paso Real es menor al compararlo con el inventario total del sitio de referencia, lo cual infiere que la pérdida de suelo es nula y predomina el depósito de suelo en la parcela estudiada (Figura 2).

En los sitios de estudio de la zona I ubicados en La Barraza y la Enramada los inventarios de Cesio 137 fueron menores que el inventario del sitio de referencia localizado en El Dorado, no así el del sitio de estudio ubicado en Paseo Real (Tablas 1 y 2). Para la zona de estudio II en los sitios La Hacienda San Antonio y La Calera los inventarios de Cesio 137 presentan el mismo comportamiento, siendo menores los inventarios de Cesio 137 al compararlos con los inventarios de Cesio 137 del sitio de referencia ubicado en Valle Menier (Tablas 1 y 2). De manera general podríamos inferir que el proceso predominante en las parcelas estudiadas de la subcuenca del Río Ochomogo es la pérdida de suelo.

El comportamiento de los inventarios de Cesio 137 por cultivos establecidos actualmente en los sitios de estudio se muestran en la figura 2. En la zona I se cultivan caña de azúcar (La Barraza), arroz (La Enramada) y plátano (Paso real); mientras que en la zona II los suelos son utilizados para pasto (Hacienda San Antonio) y cultivo de maíz (La Calera).

En general, los valores de las actividades totales de Cesio 137 e inventarios totales de Cesio 137 constituyen una señal de alerta de la magnitud de los procesos de erosión en los diferentes suelos estudiados en base a los

cultivos que se llevan a cabo en la zona de estudio I y II, y una justificación para estudios futuros de estimación de pérdida de suelo aplicando esta técnica nuclear. En todos los perfiles de suelos de los sitios de estudio se produce una mezcla del suelo arado con el radioisótopo Cesio 137 ocasionando una distribución homogénea a lo largo del perfil de suelo. La erosión se caracteriza por una actividad de Cesio 137 significativamente menor en los sucesivos incrementos de profundidad y un inventario total en el sitio de muestreo menor al total del sitio de referencia.

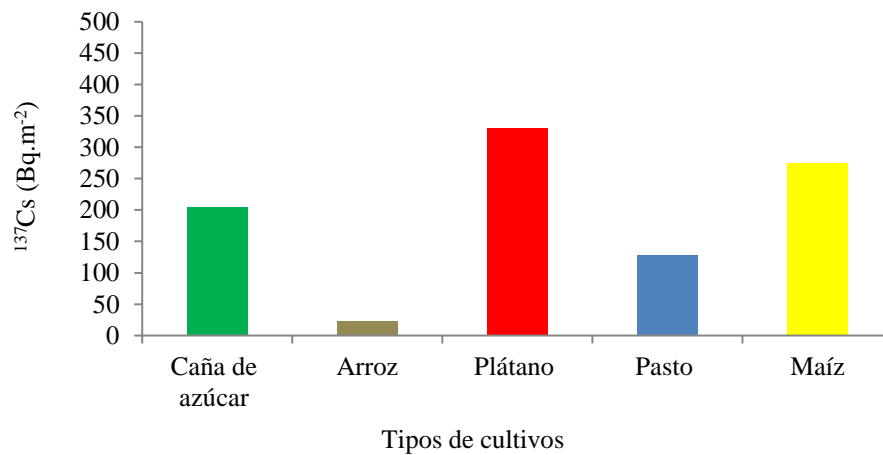


Figura 2. Variaciones de los inventarios totales de Cesio 137 ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$) por tipo de cultivo en los sitios de estudio de la subcuenca del Río Ochomogo.

Estimación de la redistribución de Cesio 137 y la erosión

En la Tabla 3 se presentan el porcentaje de redistribución del Cesio 137 en los perfiles de suelo en los sitios de estudio y la estimación de las pérdidas de suelo o erosión calculadas mediante el modelo proporcional en los perfiles de suelos en los sitios de estudio. Los

porcentajes de redistribución calculados en todas las muestras de estudio fueron negativos implicando que el principal proceso encontrado es la pérdida de suelo por erosión, siendo el suelo menos impactado el del sitio ubicado en la Enramada (zona I) donde se cultiva arroz y el de mayor impacto el del sitio ubicado en La Calera (zona II) donde se cultiva maíz (Figura 3).

Tabla 3

Porcentaje de redistribución de Cesio 137 en perfiles de suelo en los sitios de estudio y estimación de las pérdidas de suelo calculadas por el modelo proporcional en la subcuenca del Río Ochomogo.

Zonas	Sitios de estudio	Tipo de cultivo	Profundidad (cm)	Porcentaje de redistribución del suelo	Pérdida de suelo (ton ha ⁻¹ año ⁻¹)
Zona de estudio I (ZE-I)	La Barraza	Caña de azúcar	0 - 5	-66.73	0.168
			5 - 10	-79.77	
			10 - 20	-72.95	
			20 - 30	-97.54	
			Total	-316.99	
	La Enramada	Arroz	0-5	-90.64	0.019
			5-10		
			10-20		
			20-30		
			Total	-90.64	
	Paso Real	Plátano	0 - 5	-64.72	0.272
			5 - 10	-72.75	
			10 - 20	-64.26	
			20 - 30	-64.03	
			Total	-265.75	
Zona de estudio II (ZE-II)	Hacienda San Antonio	Pasto	0 - 5	-90.61	0.105
			5 - 10	-94.71	
			10 - 20	-96.19	
			20 - 30	-88.67	
			Total	-370.19	
	La Calera	Maíz	0 - 5	-76.03	0.578
			5 - 10	-73.37	
			10 - 20	-86.77	
			20 - 30		
			Total	-236.17	

Cuando se realizó el muestreo se notó que el suelo de La Calera estaba desprovisto de cubierta vegetal lo que corrobora las pérdidas de suelo y probablemente es el manejo del terreno la que favorece el transporte de sedimentos por escorrentía superficial aumentando la erosión del suelo en este sitio

de estudio (Figura 4). Por otro lado, los resultados obtenidos en los perfiles de los suelos utilizados para el cultivo de plátano, caña de azúcar y pasto para el ganado mostraron pérdidas menores que la calculada para el cultivo de maíz (Tabla 3; Figura 3).

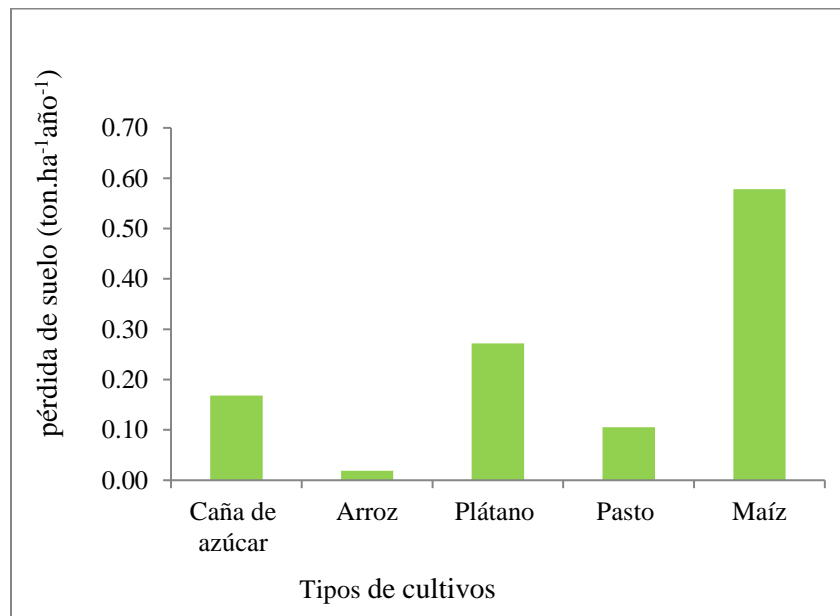


Figura 3. Variación de las pérdidas de suelos en los sitios de estudio en la subcuenca del Río Ochomogo.



Figura 4. Suelo desprovisto de cobertura vegetal.

Figura 5. Suelo utilizado para pasto de ganado.

En condiciones naturales el suelo con mínima pendiente debe estar menos expuesto a la erosión; sin embargo, los resultados muestran como la actividad antrópica favorece la pérdida de suelo por erosión en los sitios de estudio ubicados en La Calera y Paso Real (Figura 5). Esto evidencia que el suelo que está desprovisto de su cobertura vegetal y que además está expuesto a incorrectas técnicas de cultivos es más propenso a ser erosionado (Sibello, 2013). Para el año 2005, Domínguez, había reportado el deterioro de los suelos de Nandaime usados para cultivos similares ya que en su mayoría han perdido el horizonte superficial, están compactados, tienen baja infiltración y muestran susceptibilidad a la erosión. El maíz es el principal cultivo que está provocando mayor erosión en la subcuenca del Río Ochomogo, según la técnica nuclear de Cesio 137 utilizada en este estudio. Estos resultados no reflejan variación, porque de acuerdo a un estudio realizado utilizando la técnica Isótopos Estables de Compuestos Específicos (CSSI), Caballero y De los Santos, (2018), encontraron que el origen de los sedimentos acumulados en los suelos de la subcuenca del Río Tapacalí provienen principalmente del cultivo de maíz.

De acuerdo a los factores considerados en la metodología para evaluar la clase de degradación por erosión hídrica de la FAO, (1983) citado por Uribe (2003, pág. 35) los valores de las pérdidas de suelos estimados en los perfiles de suelos para este estudio se corresponden con la clasificación de erosión nula o ligera en las dos zonas de estudio.

Sin embargo, todas las estimaciones calculadas para los suelos en las dos zonas de estudio en la subcuenca del Río Ochomogo implicaron la importancia del proceso de erosión lo que podría convertirse en un problema ambiental de primera magnitud debido a la aceleración de los procesos

erosivos como consecuencia de la sobreexplotación y la gestión inadecuada de las tierras agrícolas y forestales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con la aplicación de la técnica nuclear se pudieron determinar los inventarios y conocer los patrones de distribución del Cesio 137 en los perfiles de suelo en los cinco sitios estudiados y estimar con un muestreo y de manera rápida las tasas de erosión en la subcuenca del Río Ochomogo. Los resultados obtenidos sugieren que la actividad de Cesio 137 está fuertemente condicionada por el uso y tipo de suelo. De acuerdo al modelo proporcional utilizado para estimar la erosión, los suelos que presentaron más erosión en orden descendente son los utilizados para el cultivo de maíz, caña de azúcar, plátano, pasto para ganado y arroz.

Se recomienda fomentar la ejecución de proyectos de investigación a nivel de cuencas que favorezcan el intercambio de resultados y experiencias a nivel nacional en el uso de la técnica de Cesio 137 para un mejor manejo y conservación de los suelos e incrementar su uso sostenible con el fin de satisfacer la producción de alimentos y seguridad alimentaria del país de manera responsable con el ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) por el apoyo al participar en el proyecto NIC5009 “Gestión ambiental integrada en la cuenca hídrica de los grandes lagos y el Río San Juan de Nicaragua: respondiendo a los desafíos futuros en alianzas estratégicas con técnica nucleares, modelación metodologías participativas” y por realizar el entrenamiento en toma de muestras de Cesio 137 en perfiles de suelos y por permitir la publicación de este artículo. Al Centro para la Investigación en Recursos

Acuáticos de Nicaragua, CIRA/UNAN-Managua por el apoyo y permitir publicar este artículo en la revista Agua y conocimiento, en especial a la Dra. Katia Montenegro Jefa del Area de Investigación y Desarrollo por las sugerencias y recomendaciones hechas al borrador de este artículo y al personal de Radioquímica Ambiental que apoyó en el muestreo y ejecución de los análisis de Cesio 137.

REFERENCIAS

- Bissonnais, Y. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47, 425-437. doi:10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x
- Caballero Arbizú, Y. S., & de los Santos-Villalobos, S. (2018). Origen de suelos depositados en la subcuenca del río Tapacalí, Madriz, Nicaragua, mediante el uso de la técnica de isótopos estables de compuestos específicos. *Aqua-LAC*, 10(1), 51-60. doi:10.29104/PHI-2018-AQUALAC-V10-N1-05
- Caballero, Y. S. (2007, Marzo). Potencial hidrológico y calidad de las aguas superficiales en la subcuenca del río Ochomogo.
- CENTA. (2010, Diciembre). Guía técnica del cultivo del plátano - PROGRAMA MAG-CENTA-FRUTALES. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria "Enrique Álvarez Córdova".
- Davis, J. (1963). Cesium and its relationship to potassium in ecology. In V. Shultz, & A. Klement (Eds.), *Radioecology* (pp. 539-556). Reinhold, New York.
- Dominguez Silva, M. J. (2005, abril). Evaluación de la calidad de los suelos de laderas de Nandaime, a través de la identificación y uso de indicadores técnicos locales. *Tesis para optar al título de Ingeniero en recursos naturales renovables*. Managua.
- FAO. (2008). *Aumenta la degradación del suelo*. (A. Small, Editor) Retrieved 07 17, 2018, from <http://www.fao.org/Newsroom/es/news/2008/1000874/index.html>
- Fundación Chile. (2011). *Cropcheck Chile: Manual de recomendaciones cultivo de maíz grano*. Santiago: Unidad Cropcheck Chile® - Alimentos y Biotecnología.
- IAEA. (2008). *Proyecto "Environmental Radionuclides as Indicators of Land Degradation in Latin American, Caribbean and Antarctic Ecosystems"*, RLA 5/051 (ARCAL C). Cuba: International Atomic Energy Agency.
- Lal, R. (1994). *Soil erosion: research methods* (2 ed.). CRC Press.
- Longmore, M. (1982). The caesium-137 dating technique and associated applications in Australia - a review. *Archaeometry: an Australasian perspective*. (P. Duerden, Ed.)
- Muñoz, D. (2016). Diagnóstico de la degradación de los suelos en cultivos de arroz riego intermitente y secano bajo el sistema de labranza tradicional aplicado, en los llanos del Casanare. Palmira, Colombia.
- Murillo, R. (2006). Comportamiento agronómico de arroz (*Oryza sativa*) Línea Cr-2515 Sembrado En Mínima Labranza, En Upala, Alajuela, Costa Rica. *Práctica de Especialidad presentada ante la Escuela de*

- Agronomía, como requisito parcial para optar por el grado de Bachillerato en Ingeniería en Agronomía.* Costa Rica: Instituto Tecnológico De Costa Rica Sede Regional San Carlos - Escuela De Agronomía.
- 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. doi:10.2134/jeq1990.00472425001900020006x
- Sibello, R. Y. (2013, julio). Estudio de la erosión de los suelos en áreas protegidas de Cienfuegos, utilizando el cesio 137 como radiotrazador. *Tesis Doctoral*. Cienfuegos, Cuba.
- Sibello, R. Y., & 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.
- Uribe, J. M. (2003). *Evaluación de la degradación antropogénica del suelo utilizando sistemas de información geográfica: Caso cuenca campo uno, cerro grande*. Tesis para obtener el grado de Maestría en ciencias área: Geomática., Coquimatlán.
- Walling, D., & Quine, T. (1995). *The use of fallout radionuclide measurements in soil erosion investigations*. International Atomic Energy Agency (IAEA).
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning*. USA: USDA, Science and Education Administration.