

ORIGEN DE SUELOS DEPOSITADOS EN LA SUBCUENCA DEL RÍO TAPACALÍ, MADRIZ, NICARAGUA MEDIANTE EL USO DE LA TÉCNICA DE ISÓTOPOS ESTABLES DE COMPUESTOS ESPECÍFICOS

STUDY OF THE ORIGIN OF SOILS DEPOSITED IN THE TAPACALÍ RIVER SUB - BASIN, MADRIZ, NICARAGUA USING THE TECHNIQUE OF STABLE ISOTOPE OF SPECIFIC COMPOUNDS

Caballero Arbizu, Yader Santiago¹; de los Santos Villalobosm, Sergio²

Resumen

la degradación del suelo por la erosión es un grave problema en el mundo debido a la pérdida de la capa fértil, poniendo en riesgo tanto la seguridad alimentaria como los recursos naturales. Éste es el problema en la subcuenca del Río Tapacalí, compartida entre Nicaragua y Honduras, en la que las principales actividades económicas son la agricultura de subsistencia (maíz, frijol, tomate y yuca), el cultivo intensivo del café y la ganadería. Por lo anterior y como primer paso para entender el problema del movimiento del suelo en esta subcuenca se utilizó la técnica de Isótopos Estables de Compuestos Específicos (CSSI) para identificar sus principales contribuyentes. Esta técnica se basa en el hecho de que cada especie de planta de una comunidad vegetal excreta por las raíces ácidos grasos con huellas isotópicas específicas. Así, utilizando el software CSSIAR versión 2.00 para estimar la redistribución de los suelos evaluada en 29 puntos representativos del uso del suelo en la subcuenca. Los resultados mostraron que los principales contribuyentes a la deposición de suelo fueron los puntos NI11 (29%), NI03 (23%), NI28 (7%) y NI09 (4%) ubicados en la parte baja de la sub-cuenca (NI11 y NI28); además, en la parte alta (NI03) y en la parte central (NI09). Por otra parte, el origen de los sedimentos acumulados en los suelos de la subcuenca proviene principalmente del cultivo de maíz (NI11, NI03 y NI09) y de los bosques de roble (NI28). En este estudio se puede observar una separación considerando sólo dos fuentes diferenciadas de la composición isotópica; una empobrecida ($\delta^{13}\text{C}$ aproximadamente -26.81‰), que corresponde a los valores medidos de las plantas de especie C_3 en 27 sitios muestreados y una enriquecida ($\delta^{13}\text{C}$ aproximadamente -16.87‰), cuyo valor coincide con las plantas de especie C_4 en dos sitios muestreados en la subcuenca. La diferencia mostrada por los suelos refleja diferentes fuentes de carbono posiblemente debido a los usos del suelo en la actualidad, el pasado lejano y la presencia de procesos in situ únicos dentro del ambiente del suelo. Los valores de los ácidos grasos y sus respectivos valores de $\delta^{13}\text{C}$ reflejan tanto la cubierta vegetal actual como la anterior, también hay una contribución de la micro-flora y fauna dentro de la matriz del suelo en la subcuenca.

Palabras claves: Erosión, Isótopos estables, ácidos orgánicos, CSSI

Abstract

Soil degradation by erosion is a serious problem in the world due to the loss of the fertile layer, putting both food security and natural resources at risk. This is the problem in the Tapacali River subbasin, shared between Nicaragua and Honduras, where the main economic activities are subsistence agriculture (maize, beans, tomato and cassava), intensive coffee cultivation and livestock farming. Therefore, as a first step in understanding the soil movement problem in this sub-basin, the Stable Isotope of Specific Compounds (CSSI) technique was used to identify its main contributors. This technique is based on the fact that each plant species of a plant community excretes by the roots fatty acids with specific isotopic traces. Thus, using the software CSSIAR version 2.00 to estimate the redistribution of the soils evaluated in 29 points representative of the land use in the sub-basin. The results showed that the main contributors to soil deposition were NI11 (29%), NI03 (23%), NI28 (7%) and NI09 (4%) located in the lower part of the sub- And NI28). In addition, in the upper part (NI03) and in the central part (NI09). On the other hand, the origin of the sediments accumulated in the soils of the subbasin comes mainly from the cultivation of maize (NI11, NI03 and NI09) and oak (NI28). In this study a separation can be observed considering only two different sources of the isotopic composition; One impoverished ($\delta^{13}\text{C}$ approximately -26.81‰), which corresponds to the measured values of C_3 species plants at 27 sites sampled and one enriched ($\delta^{13}\text{C}$ approximately -16.87‰), whose value coincides with C_4 species plants at two sites sampled In the sub-basin. The difference shown by soils reflects different carbon sources possibly due to current land uses, the distant past and the presence of unique in situ processes within the soil environment. The values of the fatty acids and their respective values of $\delta^{13}\text{C}$ reflect both the current and previous plant cover, there is also a contribution of micro-flora and fauna within the soil matrix in the sub-basin.

Key words: Erosion, Stable isotopes, organic acids, CSSI

1 Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua. Nicaragua. yadercaballero@cira.unan.edu.ni

2 CONACYT - Instituto Tecnológico de Sonora. México. sergio.delossantos@itson.edu.mx

1. INTRODUCCIÓN

La erosión edáfica es reconocida hoy en día como la principal causa de la degradación del suelo causada por la expansión e intensificación de la agricultura y la deforestación de los bosques, esto a su vez contribuye al detrimento de los ecosistemas naturales incluyendo la calidad del suelo y agua en América Latina y el Caribe. Por otro lado, la creciente demanda mundial de alimentos ha provocado el aumento sustancial de la producción de granos (semilla de soya, trigo, maíz) y otros productos alimenticios que se han basado en la intensificación masiva y no planificada de las actividades agrícolas, la deforestación de vastos territorios y el uso a gran escala de fertilizantes y pesticidas (IAEA, 2014).

Entre las consecuencias evidentes de estas prácticas agrícolas poco sostenibles están el aumento de las tasas de erosión y sedimentación a nivel de cuencas lo que conduce al deterioro físico, químico y biológico del suelo, afectando a su vez a los recursos hídricos circundantes. En Nicaragua la erosión de los suelos ha aumentado en los últimos veinte años y ha afectado a un 20% de las tierras agrícolas, a un 15% de los pastizales y a un 30% de los bosques (FAO, 2008).

La agricultura y la ganadería son las principales actividades productivas que generan ingresos económicos a las familias en la subcuenca del Río Tapacalí, las cuales han generado la degradación de los recursos naturales como consecuencia del cambio de uso de la tierra, la deforestación y la poca adopción de buenas prácticas agrícolas y ambientales (Alianza por la resiliencia, 2014). De hecho, toda la subcuenca ha sido categorizada como vulnerable al deslizamiento de tierra según los resultados del Estudio de Modelación de Riesgos a Deslizamientos de Tierra realizado por la Alianza por la resiliencia en el año 2013.

Debido a la problemática anterior se han realizado proyectos en la subcuenca basados principalmente en contribuir al mejoramiento de las condiciones socioambientales de los pobladores que habitan en las comunidades localizadas en el territorio mediante la reducción de la vulnerabilidad ante las amenazas naturales y la degradación de los recursos naturales así como en el aumento de la resiliencia comunitaria con la participación de todos los actores sociales (Alianza por la resiliencia, 2013). Sin embargo, se necesitan investigaciones que estén enfocadas en conocer el comportamiento de los sitios más vulnerables a la erosión y el movimiento del suelo.

Se han desarrollado diversas técnicas a través de los años para estimar las tasas de erosión y entre ellas se destacan la medición directa, la huella geológica y la de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (de los Santos Villalobos et al., 2016). Estas mediciones utilizan métodos generalmente complejos y costosos que producen datos a veces no representativos de

las cuencas y que por lo tanto no podrían aplicarse a eventos de erosión a largo plazo.

En la actualidad se están utilizando herramientas que emplean isótopos estables y/o radioactivos como trazadores ambientales y que proporcionan información sobre el movimiento de los suelos, su dirección y velocidad, entre otros (de los Santos Villalobos et al., 2016). Con la finalidad de entender el impacto global del movimiento del suelo en un ecosistema es determinante cuantificar la cantidad de éste que se pierde o gana en un sitio específico y conocer tanto su deposición final como su contribución al suelo total acumulado en el sitio, esto es posible mediante la aplicación de la técnica innovadora de Isótopos Estables de Compuesto Específicos (CSSI, por sus siglas en inglés) (Hancock y Revill, 2008; Gibbs, 2008). Por ejemplo un estudio realizado por Carvajal (2008), en 24 sitios muestreados presentó cambios de vegetación de tipo fotosintético C_3 (cafetal, relicto de selva) por C_4 (pastizal, cultivo de cana panelera) y viceversa, posiblemente por el cambio en el uso del suelo y de prácticas agrícola en el en los suelos en Alcalá, Valledel Cauca.

El objetivo de este estudio fue identificar las fuentes de los sedimentos derivados de los diferentes usos del suelo (agrícola, forestal y ganadería) y las zonas de deposición de los sedimentos así como para determinar las causas históricas de la degradación de los suelos por erosión en la subcuenca del Río Tapacalí ubicada en la parte alta del Río Coco, Nicaragua/Honduras, midiendo las proporciones de origen natural de los isótopos estables de Carbono (^{13}C) en 29 muestras de suelos.

2. METODOLOGÍA

2.1. Descripción del área de estudio

La subcuenca del Río Tapacalí se ubica en la parte alta del Río Coco (Cuenca No. 45) en la Región Central-Norte de Nicaragua, al sur de la República de Honduras y se ubica entre las coordenadas geográficas de la proyección WGS84: $13^{\circ} 17' 00''$ y $13^{\circ} 27' 10''$ de Latitud Norte y $86^{\circ} 36' 00''$ y $86^{\circ} 45' 15''$ de Longitud Oeste (Figura 1). La subcuenca distribuida en siete municipios tiene una superficie de 156.93 km^2 (15,693 hectáreas) y un perímetro de 70.79 km, lo cual representa el 0.78% del área total de la Cuenca del Río Coco ($19,969 \text{ km}^2$). Cuatro municipios (Somoto, San Lucas, Las Sabanas y San José de Cusmapa) pertenecen al departamento de Madriz y ocupan el 76.32% (119.65 km^2) del territorio, dos municipios (Pueblo Nuevo y San Juan de Limay) pertenecen al departamento de Estelí y ocupan el 0.86% (1.34 km^2) del área y el municipio de San Marcos de Colón de la República de Honduras ocupa el 22.83% (35.83 km^2) del área total de la subcuenca. Esta se extiende en dirección Sureste - Noroeste desde su parte alta en el municipio de San José de

Cusmapa en dirección Este de la cabecera municipal a una elevación de 1625 msnm; desembocando en su confluencia con el Río Comalí en el sitio

conocido como Los Encuentros, dicha confluencia da origen al cauce principal de Río Coco en territorio nicaragüense.

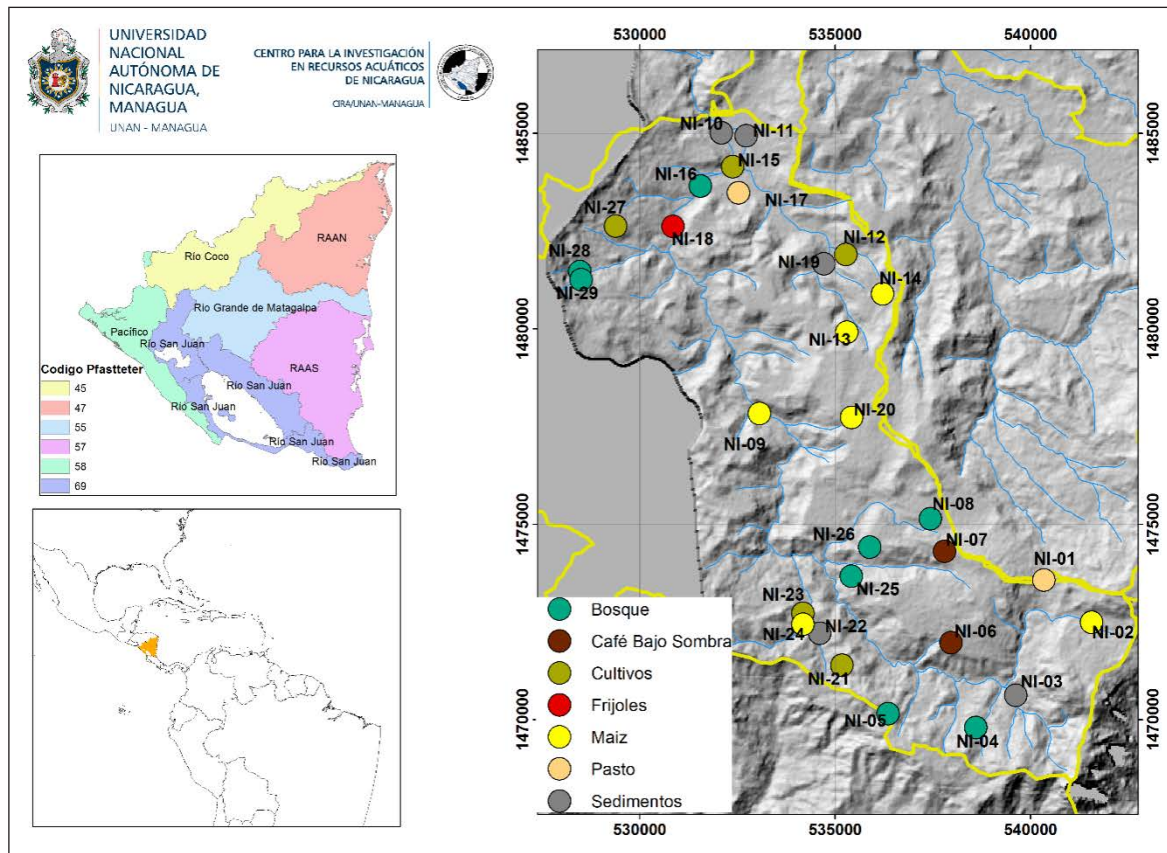


Figura 1. Ubicación del área de estudio y sitios de muestreo seleccionados como representativos de los usos del suelo en la subcuenca del Río Tapacalí, Madriz, Nicaragua

El promedio aritmético de precipitación anual de la subcuenca es de 1286 mm según el período de registros de datos meteorológicos desde 1971 hasta 2010 (Alianza por la resiliencia, 2014) en donde la parte alta representada por la Estación Meteorológica de San José de Cusmapa es la zona más lluviosa y registra un promedio anual de 1724 mm, en la parte media representada por la Estación Meteorológica Miquilce el acumulado es de 1104 mm y en la parte baja representada por la Estación Meteorológica El Espino el acumulado alcanza los 1028 mm. La subcuenca se encuentra ubicada en la Provincia Geológica denominada Tierras Altas del Interior, predominando las rocas ígneas del grupo Coyol, cuya edad aproximada es de 13 millones de años, producto del vulcanismo continental del Terciario (Alianza por la resiliencia, 2014). Respecto al relieve, la pendiente media en la subcuenca es de 0.033 m/m (3.3%), siendo la microcuenca Gualiqueme la que presenta el mayor valor medio de pendiente (40.8%) y las microcuencas Tapacalí parte baja y El Varillal presentan valores menores. En la subcuenca del Río Tapacalí predominan los suelos con poco desarrollo del orden Entisol con un área de 69.83 km² correspondiente al 44.5 % del territorio de la subcuenca, seguido de

suelos más desarrollados del orden Alfisol con un área de 21.66 km² correspondiente al 13.8 % y en una buena proporción se encuentran los suelos del orden Vertisol con un área de 65.44 km² correspondiente al 41.7 %.

2.2. Selección y muestreo de sitios de interés

Se seleccionaron 29 sitios de muestreo representativos de los distintos usos del suelo y prácticas agrícolas. Los parámetros utilizados para su selección fueron que hubiera evidencia de erosión y deposición de sedimentos y pendiente, que favoreciera la escorrentía superficial y a su vez el aumento de la pérdida de la capa superficial del suelo en la subcuenca por ejemplo sitios donde el sedimento había sido transportado después de una lluvia reciente o en suelos poco compactados.

Las muestras de suelo en la subcuenca y de sedimento del lecho del Río se colectaron por triplicado para producir muestras compuestas. Durante la recolección se utilizaron guantes y se dispuso las muestras en bolsas de plástico de 25 lb. El muestreo se realizó entre el 8 de septiembre y 3 de octubre de 2014. Las 29 muestras de suelo se

recolectaron en los primeros 10 cm de profundidad representando los distintos usos del suelo en la subcuenca tales como el cultivo de maíz, frijol, café bajo sombra, pasto para el ganado, tomate, bosque de roble y bosque de pinos. Las cinco muestras de sedimento se colectaron en las laderas del cauce principal del Río Tapacalí (Figura 1).

2.3. Preparación y análisis de muestras

Alícuotas de 100 g de suelo seco de las 29 muestras se tamizaron a través de una malla de 63 mm y se almacenaron en bolsas de plástico (Ziploc) en el laboratorio de Radioquímica Ambiental del CIRA/UNAN-Managua para ser enviadas al Laboratorio de Radioecología (LARA), Instituto de Física de la Universidad Federal Fluminense (UFF), Río de Janeiro, Brasil. El análisis de Isótopos Estables de Compuestos Específicos (CSSI, por sus siglas en inglés Compound Specific Stable Isotopes) se realizó como parte del proyecto regional de cooperación técnico-científica RLA/5064 ARCAL CXL (Fortalecimiento de las estrategias de conservación del suelo y el agua a nivel de cuenca mediante el uso de técnicas innovadoras de isótopos estables).

La técnica de CSSI se fundamenta en el estudio de la producción y excreción al suelo de un conjunto de marcadores orgánicos, ácidos grasos (C_{14} a C_{24}), únicos para cada especie de plantas en una comunidad vegetal, cuya huella isotópica en términos de abundancia natural de $\delta^{13}C$ (relación de isótopo pesado ^{13}C al liviano ^{12}C de la muestra en relación a un patrón internacional, en partes por mil ‰) es constante e independiente de las condiciones edafo-climáticas en las cuales las plantas se desarrollaron (de los Santos Villalobos et al., 2017).

Las muestras de suelo se extrajeron cuantitativamente mediante sonicación (2 x 30 ml) con una mezcla de CH_2Cl_2 -MeOH (Bligh y Dyer, 1959). Los extractos se transfirieron a un embudo de separación, y después de la separación de fases, los lípidos se recuperaron en la capa inferior de CH_2Cl_2 (los disolventes se eliminaron al vacío) y se prepararon hasta un volumen conocido con diclorometano y se almacenaron sellados bajo nitrógeno a $-20^{\circ}C$. Los ácidos grasos (AG) se recuperaron de la fracción acuosa de la mezcla saponificada después de la adición de 1 ml de HCl y se convirtieron a sus ésteres metílicos antes de analizar mediante tratamiento con metanol acidificado (Christie, 1982).

La cromatografía de gases (GC) para separar y cuantificar las fracciones de ácidos grasos se realizó usando un cromatógrafo de gases Varian 3800, equipado con una columna HP5, un detector de ionización de llama (FID) e hidrógeno como gas portador. Las fracciones se analizaron usando el éster metílico de ácido graso C_{23} como patrón.

El análisis de Isótopos Estables de Compuestos Específicos (CSSI) se realizó usando un cromatógrafo de gases Thermo GC acoplado a un espectrómetro de masas de relación de isótopos Delta S de Finnigan Mat operado en modo de flujo continuo. La columna no polar (HP5) y las condiciones operativas fueron similares a las descritas anteriormente para los análisis GC-FID, pero se utilizó helio como gas portador. Los valores de isótopos estables se corrigieron para el carbono añadido durante la metilación (<1‰). La precisión analítica se estima en un valor superior al 0,5‰. Los resultados obtenidos fueron analizados utilizando el software CSSIAR v2.00 (de los Santos Villalobos et al., 2017).

Este software es una herramienta basada en el enfoque Bayesiano del paquete SIAR que utiliza modelos de mezcla para determinar la distribución de isótopos estables del suelo, usando datos de $\delta^{13}C$ y de ácidos grasos y es ejecutado sobre el programa gratuito R (www.r-project.org/) (de los Santos Villalobos et al., 2017). Para obtener una mejor discriminación de todas las fuentes del suelo en la subcuenca se obtuvo la proporción del suelo y su desviación estándar. Los resultados obtenidos por el modelo a partir del $\delta^{13}C$ y cinco veces la media de los ácidos grasos seleccionados (C_{18_1} , C_{20_0} , C_{22_0} , C_{24_0}), presentan las contribuciones reales de las fuentes a la mezcla NI10.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Variación del carbono del suelo

Los resultados del análisis de $\delta^{13}C$ ‰ y el contenido de Carbono total en las fuentes de los suelos en los 29 sitios muestreados en la subcuenca del Río Tapacalí se presentan en la Tabla 1, donde se agruparon en base a los usos actuales del suelo, como son los cultivos anuales (maíz, frijol, café de sombra, tomate y yuca), pastos para ganado, bosques (de pino y roble) y sedimento de río.

La mayor contribución de Carbono de las fuentes de suelos se detectó en el sitio NI24 utilizado para el cultivo de maíz ($1643 \mu g g^{-1}$); mientras que la más baja en el sitio NI28 utilizado para bosque de roble ($90 \mu g g^{-1}$). Sin embargo, analizando los valores promedio y su desviación estándar tomando en cuenta el uso actual del suelo encontramos que las muestras de suelo provenientes de pasto para ganado presentan una contribución de $573 \pm 65 \mu g g^{-1}$, los provenientes de los diferentes cultivos de $447 \pm 359 \mu g g^{-1}$ y los provenientes de bosques de $406 \pm 182 \mu g g^{-1}$. Cabe destacar que el uso actual del suelo con menor variabilidad en los resultados fue el de pasto para ganado y con mayor variabilidad el de los cultivos de maíz y mezcla con otros tipos de cultivos (frijol, tomate y café). Esto pudiera deberse a que los suelos con uso actual para pasto han sido usados con ese fin durante mucho tiempo, mientras que los suelos con uso actual para cultivos (maíz, frijoles, café, yuca, tomate) pueden haber sido usados en el pasado

para diversos fines. Según un estudio realizado por Carvajal (2008) en el Valle de Alcalá, la abundancia natural de ^{13}C permitió demostrar que los depósitos de carbono en el suelo no solo dependen del uso y

la cobertura vegetal actual, sino también tienen alta influencia los usos establecidos con anterioridad y que han fijado este elemento en el suelo.

Tabla 1. Resultados de análisis de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) y contenido de carbono total ($\mu\text{g g}^{-1}$) en muestras de suelo con diferentes usos actuales y sedimentos en la subcuenca del Río Tapacalí, Madriz, Nicaragua

Código de la muestra	Lugar de muestreo	Usos actuales del suelo	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Carbono ($\mu\text{g g}^{-1}$)
NI02	Quebrada honda	Maíz	-25.92	436
NI09	Miguilse		-25.65	125
NI13	El Porvenir		-20.23	432
NI14	Mal Paso		-20.61	296
NI20	Llano Florentín		-16.87	370
NI24	Quebrada Los Cuevones		-25.41	1642
NI12	Misalqualto	Maíz, tomate	-21.21	236
NI15	Vuelta La Barranca	Maíz, frijoles	-23.87	326
NI27	Los Araditos	Maíz, frijoles	-23.07	413
NI21	El Mojón	Maíz, café	-22.39	273
NI23	Loma La Banqueta	Maíz, café, yuca	-25.84	503
NI18	Montaña El Salamar	Frijoles	-22.48	469
NI06	San Ramón	Café bajo sombra	-26.03	408
NI07	Santo Domingo		-23.63	323
NI01	El Cipián	Pasto de ganado	-24.97	527
NI17	Loma La Flor		-24.72	619
NI16	Tapacalí	Bosque	-24.47	198
NI04	Las Pocillas	Bosque de pino	-23.47	617
NI05	Los Llanitos		-25.11	465
NI08	Llano Alaupe	Bosque de roble	-23.81	593
NI25	Tapacalí		-23.69	395
NI26	Loma La Meseta		-17.51	403
NI28	Quebrada El Gualiqueme		-25.09	90
NI29	El Gualiqueme		Bosque peremnefolio	-25.34
NI03	Ribera de la Quebrada El Rodeo	Sedimento de río, cultivo de maíz cercano	-26.80	149
NI10	Ribera del Río Tapacalí		-26.77	253
NI11	Ribera del Río Tapacalí 2		-26.81	293
NI19	Ribera de la Quebrada Mal Paso		-21.50	436
NI22	Ribera de la Quebrada El Tule		-23.22	370

También se encontró que el Carbono no es igual en sitios que tienen el mismo uso o cobertura vegetal, y que para comprender la acumulación de este elemento no solo bastan las mediciones in situ, sino que es necesaria la reconstrucción del pasado de cada lugar para tener nociones sobre las posibles causas de los resultados encontrados.

3.2. Abundancia natural del $\delta^{13}\text{C}$ por usos y coberturas vegetales del terreno

De acuerdo a los resultados del análisis de $\delta^{13}\text{C}$ ‰ las contribuciones más empobrecidas de $\delta^{13}\text{C}$ se obtuvieron en los sitios NI03, NI10 y NI11 (Sedimentos de la Quebrada El Rodeo y del Río Tapacalí-26.77 a

-26.81) y las más enriquecidas en los sitios NI20 y NI26 (cultivo de maíz y bosque de roble, -16.87 y -17.51, respectivamente) (Tabla 1, Figura 2). Catorce muestras de suelos y sedimentos colectados evidencian la influencia de Plantas C₃ ($\delta^{13}C$ entre -24 a -30 ‰: NI02, NI09, NI24, NI23, NI06, NI01, NI17, NI16, NI05, NI28, NI29, NI03, NI10, NI11), dos (NI20 y NI26) la de Plantas C₄ ($\delta^{13}C$ entre -10 a -16 ‰) y el resto de las muestras (NI13, NI14, NI12, NI15, NI27, NI21, NI18, NI07, NI04, NI08, NI25, NI19, NI22) la de Plantas CAM por presentar valores intermedios de $\delta^{13}C$ entre -16 a -24 ‰ (Videla, 2008). La mayor parte de las plantas identificadas en la subcuenca son del tipo C₃ (tomate, frijoles, café y árboles), el maíz es una Planta C₄ y otras especies como la piña, la pitahaya y otros cactus son representantes de Plantas CAM.

Los cambios de vegetación de tipo fotosintético (C₃, CAM y C₄) encontrada en los sitios muestreados en este estudio, posiblemente se debe a procesos

de sustitución de los diferentes cultivos que se desarrollan en la subcuenca (maíz, frijoles, café, tomate y árboles). En algunos de los sitios muestreados se observó señales de ¹³C que correspondían a vegetación anterior y no a la actual; indicando que en su gran mayoría el carbono almacenado en el suelo se debía a los procesos de fijación de los cultivos establecidos en épocas anteriores y no a las gramíneas predominantes en los últimos años. Lo anterior permite reconocer la importancia de la estimación de la abundancia natural de ¹³C y el conocimiento de la historia del uso del terreno de cada sitio de muestreo. La situación anterior coincide con un estudio realizado por Carvajal (2008), porque 24 de los 96 sitios muestreados en las tres zonas del Valle de Alcalá presentaron cambios de vegetación de tipo fotosintético C₃ por C₄, debido a procesos de sustitución de cafetales por pastizales o caña panelera es decir debido a los diferentes cultivos desarrollados en épocas anteriores.

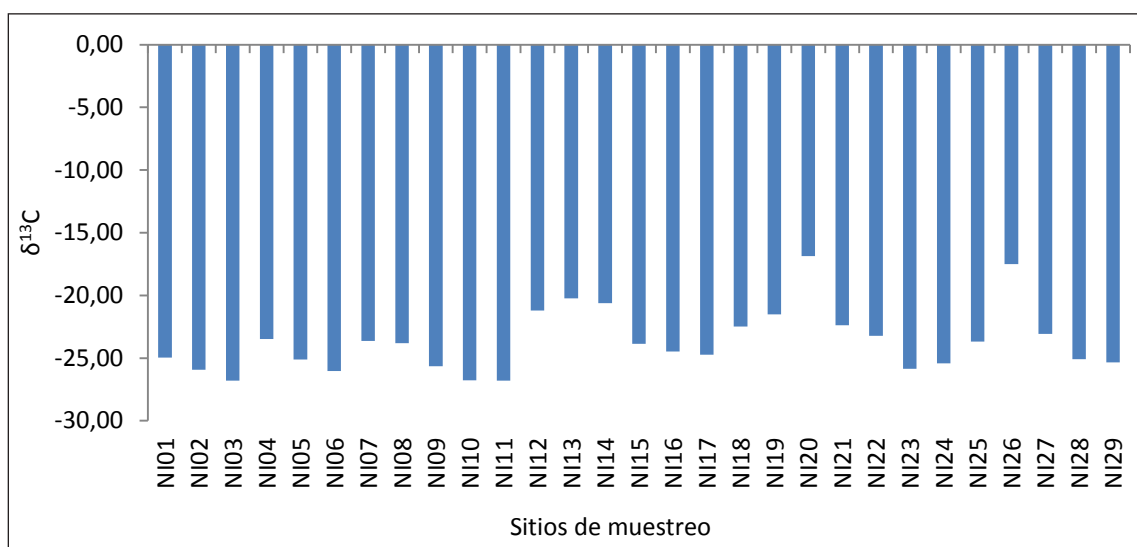


Figura 2. Composición isotópica de $\delta^{13}C$ en las muestras de suelo y sedimento en la subcuenca del Río Tapacalí

3.3. Discriminación de las fuentes de la erosión

De acuerdo a los resultados obtenidos del modelo CSSIAR v2.00 utilizando los valores de $\delta^{13}C$ se evaluó cinco veces la media de los ácidos grasos seleccionados (C18_1, C20_0, C22_0, C24_0) para obtener una mejor discriminación de todas las fuentes del suelo en la subcuenca y se obtuvo la proporción del suelo y su desviación estándar, presentándose las contribuciones reales de las fuentes a la mezcla NI10. (Gibbs, 2008). En la Figura 3 se muestra el comportamiento de la proporción del suelo y la desviación estándar en el sitio de Mezcla NI10 y los sitios seleccionados en los suelos de la subcuenca del del Río Tapacalí.

El sitio de mezcla de sedimentos del sitio NI10 ubicado en la parte baja de la subcuenca presentó una proporción de ácidos grasos de 20.25 %. Este

resultado muestra que las contribuciones de carbono proveniente de todos los sitios seleccionados para este estudio desde las zonas altas a la parte baja de la subcuenca. Esta situación también fue observada por Carvajal (2008), que atribuyó el almacenamiento de Carbono en la parte más baja posiblemente a las fuertes precipitaciones en el área de estudio durante los meses más lluviosos, lo que pudo haber transportado hacia las zonas planas del terreno la fracción de la materia orgánica que se presenta en estado soluble o posiblemente en suspensión.

Por otro lado, las proporciones de ácidos grasos en todos los sitios muestreados variaron entre 0.23 % a 28.95 %, presentando el valor más alto el sitio NI11. Otros sitios que mostraron una proporción considerable de ácidos grasos fueron el NI03 ubicado en la parte alta de la subcuenca y los sitios NI09 y NI15 utilizados para el cultivo de maíz y los sitios forestales

NI16 y NI28. Las áreas de cultivo utilizadas en los sitios NI08 y NI18 son destinadas a la producción de frijol y bosques, en la subcuenca y no fueron considerados como un contribuyente importante. Aunque la resolución de fuentes menores es deficiente con la fiabilidad de las predicciones de fuente menor que se refleja por sus incertidumbres, los resultados

muestran una alta probabilidad de mayor aportación del carbono de los suelos erosionados de los sitios NI03 (18.17 %) y NI28 (4.41 %), ambos ubicados en las partes altas de sus respectivas microcuencas y del sitio NI11 (28.95 %) ubicado en la parte baja de la subcuenca y el sitio NI09 (3.36 %) ubicado en la parte central de la subcuenca.

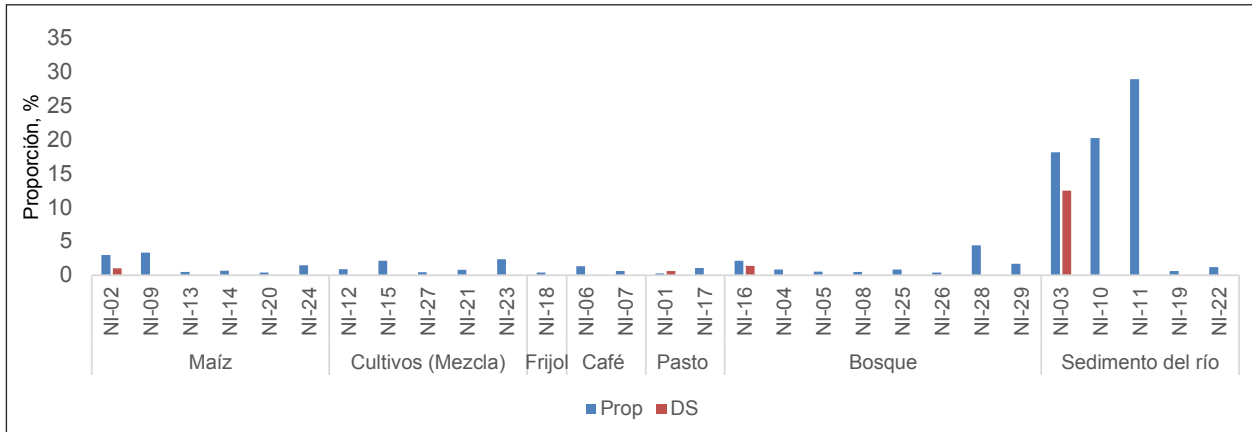


Figura 3. Resultados de la proporción de ácidos grasos en el sitio de Mezcla NI10 y los sitios seleccionados en los suelos de la subcuenca del Río Tapacalí

Las proporciones más altas de ácidos grasos obtenidas en este estudio muestran que la principal fuente de carbono corresponden a los suelos utilizados para el cultivo de maíz debido a que son los usos dominantes en la subcuenca. La tendencia de las proporciones de ácidos grasos sigue de cerca la tendencia mayoritaria de la composición isotópica para todas las fuentes del suelo (Tabla 1).

El modelo de mezcla CSSIAR v2.00 utilizado para este trabajo utilizó los siguientes ácidos grasos para la mejor discriminación general para todas las fuentes del suelo en la subcuenca: (C18_1, C20_0, C22_0, C24_0), siendo la más viable la presentada por los ácidos grasos de C22_0 y C18_1. El modelo de mezcla predijo que el mayor aporte de sedimento al sitio NI10 proviene de la erosión del subsuelo de los suelos ubicados en los sitios NI03 y NI11, los cuales aportan el 47.12 % del total de todos los sitios muestreados. Los resultados de la discriminación de los ácidos grasos de C22_0 y C18_1 utilizando el modelo de mezcla CSSIAR v2.00 para este estudio se muestran en la Figura 4.

De acuerdo a los resultados de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) y las proporciones de carbono en la subcuenca del Río Tapacalí, el tipo de práctica agrícola que se emplea en los sitios donde se realiza el cultivo de maíz provoca mayor erosión, la cual predomina en toda la subcuenca seguida de la ganadería (pasto) y la forestal. La mezcla de sedimento objetivo es una muestra de sedimento recolectada en el sitio NI10 ubicado en la parte baja de la subcuenca y representa el sedimento del río obtenido desde la parte alta y central de la subcuenca. De acuerdo a los resultados del contenido de carbono, las fuentes de los

sedimentos en la subcuenca proviene principalmente de los suelos de NI24 ($1642.98\mu\text{g g}^{-1}$) utilizado para cultivos de maíz, NI04 y NI17 utilizados para bosque y pasto respectivamente. Los sitios NI01, NI08, NI17 y NI23 utilizados para pasto y bosques evidenciaron mayor aporte de carbono a los suelos del área de estudio en relación a los demás sitios estudiados (Tabla 1).

Es interesante considerar el papel de la parte alta de la subcuenca del Río Tapacalí en la entrega de subsuelos al NI10 ubicado en la parte baja de la subcuenca. El rastreo geoquímico de las muestras de suelos de la subcuenca del Río Tapacalí indicó que una proporción significativa (hasta el 25%) de sedimento suministrado a la parte baja de la subcuenca se erosiona de los suelos asociados a la formación geológica, tipo de usos del suelo y deslizamientos predominantes en toda la subcuenca. Según el Plan de Manejo y Gestión Integral de la subcuenca del Río Tapacalí realizado en el 2014, uno de los principales problemas en la subcuenca del Río Tapacalí son los deslizamientos de laderas. Los trazadores de superficie indican que la erosión del subsuelo es significativa en las partes altas de la subcuenca del Río Tapacalí. Estos subsuelos erosionados provienen posiblemente de arroyos que drenan de la región alta de los sitios NI03, NI09, NI11 y NI28, todos los cuales aportan partículas del suelo hacia la parte baja de la subcuenca. El modelo predice que el 77% del sedimento de NI10 proviene de erosión del suelo de NI03, NI09, NI11, NI15, NI16 y NI28 (Figura 3).

Los resultados de la técnica CSSI confirman el papel dominante del cultivo de maíz en el aporte

de carbono a los suelos en la subcuenca. Algunos suelos cultivados en la subcuenca presentan otro tipo de vegetación fotosintética, dado que el cultivo se realiza principalmente en regiones de inundación de bajo relieve, regiones que tienen más probabilidades de ser zonas de deposición de sedimentos durante el flujo sobrebanco que las fuentes de sedimento. Es importante mencionar que los suelos utilizados para el cultivo de maíz dominan los insumos de carbono al sitio N11, mientras que los suelos procedentes de

las regiones de bosques se consideran importantes como fuentes de aporte de sedimentos. El análisis del CSSI confirma que en los suelos utilizados para cultivo de maíz predomina la mayor fuente de erosión (~ 50%). Sin embargo, no todo el suelo de la región es utilizada para cultivo de maíz, ni toda la región es boscosa. Los resultados de radionúclidos muestran que no más del 20% puede ser originado por la erosión de la capa de los suelos superficiales, en la subcuenca del Río Tapacalí.

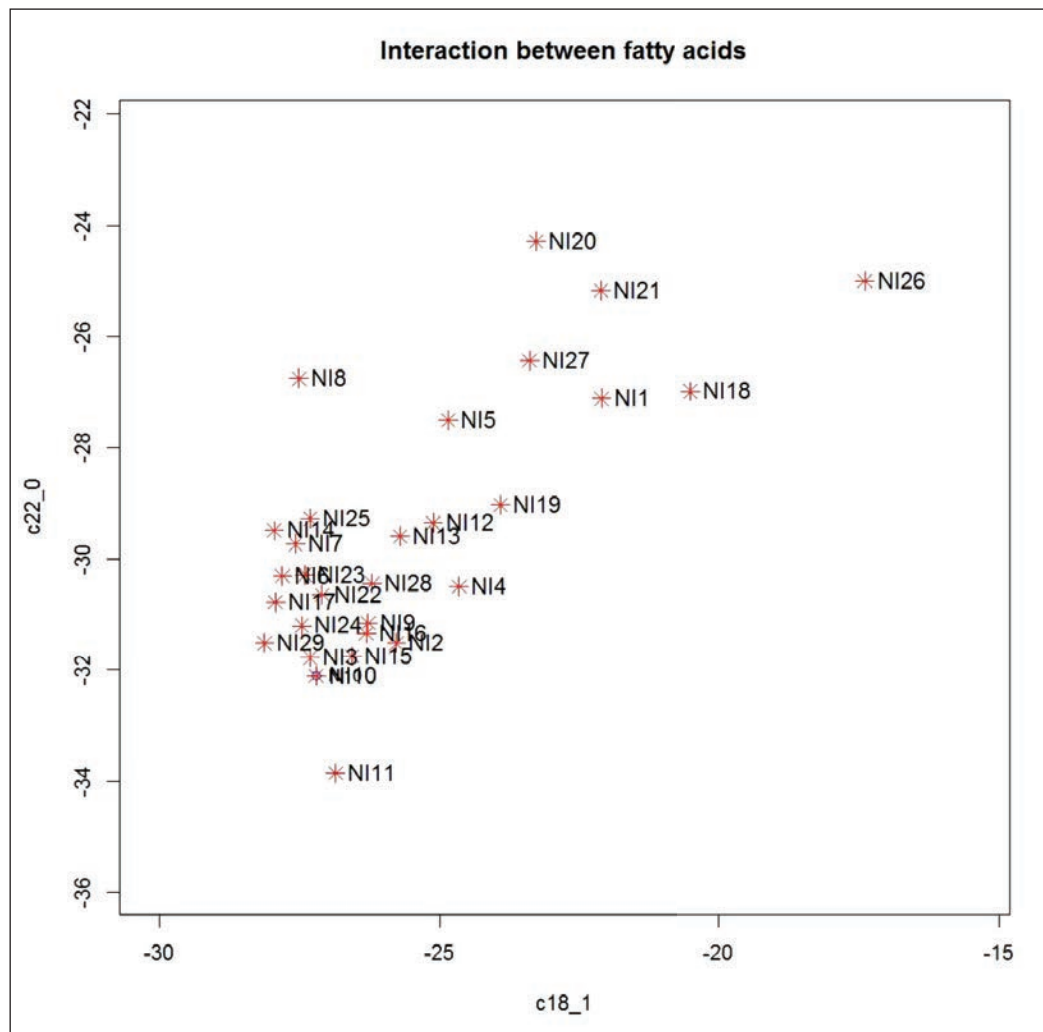


Figura 4. Interacción entre isótopos de C22_0 y C18_1 en la subcuenca del Río Tapacalí

3.4. El origen de las firmas $\delta^{13}\text{C}$ del suelo

Las huellas $\delta^{13}\text{C}$ observadas en cada fuente de suelo en la subcuenca utilizando los patrones $\delta^{13}\text{C}$ se encontraron entre los más fiables los que presentan longitudes de cadena de masa de carbono de C_{14} a C_{22} . Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ se encuentran principalmente entre suelos cultivados, forestales y pastizales y el carbono en estos suelos está dominado por las plantas C_3 y CAM en la mayoría de los sitios muestreados a excepción de los sitios NI20 y NI26 que presentan suelos con características aproximadas a carbono C_4 . Según Videla (2008), la mayoría de las plantas C_3 tienen valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre -24 a -30 ‰, con un valor promedio de -27 ‰. En las plantas C_4

los valores $\delta^{13}\text{C}$ se sitúan entre -10 a -16 ‰, con un valor promedio -16 ‰. En lo que respecta a las plantas CAM estas presentan valores intermedios entre -16 a -24 ‰.

Los valores promedio de $\delta^{13}\text{C}$ en las diferentes fuentes de suelos en la subcuenca variaron entre -26.81 y -16.87 ‰, mostrando que en la mayoría de los usos y cobertura de carbono orgánico del suelo estuvo asociado a vegetación de tipo fotosintético C_3 (-25.64 ‰ en promedio) y CAM (-22.55 ‰ en promedio), sin embargo se encontraron diferencias entre usos del suelo en los valores de $\delta^{13}\text{C}$ de los sitios NI20 ubicado en la parte central de la subcuenca y NI26 ubicado en la parte alta de la subcuenca porque

variaron entre -16.87 a -17.51 ‰, aproximándose al tipo de vegetación fotosintética C_4 (-17.19 ‰ en promedio).

La diferencia en los valores de $\delta^{13}C$ de los suelos utilizados para el cultivo de maíz NI20 y NI26 con el resto de los sitios muestreados para este estudio puede atribuirse al enriquecimiento de la composición isotópica de $\delta^{13}C$ de carbono C_4 debido a cambios en los cultivos en estos sitios con predominio de tipo fotosintético C_3 a C_4 y a la naturaleza inmutable a largo plazo de la cubierta de las plantas en laderas de pastoreo y bosques protegidos en esta subcuenca. Blake et al. (2012) sugirieron que una historia de uso mixto de la tierra (por ejemplo, cultivos y pastos) reduce la discriminación entre las fuentes del suelo. En la subcuenca gran parte de la agricultura y algunos bosques se lleva a cabo en pendientes y se encuentran ubicados en la parte alta y central lo que facilita el movimiento de los carbonos de las plantas por las escorrentías que se forman por la precipitación.

Los sitios de sedimentos próximos a la ribera del Río Tapacalí y cultivos de maíz presentaron valores promedios más altos $\delta^{13}C$ para este estudio con -25.02 ‰, mientras que los suelos utilizados para maíz mezclado con otros cultivos presentaron valores promedios de -23.28 ‰ y los suelos utilizados para maíz y frijol en la subcuenca presentaron los valores promedios más bajos con -22.45 y -22.48 ‰ respectivamente. Otras fuentes de suelo utilizados para café de sombra y pasto muestran valores similares de $\delta^{13}C$ con -24.83 y -24.84 ‰ respectivamente. También se observó que los suelos utilizados para bosques presentaron valores muy cercanos a los utilizados para café de sombra y pasto (-23.56 ‰). Los suelos de bosques muestran similitudes con los suelos utilizados para el cultivo de maíz cercano a la ribera del río, debido a que el cultivo ocurre principalmente en las llanuras de inundación del río en las que se encuentran las orillas de los ríos. Sin embargo, se observa una desviación mayor para los ácidos de cadena C_{16} , presumiblemente, los ácidos grasos de producción agrícola son responsables de esta diferencia; A pesar de la gama de cultivos (maíz, frijol, café, yuca y tomate) en la subcuenca estos no impiden atribuir la diferencia a un cultivo específico.

Las huellas de $\delta^{13}C$ de algunos de los suelos procedentes de las zonas de cultivo y bosques en la subcuenca oscilan entre los límites C_3 y C_4 , proporcionando de nuevo una fuente de discriminación desde las otras fuentes de suelos. El comportamiento está también claramente diferente de los suelos cercanos a la ribera del río. Una observación interesante en este estudio es la estrecha coincidencia observada entre los suelos utilizados para maíz y frijol. La diferencia mostrada por los suelos refleja diferentes fuentes de carbono (cobertura vegetal) debido a los usos de los suelos en el pasado lejano y / o la presencia de procesos in situ únicos dentro del

ambiente del suelo. Aunque los valores de los ácidos grasos y sus respectivos valores de $\delta^{13}C$ reflejan tanto la cubierta vegetal actual como la anterior, también hay una contribución de la micro-flora y fauna dentro de la matriz del suelo en la subcuenca. Por lo tanto, los patrones que vemos para cada fuente de suelo reflejan en cierto grado una comunidad de suelo, influenciada en parte por los usos actuales y pasados de la tierra en la subcuenca del Río Tapacalí. Esto último concuerda con lo encontrado por Hancock y Revill (2008), donde las proporciones de ácidos grasos y sus respectivos valores de $\delta^{13}C$ reflejan tanto la cubierta vegetal actual como la anterior y una contribución de la micro-flora y fauna dentro de la matriz del suelo.

4. CONCLUSIONES

En este estudio, los valores de $\delta^{13}C$ del sitio NI10 mostró suficiente discriminación para distinguir que prácticas agrícolas y/o cultivos provocan mayor erosión, siendo la agricultura la principal actividad con mayor impacto en la subcuenca, seguida de los usos de pastizales y tierras forestales. Así, la erosión superficial del suelo en la parte alta, contribuyó con más del 50% de los sedimentos a algunos ríos de la parte baja de la subcuenca.

El mayor contribuyente de Carbono en la subcuenca es el sitio NI24 utilizado para el cultivo de maíz.

De los 29 sitios muestreados se encontraron 14 en los que hubo predominio de vegetación C_3 , 13 con predominio de vegetación CAM y dos sitios con vegetación C_4 .

La técnica CSSI fué capaz de proporcionar estimaciones realistas de las proporciones de las fuentes de suelo en la subcuenca ofreciendo la oportunidad de discriminar los usos del suelo y las prácticas agrícolas proporcionando información de la erosión y depósito de sedimentos. Por otra parte, a medida que la técnica de CSSI cuantifica la huella isotópica de los ácidos grasos unidos a los sedimentos proporcionar estimaciones certeras de la sostenibilidad de los suelos superficiales en la subcuenca.

De acuerdo al origen de los sedimentos encontrado en este estudio existen depósitos sedimentarios en los suelos, influenciados por la erosión derivada de determinadas prácticas agrícolas/cultivos por los usos actuales y pasados de la tierra en la subcuenca del Río Tapacalí.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) por el apoyo al participar en el Proyecto ARCAL RLA5064 "Fortalecimiento de Estrategias de Conservación de los Recursos Suelo y Agua a Nivel de Cuencas para Fortalecer la Seguridad Alimentaria de América Latina y el Caribe a través de la Aplicación Innovativa

de las Técnicas FRN, CSSI y MIRS y por realizar los análisis y el entrenamiento de manejo de los datos de los Isótopos Estables de Compuestos Específicos (CSSI) correspondientes. Agradecemos además al Centro para la investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN) por el apoyo brindado para publicar el artículo. Se agradece también a la Dra. Katia Montenegro, Jefa del Área de Investigación y Desarrollo del CIRA/UNAN por las sugerencias y recomendaciones hechas al borrador de este artículo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blake, W., K., Ficken, P., Taylor, Russell, M. & Walling, D. 2012. Tracing crop-specific sediment sources in agricultural catchments. *Geomorphology* 139: 322–329. DOI:10.1016/j.geomorph.2011.10.036.
- Bligh, E. & Dyer, W. 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology* 37:912–917.
- Carvajal, A. 2008. Relación del Carbono y Nitrógeno del suelo con usos y coberturas del terreno en Alcalá, Valle del Cauca. Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de Magíster Scientiae en Ecotecnología. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ciencias Ambientales. Maestría en Ecotecnología.
- Christie, W. 1982. *Lipid Analysis*, 2nd edn. Pergamon Press: Oxford.
- de los Santos Villalobos, S., M. Ayala, & R. Bórquez. 2016. ESTRATEGIAS PARA LA CONSERVACION DE SUELOS. CIENCIA PARA EL DESARROLLO.
- de los Santos Villalobos, Bravo, C., Dos Anjos, R., Cardoso, R., Max, G., Andrew, S., Mabit, L. & Dercon, G. 2017. The CSSIAR v.1.00 Software: A new tool based on SIAR to assess soil redistribution using Compound Specific Stable Isotopes. *SoftwareX* 6, 13–18.
- Gibbs, M. 2008. Identifying source soils in contemporary estuarine sediments: a new compound-specific isotope method. *Estuaries and Coasts* 31: 344–359. DOI: 10.1007/s12237-007-9012-9.
- Hancock, J. & Revill, T. 2008. Erosion source discrimination in a rural Australian catchment using compound-specific isotope analysis (CSIA).
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2008. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Vol. 1. Roma. Fecha de consulta: 2017-04-24.
- Videla, C. 2008. Aplicación de técnicas de ¹³C en estudios de dinámica de materia orgánica del suelo. XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP.C.C. 276, 7620 Balcarce. Argentina.

Bibliografía de Internet

<https://es.scribd.com/document/257612118/Riesgo-Deslizamientos-subcuenca-del-Rio-Tapacali-Madriz-Nicaragua>

Alianza por la resiliencia, 2013. Estudio de Modelación de Riesgos a Deslizamientos de Tierra. Subcuenca del río Tapacalí. Madriz. Nicaragua. Fecha de consulta: 2017-06-04.

<https://es.scribd.com/document/257611926/Plan-de-Manejo-y-Gestion-Integral-de-la-subcuenca-del-Rio-Tapacali-Madriz-Nicaragua>

Alianza por Resiliencia, 2014. Plan de Manejo y Gestión Integral de la Subcuenca del Río Tapacalí. Fecha de consulta: 2017-06-05.

http://www.edafologia.net/erosion/tema1_intro/1_intro2010.pdf IAEA (International Agency Energy Atomic), 2014. First Coordination Meeting of the Regional Project RLA5064 “Strengthening Soil and Water Conservation Strategies at the Landscape Level by Using Innovative Radio and Stable Isotope and Related Techniques”. 28 April – 2 May 2014. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Químicas. Hotel Puerta del Sur.