



Determination of Net Soil Erosion Rate Using ^{137}Cs in a Slope Agroecosystem

Determinación de tasas de erosión neta de suelo utilizando ^{137}Cs en un agroecosistema de ladera

PhD. Alonso David Ojeda-Falcón¹, PhD. Olgioy Domínguez-Quintero

¹Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Instituto de Zoología y Ecología Tropical, Centro de Ecología Aplicada, Laboratorio de Agroecología, Caracas, Venezuela.

²Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela Básica, Laboratorio de Investigación, Caracas, Venezuela.

ABSTRACT. The severe and moderate erosion of soils has caused the degradation of 80% of the agricultural land of the planet. Sloping agriculture, without soil conservation measures, together with the occurrence of extreme climatic events, increasingly frequent, as a consequence of climate change, has accelerated these phenomena, at rates of 5-7 million degraded hectares/year. In this work, ^{137}Cs , an anthropogenic environmental radionuclide, was used to estimate soil erosion rates in a vegetable agroecosystem located in Waraira Repano National Park, Vargas State, Venezuela. With this aim, three soil cores were extracted, sectioned at depths of 0-20; 20-40 and 40-60 cm, in each of the 26 and 28 equidistant vertices distributed in the study and reference sites, respectively. Measuring the activity of ^{137}Cs in each depth, it was possible to establish the contrasting patterns of its distribution within the profiles; and through the use of conversion, Proportional and Mass Balance I models, the estimation of erosion rates was obtained. These showed gross and net erosion rates of 24.7 and 39.7; and 19.8 and 29.3, $\text{Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, respectively. The benefits of nuclear techniques in soil erosion and redistribution studies are confirmed; allowing forecasting prospectively and retrospectively, the vulnerability of the productive capacity of the soils, which compromises the sustainability of agriculture, particularly in soils that are very susceptible to erosion, when their degree of water saturation is exceeded.

Keywords: Degradation, Soil Conservation Conversion Models, Gamma Spectroscopy.

RESUMEN. La erosión severa y moderada de los suelos ha ocasionado la degradación de un 80% de las tierras agrícolas del planeta. La agricultura en pendiente, sin medidas de conservación de suelos, unida a la ocurrencia de eventos climáticos extremos, cada vez más frecuentes, como consecuencia del cambio climático, han acelerado estos fenómenos, a tasas de 5-7 millones de hectáreas degradadas/año. En este trabajo se utilizó la espectroscopía gamma para determinar la actividad del ^{137}Cs , un radionúclido ambiental de origen antrópico, para estimar las tasas de erosión de suelo, en un agroecosistema de hortalizas, ubicado en el Parque Nacional Waraira Repano, estado Vargas, Venezuela. Con este objetivo, se extrajeron tres núcleos de suelo, seccionados a las profundidades: 0-20; 20-40 y 40-60 cm, en cada uno los 26 y 28 vértices equidistantes, distribuidos en los sitios de estudio y referencia, respectivamente. La actividad del ^{137}Cs determinada en cada profundidad, permitió establecer patrones contrastantes de su distribución en los perfiles; y sirvió para estimar las tasas de erosión, mediante los modelos de conversión, Proporcional y de Balance de Masas I, que arrojaron tasas de erosión bruta y neta de: 24,7 y 39,7; y 19,8 y 29,3, $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente. Los beneficios de las técnicas nucleares, permiten además, determinar la redistribución de los suelos; y prever prospectiva y retrospectivamente, la vulnerabilidad de la capacidad productiva de los suelos, que compromete la sustentabilidad de la agricultura, particularmente en suelos muy susceptibles a la erosión, al sobrepasar su grado de saturación hídrica.

Palabras clave: degradación, conservación de suelos, modelos de conversión, espectroscopía gamma.

* Author for correspondence: Alonso David Ojeda-Falcón, e-mail: alonso.ojeda@gmail.com

Received: 15/03/2019.

Approved: 19/12/2019.

INTRODUCTION

Soil degradation has affected more than 1.9 billion hectares of the world's cultivated lands, due to severe-moderate erosion phenomena, caused by surface-water action (Mabit et al., 2014). This, in turn, generates ecological and socio-economic impacts, associated with the reduction of soil productivity, water pollution and the sedimentation phenomena of reservoirs and rivers. Consequently, techniques to determine erosion rates, that offer practicality, certainty and, allow a prospective and retrospective assessment, have a high significance for decision-makers regarding public policies in agriculture and the environment.

The environmental, anthropic and natural radionuclides can be used as tracers because they are deposited in the soil from the atmosphere by precipitation, subsequently suffering the same redistribution due to the different erosion factors to which the soils they adhered to are subjected. The main radionuclides used for this type of study are: ^7Be of cosmogenic origin; ^{137}Cs of anthropogenic origin, generated by tests of thermonuclear weapons and accidents in nuclear reactors (Chernobyl, Fukushima and others on a smaller scale); ^{210}Pb of natural origin, generated from the ^{222}Rn decay of the ^{238}U series, part of the ^{222}Rn diffuses through the subsoil to the atmosphere where it decays to ^{210}Pb and eventually precipitates and redistributes in the soils. By measuring the activity of ^{210}Pb and ^{226}Ra parent, it is possible to determine the $^{210}\text{Pb}_{\text{excess}}$ that is out of balance with the ^{226}Ra (Zapata, 2002).

Accordingly, using Gamma spectroscopy to measure the activity of ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ and ^7Be , deposited in the soil, even in very low quantities, information to generate distribution patterns, erosion rates, and sedimentation can be determined, at different time scales. Therefore, depending on the radionuclide used, different time spans can be integrated, from a singular event up to a period of three months measuring the activity of ^7Be , up to periods ranging from 30 years in the case of ^{137}C (anthropogenic) to 100 years with $^{210}\text{Pb}_{\text{excess}}$.

Erosion estimates with nuclear techniques, are retrospective. They can be obtained conveniently, making a single sampling at the study sites, without intervening in normal farming operations. Measurements can be scaled from plots to watersheds, without any other consequence than an increase in the number of samples to be analyzed; and in turn, the soils redistribution rates represent the integrated effects of the movement of particulate material, under the uses and management of each unique ecosystem. Hence, nuclear techniques through the use of environmental radionuclides have been widely used for these purposes (Ritchie y McHenry, 1990; Zapata, 2002; Mabit et al., 2014).

The anthropogenic ^{137}Cs radionuclide circulates in the atmosphere following nuclear explosions and accidents that have occurred since 1950. This radionuclide enters the soil through atmospheric precipitation and is strongly retained in the organic-mineral complex of the layers more superficial soils according Mabit et al. (2002) and their vertical migration is very limited (Bunzl et al., 1989). The redistribution balance or total activity of the ^{137}Cs radionuclide per unit

INTRODUCCIÓN

La degradación de los suelos ha afectado más de 1,9 billones de hectáreas de las tierras cultivadas del mundo, debido a fenómenos de erosión, severa-moderada, originada por la acción hídrica-superficial (Mabit et al., 2014). Esto, a su vez, genera impactos ecológicos y socio-económicos, asociados a la reducción de la productividad de los suelos, a la contaminación de las aguas y a los fenómenos de sedimentación de embalses y ríos. De allí, que las técnicas para determinar tasas de erosión, que ofrezcan practicidad, certidumbre; y, permitan una valoración prospectiva y retrospectiva, tienen una alta significación para decisores en materia de políticas públicas en agricultura y ambiente.

Los radionúclidos ambientales, antrópicos y naturales pueden ser utilizados como trazadores debido a que, son depositados en los suelos desde la atmósfera mediante precipitación, sufriendo posteriormente la misma redistribución debido a los diferentes factores de erosión a los cuales están sometidos los suelos a los que se adhieren. Los principales radionúclidos utilizados para este tipo de estudio son: ^7Be de origen cosmogénico; ^{137}Cs de origen antropogénico, generados por pruebas de armas termonucleares y accidentes en reactores nucleares (Chernobyl, Fukushima y otros a menor escala); ^{210}Pb de origen natural, proveniente del decaimiento del ^{222}Rn de la serie de decaimiento del ^{238}U , parte del ^{222}Rn se difunden a través del subsuelo hacia la atmósfera donde decae a ^{210}Pb y eventualmente precipita y se redistribuye en los suelos. Midiendo la actividad del ^{210}Pb y del padre ^{226}Ra es posible determinar el $^{210}\text{Pb}_{\text{exceso}}$ que se encuentra fuera de equilibrio con el ^{226}Ra (Zapata, 2002).

Es así que, midiendo la actividad, por espectroscopia Gamma, de ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ y ^7Be , depositados en el suelo, aun en cantidades muy bajas, se puede determinar información para generar patrones de distribución, tasas de erosión y sedimentación, en distintas escalas temporales. Dependiendo del radionúclido utilizado, se pueden integrar lapsos temporales diferentes, desde un evento singular hasta un lapso de tres meses con las medidas de la actividad del ^7Be , hasta periodos que van desde 30 años en el caso del ^{137}C (antropogénico) hasta 100 años con $^{210}\text{Pb}_{\text{exceso}}$.

Las estimaciones de erosión con técnicas nucleares, son retrospectivas, pueden obtenerse oportunamente, realizando un solo muestreo en los sitios de estudio, sin intervenir en las operaciones normales de cultivo; las mediciones, pueden escalarse desde parcelas hasta cuencas hidrográficas, sin ninguna otra consecuencia que el incremento del número de muestras a ser analizadas; y a su vez, las tasas de redistribución de los suelos, representan los efectos integrados del movimiento del material particularizado, bajo los usos y manejos singulares de los ecosistemas. Por estas razones, las técnicas nucleares mediante el uso de radionúclidos ambientales han comenzado a ser ampliamente utilizadas con estos fines (Ritchie y McHenry, 1990; Zapata, 2002; Mabit et al., 2014).

El ^{137}Cs es un radionúclido de origen antrópico, que circula en la atmósfera terrestre, a raíz de las explosiones y accidentes nucleares ocurridos a partir de 1950. Este radionúclido entra a los suelos mediante precipitación atmosférica y es fuertemente retenido en el complejo orgánico-mineral de las capas más superficiales de los suelos según Mabit et al. (2002) y su migración vertical es muy limitada (Bunzl et al., 1989). El balance de redistribución o actividad total del radionúclido por unidad de

area is based on its inventory, measured at a given sampling site and compared to a reference site corresponding to an inventory of accumulation of inputs, taking into account the difference in behavior of cultivated soils (study sites) and non-cultivated soils (reference area). The quantitative estimation of the erosion and sedimentation rates from the measurements of the ¹³⁷Cs activities requires the use of conversion models that are developed based on the physical processes that influence the interrelations between the magnitude of the reduction or increase in the inventory of ¹³⁷Cs and land redistribution.

The main objective of this work was to use the ¹³⁷Cs measurements and the Proportional and Mass Balance-1 conversion models to estimate the net erosion rates in a slope agroecosystem cultivated with horticulture.

METHODS

The study area was located in Waraira Repano National Park, Camino de Los Españoles, next to Caracas Valley, of tectonic origin and formed with Tertiary and Quaternary sediments. It is part of the Venezuelan central coast mountain range, which extends, around four hundred kilometers, parallel to the coast in an east-west direction, from the depression of the Unare to the depression of Yaracuy.

área está basado en el inventario de ¹³⁷Cs, medido en un sitio de muestreo dado, comparado con un sitio de referencia que corresponde a un inventario de acumulación de las entradas, tomando en cuenta la diferencia de comportamiento de los suelos cultivados (sitios de estudio) y no cultivados (sitio de referencia). La estimación cuantitativa de las tasas de erosión y sedimentación a partir de las mediciones de actividades del ¹³⁷Cs, requiere el uso de modelos de conversión que son desarrollados sobre la base de los procesos físicos que influyen las interrelaciones entre la magnitud de la reducción o incremento en el inventario de ¹³⁷Cs y la redistribución del suelo.

El objetivo principal de este trabajo es utilizar las mediciones de ¹³⁷Cs y los modelos de conversión, Proporcional y de Balance de Masa I, para estimar las tasas de erosión neta en un agroecosistema en pendiente cultivado con hortalizas.

MÉTODOS

El área de estudio, se identificó en el Parque Nacional Waraira Repano, Camino de Los Españoles, contiguo a El Valle de Caracas, de origen tectónico y rellenado con sedimentos del Terciario y el Cuaternario. Forma parte de la Cordillera de la Costa Central de Venezuela, de unos cuatrocientos kilómetros de longitud, que se extiende paralela a la costa en dirección este-oeste, desde la depresión del Unare hasta la depresión de Yaracuy.

TABLE 1. Geographic coordinates of reference area and study sites, National Park Waraira Repano
 TABLA 1. Coordenadas geográficas del área de referencia y los sitios de estudio, Parque Nacional Waraira Repano

Longitude West	Latitude North	Locations	Reference area and study sites
66.95169	10.543487	El Fortín de La Cumbre, south slope	Reference Area (RA)
66.94493	10.549852	Production Unit Hoyo de La Cumbre	Study area, erosion site (ES)
66.94467	10.549769	Production Unit Hoyo de La Cumbre	Study area, deposition site (DS)

Table 1 shows the geographic coordinates of the study sites described following:

Reference area (RA) was located in El Fortín de La Cumbre, historically identified as one and the largest of a line of small fortifications that guarded the Camino de Los Españoles; built in 1770, located at 1,428 meters above sea level, with an average annual rainfall of 774 mm according to the record of the meteorological station, serial 5050.

Study sites: The erosion site (ES) is located in Hoyo de La Cumbre, an area under agricultural development since ancient times. It is a horticulture agroecosystem, located 700 meters from El Fortín de La Cumbre (reference area) where slope agriculture has been practiced, with power tiller, sprinkler irrigation and fertilization with NPK formulas 12-24-12 in 2-3 ha extensions. The identification of the deposition site (DS) was carried out in a narrow strip, close to the road bank, in which there is an abrupt change of the slope and the sediments are deposited (Fig. 1). In the DS, preliminary field tests allowed determining an effective soil depth of 80 cm, in contrast to the effective soil depth of 25-30 cm at the erosion site (ES).

La Tabla 1, muestra las coordenadas geográficas del área de referencia y los sitios de estudio, que a continuación se describen:

Área de referencia (A_R): Se localizó en El Fortín de La Cumbre, identificado como una y la mayor de una línea de pequeñas fortificaciones que guardaban el Camino de los Españoles; construida en 1770, ubicada a 1 428 m.s.n.m., con una precipitación promedio anual de 774 mm de acuerdo al registro de la estación meteorológica, serial 5050.

Sitios de estudio: Se encuentran ubicados en Hoyo de La Cumbre, que es una zona bajo fomento agrícola desde tiempos remotos. Se trata de un agroecosistema de hortalizas, localizado a 700 m del Fortín de La Cumbre (área de referencia) en la que se practica una agricultura en pendiente, con labranza de monocultivo, en extensiones de 2-3 ha; riego por aspersión y fertilización con fórmulas de NPK 12-24-12. La identificación del sitio de depósito (S_D) se realizó en una franja estrecha, próxima al talud de la vialidad, en la que se produce un cambio abrupto de la pendiente y se depositan los sedimentos (Figura 1).



FIGURE 1. North- south orientated plane and slope changes of the DS.
 FIGURA 1. Pendiente de orientación norte-sur y cambio de la pendiente en el S_D .

Soil sampling: In the RA a systematic sampling of regular distribution (3 m x 5 m) was established, which defined 28 vertices in 7 points and 4 rows. In the study area (ES and DS) a sampling design similar to that of the RA was established, but with spacing of 10 m x 10 m and a total of 26 points. At each central sampling point, 2 replicas were taken at a radio distance of 0.5 m, for a total of 3 sub-samples for each of the sampling depths: 0-20; 20-40 and 40-60 cm, which allowed forming a composite sample for each vertex and study depth. It was only possible to obtain samples at depths of 60-80 cm in the deposit area.

In Figure 1, the changes of the topography in the agroecosystem of horticulture with two inclination planes are shown. They allowed identifying the erosion site with 25% inclination and the deposition site, where sediments from surface runoff was redistributed by the action of hydric erosion. The lower plane, orientated towards the south-east, was localized at 1264.5 m above sea level, whereas the highest plane orientated north-east, was 1279.5 m above sea level, originating a total variation of 15m in the 60m between the altitudinal extremes (Fig. 1 and 2).

The soil cores extracted for each depth: 0-20; 20-40 and 40-60 cm, were dried at room temperature, then homogenized, weighed and sieved, through a 2 mm mesh. The 3 sub-samples of each point were mixed to form a composite sample of each point/depth.

To determine the ^{137}Cs activity, a Canberra gamma spectrometer with hyperpure germanium, HPGe, coaxial detector with relative efficiency of 30% and the Genie 2000 V3.1 program were used. Known masses of the composite samples placed in identified, closed and sealed vessels were positioned in the HPGe detector and measurements were taken in 48 and 72-hour periods.

En el S_D , las pruebas preliminares de campo permitieron determinar una profundidad efectiva del suelo de 80 cm, en contraste con la profundidad efectiva del suelo en el área de erosión (25-30 cm).

Muestreo de suelo: En el A_R se estableció un muestreo sistemático de distribución regular, 3 m x 5 m, que definió un total de 28 vértices en 7 puntos y 4 hileras. En el área de estudio se estableció un diseño de muestreo similar al del área de referencia, pero con distanciamientos de 10 m x 10 m y un total de 26 puntos. En cada punto central de muestreo, se tomaron 2 réplicas a una distancia de radio de 0,5 m, para un total de 3 sub-muestras para cada una de las profundidades de muestreo: 0-20; 20-40 y 40-60 cm, lo que permitió formar una muestra compuesta para cada vértice y profundidad de estudio. Sólo en el área de depósito, se obtuvieron muestras a las profundidades de 60-80 cm.

La Figura 1 muestra los cambios de relieve en el agroecosistema de hortalizas con dos planos de inclinación, que permitió identificar el sitio de erosión con pendiente de 25% y el sitio de depósito, donde se redistribuyeron los sedimentos provenientes de la esorrentía superficial por acción de la erosión hídrica. El plano más bajo, orientado al sur-este, se localizó a 1 264,5 msnm; mientras que el más alto, orientado al nor-oeste, se ubicó a 1 279,5 msnm, originando un desnivel total de 15 m separados por una distancia de 60 m entre ambos extremos altitudinales (Figuras 1 y 2).

Los núcleos de suelo extraídos para cada profundidad: 0-20; 20-40, 40-60 y 60-80 cm, se secaron a temperatura ambiente, se homogenizaron, se pesaron y se tamizaron, a través de una criba de 2 mm. Las 3 sub-muestras de cada punto se mezclaron hasta formar una muestra compuesta de cada punto/profundidad.

En envases rotulados, tapados y sellados, se colocaron las muestras compuestas de masa conocida sobre el detector de Ge y se midieron por períodos de 48 y 72 horas.

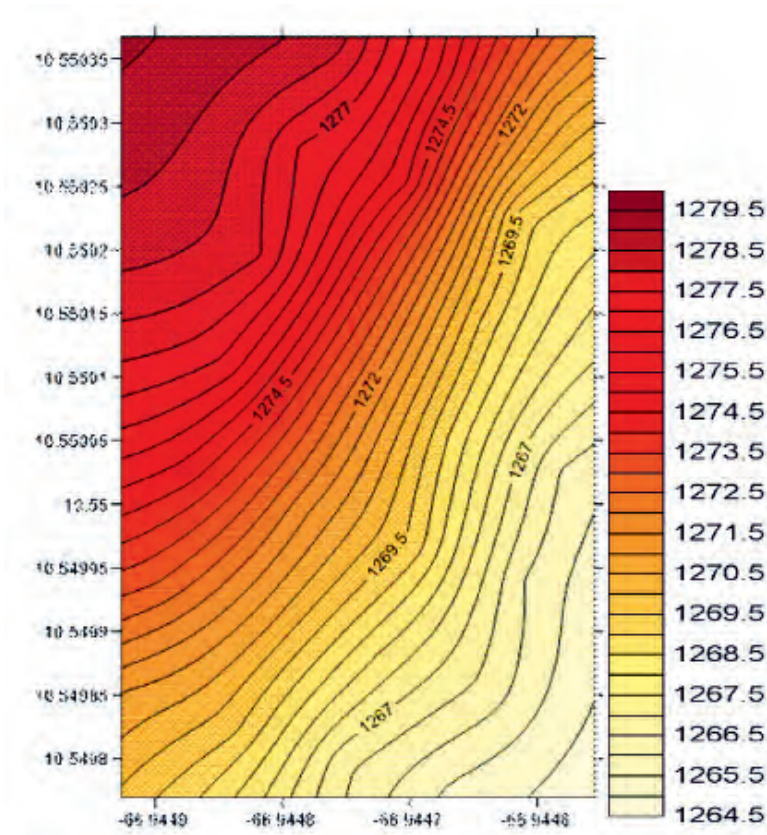


FIGURE 2. Changes in the topography of the horticulture agroecosystem at Hoyo de La Cumbre.
 FIGURA 2. Cambios de relieve en el agroecosistema de hortalizas localizado en Hoyo de La Cumbre.

These measurements were carried out at Nuclear Technology Unit of the Venezuelan Institute of Scientific Research (IVIC). The activities expressed in $Bq\ kg^{-1}$ were used to calculate depth of mass relaxation h_0 , and the activity of ^{137}Cs was determined for the reference area using equation (1):

$$A'(x) = A_{ref}(1 - e^{-x/h_0}) \quad (1)$$

Where for undisturbed soils the function may be described by Zhang et al. (1990) and Walling and Quine (1990),
 $A'(x)$ = amount of ^{137}Cs above depth x , $Bq\ m^{-2}$;
 A_{ref} = ^{137}Cs reference inventory, $Bq\ m^{-2}$;
 x = mass depth from soil surface, $kg\ m^{-2}$;
 h_0 = coefficient describing profile shape, $kg\ m^{-2}$

The Surfer 9.0 program was used to map the local topography and express erosion and deposition estimations in iso-concentrations associated with each vertex of the sampling mesh. To achieve this, precision topography ($\pm 4\ mm + 4\ ppm$) and the point of the geodesic network located at the vertex: Carlota, edo. Miranda, Datum: SIRGAS-REGVEN ($10^{\circ}29'19''$.3890 N and $66^{\circ}50'56''$.5679 W) were used.

RESULTS AND DISCUSSION

The reference area ^{137}Cs inventory mean value of $671.69\ Bq\ m^{-2}$, was determined. This allowed obtaining the geo-referenced the soil net erosion and deposition rates, using

Para la determinación de la actividad de ^{137}Cs , se utilizó un espectrómetro gamma con detector coaxial de Germanio Hiperpuro de alta resolución, 30% de eficiencia relativa, marca Canberra y el programa Genie 2000 V3.1. Las actividades de ^{137}Cs , se midieron en la Unidad de Tecnología Nuclear del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). Una vez obtenidas estas actividades expresadas en $Bq\ kg^{-1}$, se procedió al cálculo de h_0 y la actividad de ^{137}Cs en el área de referencia, utilizando la ecuación (1):

$$A'(x) = A_{ref}(1 - e^{-x/h_0}) \quad (1)$$

para suelos no perturbados Zhang et al. (1990) y Walling y Quine (1990),
 donde:

$A(x)$ = cantidad ^{137}Cs por encima de x , $Bq\ m^{-2}$;
 A_{ref} = ^{137}Cs inventario de referencia, $Bq\ m^{-2}$;
 x = profundidad másica del suelo, $kg\ m^{-2}$; y
 h_0 = profundidad másica de relajación, $kg\ m^{-2}$.

Se utilizó el programa Surfer 9.0, para mapear la topografía local y expresar las estimaciones de erosión y depósito, en iso-concentraciones asociadas a cada vértice de la malla de muestreo. Se utilizó una estación total $\pm(4\ mm + 4\ ppm)$ y el punto de la red geodésica ubicado en el vértice: Carlota, edo. Miranda, Datum: SIRGAS-REGVEN ($10^{\circ}29'19''$.3890 N y $66^{\circ}50'56''$.5679 W).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El inventario de ^{137}Cs en el área de referencia, arrojó un valor promedio de $671,69\ Bq\ m^{-2}$. Esto nos permitió obtener los mapas

Proportional and Mass Balance-1 Conversion Models of ^{137}Cs measurements to soil net erosion rates (Fig. 3 and 4, respectively). In both figures, the total eroded (negative values) and deposited (positive values) soil special distribution can be appreciated. In both models, the maximum erosion and deposition rates correspond to the areas of higher and lower inclination as well as of higher and lower effective soil depth, respectively. The Proportional and Mass Balance-1 Conversion Models showed maximum erosion rates of $40\text{--}45\text{ Mg ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$ and $55\text{--}65\text{ Mg ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$, respectively. On the contrary, the deposition area, showed accumulation rates of $5\text{--}45\text{ Mg ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$ and $5\text{--}65\text{ Mg ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$, for each model respectively. In the proximity to the ramp, where the cultivated area ends, a concave shape is observed, being this characteristic of annual soil gain in which the farmer admits he has higher yields with less fertilization and higher soil humidity (Fig. 1).

The order of magnitude of the maximum erosion rates estimated, agrees with the results reported in the literature using nuclear techniques (Schuller et al., 2003 and Brígido et al., 2006). For south Chilean conditions, for example, where erosion phenomena were studied using ^{137}Cs in an agroecosystem with 19% slope, cultivated and tilled intensely every year, erosion rates between 20 and $70\text{ Mg ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$ were estimated (Schuller et al., 2003). Under Cuban conditions, an agroecosystem of undulated plane, with mean inclination between 2 and 5% and maximums of 10%, farmed for more than 30 years, the net erosion rate estimated by Mass Balance-2 model was of $12.2\text{ Mg ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$, with 20 cm tillage (Brígido et al., 2006).

In a maize-bean agricultural cultivated area, in volcanic soils of Nicaragua, with annual mean precipitation rates of 1500 mm and slopes of more than 26%, moderate net erosion rate of $28.3\text{ Mg ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$ was determined using a metric strip rod (Avilés, 2016). Results in the same order of magnitude were determined in this work. Using Proportional and Mass Balance-1 Conversion Models, the net erosion rates estimated were 19.8 and $29.3\text{ Mg ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$, respectively, and a sedimentation velocity, for both models, was of 80%. Silva (2014), registered soil losses between 94 and 135 Mg ha^{-1} using sedimentation collectors, in a maize agro ecosystem with inclinations of 20 and 30%, respectively.

Comparing estimation methods for net erosion rates, by means of runoff plots opposed to ^{137}Cs with Proportional, Mass Balance-1 and Mass II Balance Conversion Models, Brígido et al. (2006), obtained very similar results between the runoff plots and the Mass Balance-2 Conversion Model. Nonetheless, Proportional and Mass Balance-1 Conversion Models results that could overestimate the net erosion rate.

The advantages and disadvantages of different conversion models have been thoroughly discussed by Walling et al., 2004, and they advise that the Proportional Conversion Model can overestimate soil loss due to loss of ^{137}Cs accumulated on the surface, prior to its assimilation to the profile. In the same way, with the Mass Balance-1 Model, ignoring the ^{137}Cs loss due to recent precipitation events (inducing surface runoff and subse-

geo-referenciados de las tasas de erosión neta y depósito de suelos, empleando los modelos de conversión de mediciones de ^{137}Cs a tasas de erosión neta de suelos: modelo Proporcional y modelo de Balance de Masas I (Fig. 3 y 4, respectivamente). En ambas figuras se presenta la distribución espacial del total de suelo erosionado (valores negativos) y depositado (valores positivos). En ambos modelos las máximas tasas de erosión y depósito, coincidieron con las áreas de mayor y menor pendiente, mayor y menor profundidad efectiva de los suelos, respectivamente. Los modelos de conversión, Proporcional y de Balance de Masas I, mostraron las máximas tasas de erosión en un orden de magnitud de $40\text{--}45\text{ Mg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$ y $55\text{--}65\text{ Mg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$, respectivamente. Por el contrario, el área de depósito, presentó tasas de acumulación de $5\text{--}45\text{ Mg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$ y de $5\text{--}65\text{ Mg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$, respectivamente, para ambos modelos. En el área próxima al talud o borde final del área de cultivo, se observa la forma cóncava, característica de la ganancia anual de suelo y sobre la cual, el productor admite, que obtiene mayores rendimientos, se conserva mayor la humedad del suelo y utiliza menos fertilizantes (Figura 1).

El orden de magnitud de las tasas máximas de erosión estimadas en este trabajo, coinciden con los resultados de la literatura utilizando técnicas nucleares (Schuller et al., 2003) y (Brígido et al., 2006). Para las condiciones del sur de Chile, por ejemplo, donde se estudiaron fenómenos de erosión utilizando ^{137}Cs , en un agroecosistema en pendiente (19%), cultivado y labrado intensamente todos los años, y se estimaron tasas de erosión entre $20\text{--}70\text{ Mg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$ (Schuller et al., 2003). Para las condiciones de Cuba en un agroecosistema llano-ondulado, con pendientes promedio de 2-5% y máximas de 10%, cultivado durante más de 30 años, se estimaron, empleando el modelo de Balance de Masas II y ^{137}Cs , una tasa de erosión neta de $12,2\text{ Mg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$, para una profundidad de arado de 20 cm (Brígido et al., 2006).

En Nicaragua, utilizando varilla con la cinta métrica, se determinaron tasas de erosión neta moderada de $28,3\text{ Mg ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$, en sistema de tala-quema y fomento agrícola maíz-frijol, en suelos de origen volcánico, precipitaciones promedio anual de 1.500 mm y pendientes superiores al 26% (Avilés, 2016). Resultados en estos órdenes de magnitud, fueron obtenidos en este trabajo, empleando los modelos de conversión, Proporcional y de Balance de Masas I, que permitieron estimar tasas de erosión neta de $19,8$ y $29,3\text{ Mg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$, respectivamente; y una velocidad de la sedimentación, que en ambos casos fue de 80%. Silva (2014), en agroecosistemas de maíz, registró pérdidas mayores de suelo de 94 y 135 Mg ha^{-1} en pendientes de 20 y 30%, respectivamente, utilizando colectores de sedimentos.

Brígido et al. (2006), al comparar los métodos para la estimación de las tasas de erosión neta, utilizando parcelas de escurrimiento y el uso de ^{137}Cs , empleando los modelos de conversión: Proporcional, Balance de Masas I y Balance de Masas II, encontraron resultados muy similares entre las estimaciones con parcelas de escurrimiento y el modelo Balance de Masas II, mientras que los modelos Proporcional y Balance de Masas I, arrojaron resultados que podrían sobreestimar las tasas de erosión neta.

Las ventajas y desventajas de los distintos modelos de conversión han sido ampliamente discutidas Walling et al. (2014) y advierten, que en el modelo Proporcional, se pueden sobreestimar las pérdidas de suelo, debido a la remoción previa del ^{137}Cs acumulado sobre la superficie, antes de su incorporación al perfil; y en el caso del modelo Balance de Masas I, al no considerar la remoción del ^{137}Cs recientemente precipitado durante los eventos de lluvias (que inducen escorrentía superficial y por consiguiente erosión),

quent erosion), before it is incorporated to the arable layer, as well as the simplification that all the ^{137}Cs deposit occurred in 1963, also induce overestimation in the erosion rates.

antes de su incorporación a la capa arable y la sobre simplificación de que todo el depósito de ^{137}Cs ocurrió en 1963, también induce una sobreestimación de las tasas de erosión.

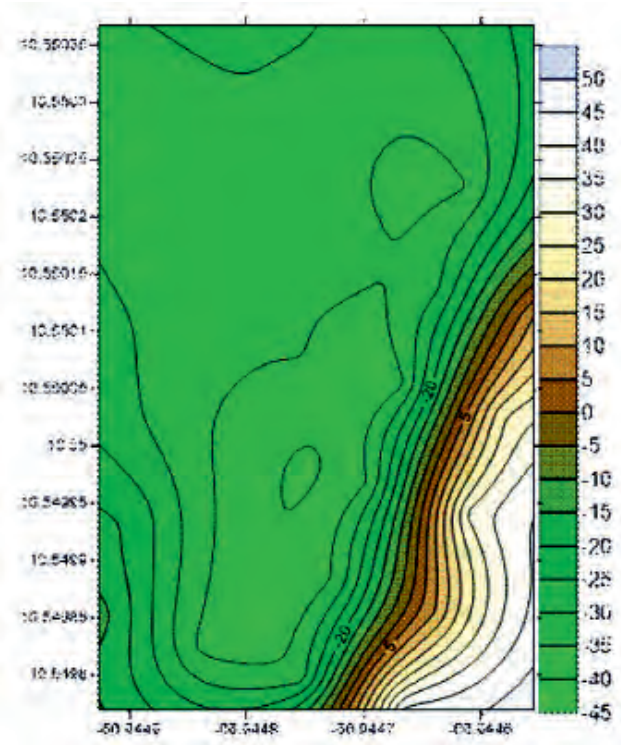


FIGURE 3. Soil net erosion and distribution rates ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) using the Proportional Conversion Model.
FIGURA 3. Tasas de erosión neta y redistribución de suelo, utilizando el Modelo de Conversión Proporcional ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

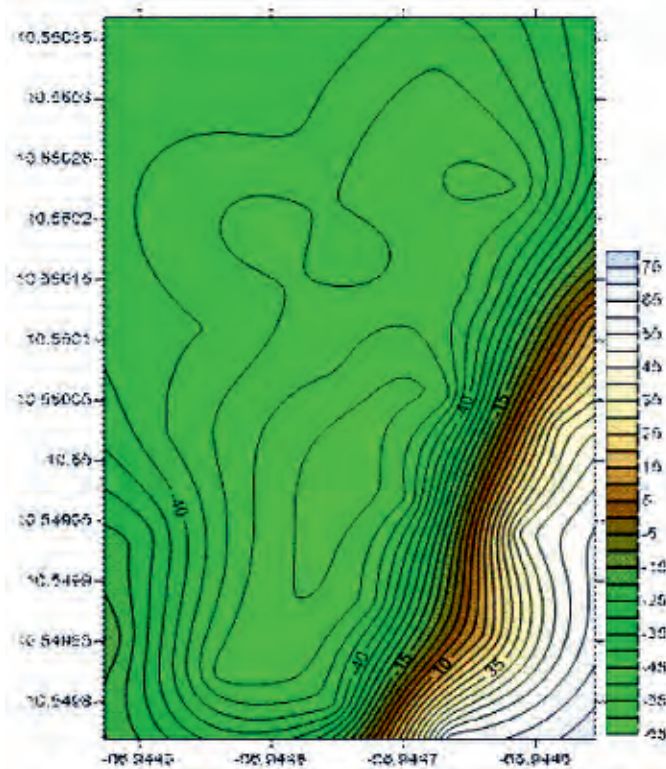


FIGURE 4. Soil net erosion and distribution rates ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) obtained using the Mass Balance-1 Conversion Model.
FIGURA 4. Tasas de erosión neta y redistribución de suelo, utilizando el Modelo de Conversión de Balance de Masas I ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

Hence, as explained above, by using Proportional and Mass Balance-1 Conversion Models, probably there could be an overestimation of the net erosion rates reported in this work. Nevertheless, the low mean annual precipitation in Hoyo de la Cumbre (774 mm), the predominance of sand fraction, the mean pH (6.5) both, in the reference area and in the study sites, and the management of surface runoff in the study sites, induced to a thought. It is that the causes of the erosion phenomena and the order of magnitude of the estimated net erosion rate are mainly associated to the agricultural management and not to the critical possible overestimation referred.

CONCLUSIONS

- For the first time, nuclear ^{137}Cs technique with Proportional and Mass Balance-1 models in the study of the net erosion rate is introduced in Venezuela. The results corroborate moderate net erosion rates associated with intensive horticulture, in slopes with more than 25% inclination and surface runoff management practices. Furthermore, total surface erosion and deposition in the study site were determined, in accordance with the order of magnitude of the net erosion rate and soil redistribution. This allows an integrated view of both phenomena, which are of substantial importance in the formulation, execution, and evaluation of public policies by government and private decision makers on environmental, agricultural, food sovereignty. Thus, it contributes to soil and water assets preservation through the combination of geographic information systems with the benefits of nuclear techniques in the study of soil erosion and redistribution. This technique allows identifying and evaluating the impact of conservation measures of soil and water, in vast extensions of watersheds, where hillside agriculture is widespread, which combined with frequent extreme climate events, generates significant erosion processes and loss of soil fertility with the consequent continuous cycles of intensive fertilizing and pesticide applications, which also contaminate waters.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the IAEA program of technical cooperation through Project ARCAL 5/051, as well as the Cuban Hygiene Protection and Radiation Centre and the Nuclear Physics Laboratory of the Simon Bolivar University, Venezuela, for its contribution in the capacitating of human talent in our country. In the same way we wish to acknowledge the following institutions: INPARQUE, Nuclear technology unit at the Venezuelan Institute of Scientific Research IVIC and FONACIT for financing project N° 2011001061

Por estas razones, al utilizar los modelos de conversión, Proporcional y Balance de Masas I, es probable una sobreestimación de las tasas de erosión neta estimadas en este trabajo. Sin embargo, la baja precipitación promedio anual en Hoyo de La Cumbre (774 mm), el predominio de la fracción de arena en estos suelos, un valor promedio del pH (6,5) tanto en el área de referencia como en los sitios de estudio y las prácticas de manejo de la escorrentía superficial realizadas en el sitio de estudio, nos induce a pensar que las causas de estos fenómenos de erosión y el orden de magnitud de las tasas de erosión neta, están principalmente asociados al manejo de la agricultura en pendiente y no a los factores críticos de posible sobreestimación referidos en la literatura, cuando se emplean estos modelos de conversión.

CONCLUSIONES

- Se introduce por primera vez en Venezuela la técnica de uso de ^{137}Cs , para determinar las tasas de erosión neta y redistribución de suelo, empleando los modelos de conversión Proporcional y Balance de Masas I. Los resultados confirman tasas de erosión neta moderadas asociadas a la agricultura intensiva de hortalizas, en laderas con pendiente de 25% y prácticas de manejo de las aguas de escorrentía superficial. Adicionalmente, se determinaron las superficies totales de erosión y depósito en el sitio de estudio, de acuerdo al orden de magnitud de cada una de las tasas de erosión neta y re-distribución de suelo, lo que permite una visión integrada de ambos fenómenos de particular importancia para la formulación, ejecución y evaluación de las políticas públicas, por parte de decisores privados y gubernamentales en materia ambiental, agrícola y soberanía alimentaria, que contribuyan a la preservación de los bienes comunes de suelos y aguas, al combinar los sistemas de información geográfica con las bondades de las técnicas nucleares en estudios de erosión y redistribución de suelo. Esta técnica permite identificar y evaluar el impacto de las medidas de conservación de suelos y aguas en las grandes extensiones de las cuencas hidrográficas, donde se ha generalizado la agricultura en laderas, que unida a los frecuentes eventos extremos debido al cambio climático, propicia significativos procesos de erosión y pérdida de la fertilidad de los suelos, lo que a su vez, induce al ciclo continuado de uso intensivo de altas dosis de fertilizantes que ocasionan también la contaminación de las aguas, por arrastre de sedimentos y de compuestos provenientes de agrotóxicos y fertilizantes solubles.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al programa de cooperación técnica de la OIEA a través del proyecto ARCAL 5/051, de igual manera al Centro de Higiene y Protección de las Radiaciones de Cuba y al Laboratorio de Física Nuclear de la Universidad Simón Bolívar por su contribución en la capacitación del talento humano de nuestro país. Así mismo, nuestro reconocimiento a las instituciones: INPARQUE, a la Unidad de Tecnología Nuclear del IVIC y al FONACIT, a través del financiamiento del proyecto N° 2011001061.

REFERENCES/REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AVILÉS, S.A.: Efectos de los sistemas de cultivo-arboles-pastos sobre la erosión laminar y la calidad de suelo en la micro cuenca Tecomapa, municipio de Somotillo-Nicaragua, [en línea], Universidad Nacional Agraria, Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente., MSc. Thesis, Nicaragua, 97 p., 2016, Disponible en: <http://repositorio.una.edu.ni/3376/1/tnf08a958.pdf>, [Consulta: 20 de junio de 2018].
- BRÍGIDO, O.; MENDOZA, L.; MONTALVÁN, A.; D RODRÍGUEZ: “Cuantificación de procesos erosivos en suelos agrícolas empleando las precipitaciones radiactivas globales del Cesio-137. VI Congreso Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo. Memorias CD Rom. Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo”, [en línea], En: VI Congreso de la Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo, La Habana, Cuba, 8 de marzo de 2006, DOI: 10.13140/RG.2.1.1754.5122, ISBN: 959-7023-35-0, Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/260388346>, [Consulta: 17 de noviembre de 2018].
- BUNZL, K.; SCHIMMACK, W.; KREUTZER, K.; SCHIERL, R.: “The migration of fallout 134Cs, 137Cs and 106Ru from Chernobyl and of 137Cs from weapons testing in a forest soil”, *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 152: 39-44, 1989, ISSN: 0044-3263, DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.19891520108>.
- MABIT, L.; BERNARD, C.; WICHEREK, C.; LAVERDIÈRE, M.R.: *Applied Geomorphology, Theory and Practice*, [en línea], Ed. John Wiley & Sons, UK, 197-203 p., 2002, Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/257948164>, [Consulta: 15 de enero de 2015].
- MABIT, L.; ZAPATA, F.; DERCON, G.; BENMANSOUR, M.; BERNARD, C.; WALLING, D.E.: *Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies*, [en línea], Ed. IAEA-TECDOC-1741, 2014, ISBN: 978-92-0-105414-2, Disponible en: <https://www.iaea.org/publications/10501>, [Consulta: 17 de noviembre de 2018].
- RITCHIE, J.C.; MCHENRY, J.R.: “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, 1990, ISSN: 0047-2425, DOI: 10.2134/jeq1990.00472425001900020006x.
- SCHULLER, P.; ELLIES, A.; CASTILLO, A.; SALAZAR, I.: “Use of 137Cs to estimate tillage-and water-induced soil redistribution rates on agricultural land under different use and management in central-south Chile”, *Soil and Tillage Research*, 69: 69-83, 2003, ISSN: 0167-1987.
- SILVA, O.: “El bosque y su suelo: relación única, funciones imprescindibles. I Simposio sobre impacto ambiental en el clima, suelo, fauna y flora por pérdida de nuestros bosques. Degradación de los suelos a causa de la pérdida de los bosques”, En: Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Montalbán, Venezuela, 2014, DOI: 10.13140/2.1.2974.3688.
- WALLING, D.E.; QUINE, T.A.: “Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data”, *Land Degradation & Development*, 2(3): 161-175, 1990, ISSN: 1085-3278.
- WALLING, D.E.; ZHANG, X.B.; HE, Q.: *Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies*, Ed. IAEA-TECDOC-1741, 213 p., 2014, ISBN: 978-92-0-105414-2.
- ZAPATA, F.: *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides*, Ed. Kluwer Academic Publishers, UK, 219 p., 2002, ISBN: 978-0-306-48054-6.
- ZHANG, X.B.; HIGGITT, D.L.; WALLING, D.E.: “A preliminary assessment of the potential for using cesium 137 to estimate rates of erosion in the Loess Plateau of China”, *Hydrology Science Journal*, 35: 267-276, 1990.

Alonso David Ojeda-Falcón, Profesor-Investigador, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Instituto de Zoología y Ecología Tropical, Centro de Ecología Aplicada, Laboratorio de Agroecología, Caracas, Venezuela, e-mail: alonso.ojeda@gmail.com

Olglioly Domínguez-Quintero, Profesor-Investigador, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela Básica, Laboratorio de Investigación, Caracas, Venezuela e-mail: olydominguez@gmail.com.

The authors of this work declare no conflict of interests.

This item is under license Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher.