



Estimación de la erosión y sedimentación en la subcuenca del Embalse Apanás - Asturias usando radioisótopos (^{137}Cs y ^{210}Pb).

Yader Caballero

Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua). P.O. Box 4598, Managua, Nicaragua yadercaballero@cira.unan.edu.ni Tel. +505 83646595

Resumen

La cuenca del embalse Apanás – Asturias se encuentra ubicada en el departamento de Jinotega, Nicaragua y comprende una superficie total de 641.90 km², de los cuales 38.39 km² corresponden al espejo de agua. En este trabajo se utilizaron técnicas de radioisótopos trazadores de Cesio 137 (^{137}Cs) para estimar la erosión en la parte baja de las microcuencas del río San Gabriel y Jigüina y Plomo 210 (^{210}Pb) para determinar la tasa de acumulación y sedimentación frente a las desembocaduras de los ríos San Gabriel y Jigüina en el embalse. Se utilizó el modelo proporcional para obtener el movimiento y la distribución del ^{137}Cs en los suelos y el modelo de Flujo Constante para fechar dos perfiles de sedimentos. Los resultados de ^{137}Cs mostraron que el margen derecho del río San Gabriel es el sector más afectado por la erosión. El perfil de sedimento colectado

frente a la desembocadura del río San Gabriel captó la historia de los últimos 49 años, incluyendo el aumento brusco en la tasa de acumulación y sedimentación a partir del año 2001 y 1998 respectivamente. El perfil de sedimentos ubicado frente a la desembocadura del río Jigüina presentó la historia de los últimos 46 años, cambios en la acumulación de sedimentos a partir de 1979 y en la tasa de sedimentación desde el año 1995. Las cronologías establecidas muestran variabilidad espacial y temporal en las tasas de acumulación y sedimentación en ambos perfiles de sedimento debido al aumento de la población, agricultura y fenómenos naturales (huracanes y tormentas tropicales).

Palabras claves: Erosión, ^{137}Cs , ^{210}Pb , tasa de acumulación, tasa de sedimentación

Abstract

The reservoir Apanás - Asturias is located in the department of Jinotega, Nicaragua and comprises a surface area of 641.90 km², out of which 38.39 km² belong to the water surface. In this work, isotopic techniques were applied. Cesium 137 (^{137}Cs) was used to estimate the soil erosion in the lower watersheds of the San Gabriel River Lead 210 (^{210}Pb) to determine the rate of sediment accumulation at the river mouths San Gabriel and Jigüina in the reservoir. The proportional

model was used to elucidate the movement and distribution of ^{137}Cs in soil and Constant Flow model was used to date the sediment profiles. The results showed that cesium 137 the right bank of the San Gabriel River is the sector most affected by erosion. The profile of sediment taken opposite to the location of the mouth of the San Gabriel River recorded the history of the past 49 years, including a sudden increase in the rate of accumulation and sedimentation in 2001 and in 1998. The

sediment profile taken opposite to the location of the mouth of the river Jigüina presented the history of the past 46 years, changes were observed in sediment accumulation from 1979 and sedimentation rate since 1995, respectively. The established chronologies show spatial and temporal variability on the rates of accumulation and

sedimentation in both profiles of sediment due to the increase in population, agriculture and natural phenomena (hurricanes and tropical storms).

Keywords: Erosion, ^{137}Cs , ^{210}Pb , accumulation rate, sedimentation rate.

Introducción

La erosión de los suelos se considera uno de los problemas ambientales más serios en el mundo (Hernández et al., 2011), lo que ha generado especial atención en los embalses que se utilizan para producción de energía. En Nicaragua, el lago de Apanás es utilizado en la generación de energía hidroeléctrica, la que es consumida a nivel nacional. Los asentamientos humanos, la deforestación y otras actividades antropogénicas como la explotación de grandes extensiones de tierras para diferentes usos sin ningún plan de manejo ambiental en el área de la cuenca de drenaje del embalse Apanás – Asturias, aceleran la erosión y sedimentación en la cuenca. Esto constituye un riesgo para los diferentes usos del agua del embalse. La acumulación de sedimentos en los embalses constituye un grave problema para la gestión eficaz de un recurso finito como el agua.

La presencia del ^{137}Cs en el ambiente es debido a las pruebas de armas nucleares o liberaciones de los reactores nucleares en la década de los años sesenta y por accidentes nucleares (Chernobyl) (Wise, 1980; Walling et al., 1986). El ^{137}Cs tiene una vida media de 30.1 años, lo que garantiza una larga permanencia en los lugares donde se deposita. Después que entra en la atmósfera, el ^{137}Cs es transportado en el aire y posteriormente se precipita sobre la superficie de la tierra. La incorporación artificial de este radionúclido al ecosistema ha permitido la realización de diferentes tipos

de estudios ambientales. La búsqueda de técnicas alternativas para la estimación de la erosión de los suelos para complementar los métodos existentes ha dirigido el uso de los radionucleidos, en particular la precipitación del ^{137}Cs , como trazador para obtener la estimación de la erosión de los suelos y la deposición en tierras agrícolas (Hernández, 2013). La gestión de la cuenca del embalse Apanás – Asturias, demanda obtener datos sobre las tasas de erosión de los suelos para conocer la magnitud del problema y tomar medidas de conservación efectivas de los suelos para un mejor funcionamiento del embalse.

La técnica más utilizada para determinar un marco geocronológico en los sedimentos es la del radioisótopo natural de ^{210}Pb (Pb 210) (Appleby et al., 1978). El ^{210}Pb es un isótopo radiactivo perteneciente a la serie de desintegración radiactiva del ^{238}U , cuyos productos de desintegración incluye el ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Bi , y como producto final el isótopo estable ^{206}Pb . El ^{210}Pb es un isótopo natural inestable con una vida media de 22.26 años. Esta vida media, permite su utilización en la determinación de la edad absoluta de registros sedimentarios que abarcan, aproximadamente, los últimos 100 años.

Es importante conocer la tasa de acumulación y sedimentación de los sedimentos a través de la técnica nuclear del ^{210}Pb en el embalse Apanás – Asturias. Por medio de esta investigación se ha generado información

sobre el proceso de erosión y sedimentación en el embalse Apanás – Asturias que servirán para introducir medidas dirigidas a reducir el impacto y daño ambiental proveniente de la subcuenca hacia el lago y en el fondo del embalse que permite un mejor control sobre los riesgos de la sedimentación para el flujo de agua en el lago mismo.

Materiales y Métodos

Erosión

Para la estimación de las tasas de erosión se utilizó el modelo proporcional para obtener información confiable sobre el movimiento y erosión de los suelos y la distribución del ^{137}Cs presente en los suelos de la microcuenca del río Jigüina y San Gabriel pertenecientes a la cuenca del embalse Apanás.

Muestreo

Se realizó una visita de campo y un muestreo preliminar para evaluar la existencia de posibles sitios de referencias y el área de estudio. La selección del sitio de referencia para la aplicación de la técnica nuclear de ^{137}Cs en los estudios de erosión de suelos es utilizado para la determinación del inventario de referencia en el área de estudio, con respecto al cual los cambios en el inventario en sitios degradados o de deposición serán evaluados. El sitio de referencia seleccionado cumplió con los siguientes requisitos: No había experimentado pérdida ni deposición de sedimentos; cubierta vegetal constante, al menos desde los años 50; ángulo de inclinación mínimo, presencia permanente de los equipos de investigación; áreas protegidas, tales como parques, áreas de ceremonia, cementerios; ubicado lo más cercano posible al área de estudio (IAEA, 2008). Por otro lado, el área de estudio se seleccionó acorde a los siguientes criterios: Zona agroecológica estratégica, baja densidad poblacional, con problemas de

erosión y tipo de manejo, dirigido a áreas con erosión hídrica y debido al cultivo (erosión laminar y en surcos, evitando áreas de movimientos de tierra, disponibilidad de información sobre la historia del uso de la tierra y su gestión (últimos 50 años), presencia de usos de tierra contrastante (largo plazo) con el objeto de realizar una comparación de pares del impacto del uso de la tierra en la erosión (pastos vs pastos-tierras agrícolas (min 15 años)), con el mismo tipo de pendiente-suelo y de patrón de lluvia y disponibilidad de información básica (características del suelo, clima (precipitaciones) y geología) y mapas topográficos del área de estudio.

Dentro del plan de muestreo se definió el número de muestras a tomar (16 para el sitio de referencia y 16 para el sitio de estudio a una profundidad de 0 a 21 cm y 22 a 44 cm para el sitio de referencia, mientras que para el sitio de estudio se realizó a una profundidad de 44 cm. Se realizó una sola campaña de muestreo en dos sitios de referencia y dos zonas de estudio en las subcuencas del río San Gabriel y río Jigüina (Fig. 1).

Las muestras fueron analizadas en un sistema espectrométrico gamma con detector de germanio de alta pureza (CANBERRA – PACKARD, GS4018). El sistema fue calibrado para determinar las actividades de ^{137}Cs por la energía 661.7 keV en muestras de suelo colocada en un Marinelli posicionada en un detector. Los espectros de las muestras fueron colectados durante 12 horas. Los resultados de ^{137}Cs se utilizaron para la estimación de las tasas de erosión de los suelos y se convirtieron en pérdidas (erosión) o ganancias (sedimentación). Esta conversión se realizó empleando el modelo proporcional por medio de un software disponible como un complemento para MS excel el cual se descarga en el sitio <http://www-naweb.iaea.org/nafa/swmn/models-tool-kits.html>.

El modelo puede ser representado como sigue.

$$Y = 10 \text{ (BdX/100TP)} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

Y = Promedio anual de la pérdida de suelo
[T·ha⁻¹·año⁻¹]

d = Profundidad del arado o lecho cultivado
[m]

B = Profundidad volumétrica del suelo
[Kg·m⁻³]

X = Porcentaje de reducción del inventario total de ¹³⁷Cs definido como:

$$(A_{\text{ref}} - A) / (A_{\text{ref}} \times 100)$$

T = Tiempo transcurrido desde el inicio de la acumulación del ¹³⁷Cs [Años]

A_{ref} = Inventario local de referencia de ¹³⁷Cs
[Bq m⁻²]

A = Medida del inventario total de ¹³⁷Cs en el punto de muestreo [Bq m⁻²]

P = Factor de corrección del tamaño de la partícula

Sedimentación

El ²¹⁰Pb juega un papel preponderante en el estudio y fechado de los impactos ambientales durante los últimos 100 años, que cubre el mayor crecimiento industrial y demográfico experimentado por la mayor parte de los países del mundo. El ²¹⁰Pb permitió estudiar las tasas de sedimentación y acumulación en perfiles de sedimentos ubicados frente a la desembocadura del río Jigüina y río San Gabriel, en el embalse, proporcionando información útil sobre el estudio de los procesos sedimentarios.

La actividad del ²¹⁰Pb se determina de forma indirecta mediante su descendiente el ²¹⁰Pb asumiendo que ambos se encuentran en equilibrio secular o igual comportamiento químico (IAEA, 2012). Los modelos son utilizados para obtener la edad de cada capa en función de la profundidad, calcular las tasas de acumulación y sedimentación (IAEA, 2012). En este estudio se utilizó el modelo de Flujo Constante (Constant Flux) conocido como CRS (Constant Rate of Supply), el cual se basa en la hipótesis que el flujo de ²¹⁰Pb en exceso a la superficie del sedimento es constante. Para realizar el fechado con el modelo CRS se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\text{Edad } t(i) = 1/\lambda \ln (A(0)/A(i)) \quad \text{Ecuación 2.}$$

$$\text{Años } (y) = T - t(i) \quad \text{Ecuación 3.}$$

Fecha de muestreo (T)

$$\text{Tasa de Acumulación } r(i) = (\lambda \times A(i)) / (C(i)/10) \quad \text{Ecuación 4.}$$

Tasa de sedimentación

$$s(i) = r(i) / \rho \quad \text{Ecuación 5.}$$

ρ = Densidad

Muestreo

Se realizó una visita de campo y un solo muestreo para dos sitios: 1 perfil de sedimento frente a la desembocadura del río San gabriel y 1 frente a la desembocadura del río Jigüina en el Embalse Apanás – Asturias (Fig. 1).

Las muestras fueron analizadas en un sistema espectrométrico alfa el cual tiene cuatro cámaras alfa duales, con 12 detectores PIPS cuya resolución de los pulsos está entre 11 y 13 keV de energía.

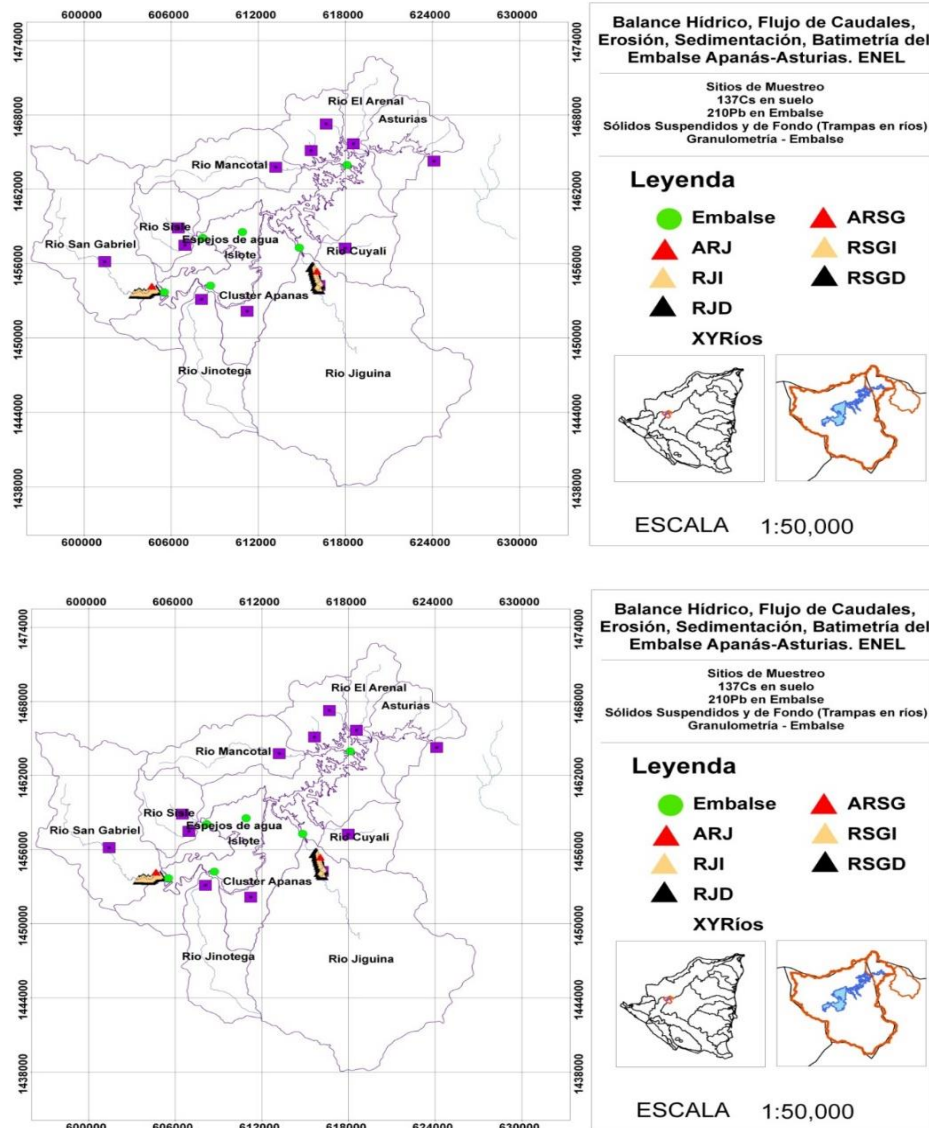


Fig.1. Ubicación de sitios de estudio en el embalse Apanás - Asturias

RESULTADOS

Erosión en Suelos de la Microcuenca Jiguina y San Gabriel

Sítios de Referencia: Río San Gabriel y Jiguina

Los resultados de ^{137}Cs en el área de referencia ubicado en la parte baja de la microcuenca del río San Gabriel variaron entre 0 a 2.26 Bq kg^{-1} en los primeros 21 cm de profundidad y entre 0.35 a 1.63 Bq kg^{-1} entre 22 a 44 cm de profundidad (Tabla 1). En cuanto al área de referencia ubicada en la

parte baja de la microcuenca del río Jiguina los resultados de ^{137}Cs variaron entre 0.82 a 1.80 Bq kg^{-1} entre 0 a 21 cm de profundidad y entre 0 a 0.94 Bq kg^{-1} entre 22 a 44 cm de profundidad (Tabla 1). En la Tabla 1 se muestran los resultados de las mediciones de las actividades específicas (Bq kg^{-1}), la distribución en los suelos y los inventarios de ^{137}Cs de los sitios seleccionados como referencia para el estudio de la microcuenca del río San Gabriel y río Jiguina.

En lo que respecta a los valores obtenidos en los inventarios de ^{137}Cs en el sitio de referencia de la microcuenca del río San Gabriel, estos se presentaron entre 219.94 Bq m^{-2} a 334.67 Bq m^{-2} en los primeros 21 cm de profundidad y entre 45.26 Bq m^{-2} a 219.94 Bq m^{-2} de 22 cm a 44 cm de profundidad. Es notorio que los valores fueron más altos en los primeros 21 cm de profundidad del perfil del suelo y decrecen notablemente desde los 22 cm hasta 44 cm de profundidad (Tabla 1).

Por otra parte los valores de las mediciones de los inventarios de ^{137}Cs del perfil de suelo en el sitio de referencia ubicado en la microcuenca del río Jigüina presentan una similitud con los valores obtenidos en el sitio de referencia de la microcuenca del río San Gabriel de 0 hasta 21 cm de profundidad. Es de especial relevancia que por debajo de los 21 cm de profundidad en la mayoría de los sitios estudiados no se encontró ^{137}Cs .

Tabla 1. Inventarios del ^{137}Cs en el sitio de referencia de las microcuencas del río San Gabriel y el río Jigüina muestreados en Septiembre del 2013.

Identificación del sitio de muestreo	Profundidad del Suelo [cm]	Sitio de Referencia Río San Gabriel			Sitio de Referencia Río Jigüina		
		Actividad Específica [Bq kg^{-1}]	Inventario [Bq m^{-2}]	Inventario total [Bq m^{-2}]	Actividad Específica [Bq kg^{-1}]	Inventario [Bq m^{-2}]	Inventario total [Bq m^{-2}]
A1	0-20	1.72	259.41	462.31	1.71	257.47	266.57
	21-40	1.58	202.90		0.06	9.10	
A2	0-20	2.20	312.28	399.10	1.59	234.85	244.34
	21-40	0.56	86.81		0.07	9.49	
A3	0-20	2.09	281.42	326.68	1.60	224.37	224.37
	21-40	0.35	45.26		0.00	0.00	
A4	0-20	2.12	283.97	369.11	1.09	171.18	171.18
	21-40	0.65	85.14		0.00	0.00	
A5	0-20	0.00	0.00	149.96	1.24	206.96	223.98
	21-40	1.15	149.96		0.10	17.03	
A6	0-20	2.00	334.67	536.17	1.15	176.68	176.68
	21-40	1.42	201.50		0.00	0.00	
A7	0-20	2.26	307.29	434.32	0.94	166.52	166.52
	21-40	0.97	127.03		0.00	0.00	
A8	0-20	2.05	281.92	454.86	0.82	134.33	134.33
	21-40	1.20	172.94		0.00	0.00	
A9	0-20	2.13	288.20	421.36	1.25	210.42	210.42
	21-40	0.94	133.17		0.00	0.00	
A10	0-20	1.50	239.00	294.23	1.80	289.89	380.09
	21-40	0.42	55.23		0.53	90.20	
A12	0-20	2.14	345.22	453.24	1.28	201.50	201.50
	21-40	0.69	108.02		0.00	0.00	
A13	0-20	1.77	219.94	363.61	1.23	184.01	199.11
	21-40	0.96	143.66		0.11	15.10	
A14	0-20	1.93	278.35	498.29	1.20	190.60	190.60
	21-40	1.63	219.94		0.00	0.00	
A15	0-20	1.72	259.41	259.41	1.21	199.75	199.75
	21-40	0.00	0.00		0.00	0.00	
A16	0-20	2.06	264.28	416.01	1.61	250.32	250.32
	21-40	1.00	151.73		0.00	0.00	
			Total	6200.46		Total	3596.90
			Prom.	387.53		Prom.	224.81

Sitios de Estudio: Parte baja del Río san Gabriel y Jigüina

Las concentraciones de ^{137}Cs obtenidas en muestras de suelo en dos áreas de estudio seleccionadas en la microcuenca del río San Gabriel y río Jigüina al igual que los sitios de referencia se relacionaron con algunas características del suelo (Físicas y químicas); así como con el relieve (Tabla 2). En el caso de la microcuenca del río San Gabriel se debió a que está siendo intervenida por actividades antropogénicas como la agricultura, mientras que la microcuenca Jigüina fue elegida como punto de control y con ello se logró calcular las tasas de pérdida de suelo. La actividad específica y el inventario de ^{137}Cs calculado para el sitio de estudio ubicado en el margen izquierdo y margen derecho del río San Gabriel se ilustran en la Tabla 2.

Los valores de ^{137}Cs en el margen izquierdo del río San Gabriel varían entre 0.00 Bq m^{-2} a $17200.18 \text{ Bq m}^{-2}$ mientras en el margen derecho del río se obtuvieron resultados de ^{137}Cs entre 0.23 Bq m^{-2} a 275.90 Bq m^{-2} .

La actividad específica y el inventario de ^{137}Cs calculado para el sitio de estudio ubicado en el margen izquierdo y margen derecho del río Jigüina se muestran en la Tabla 3.

Los valores de ^{137}Cs en el margen izquierdo del río Jigüina variaron entre 0.00 Bq m^{-2} a 156.02 Bq m^{-2} mientras en el margen derecho del río se obtuvieron resultados de ^{137}Cs entre 25.74 Bq m^{-2} a 211.53 Bq m^{-2} . Los resultados obtenidos en la extensión de la aplicación de la técnica de uso del ^{137}Cs para la cuantificación de la erosión en la microcuenca del río San Gabriel y Jigüina se presentan en la Tabla 4.

Tabla 2. Resultados de la actividad específica de ^{137}Cs en suelos ubicados en los márgenes izquierdo y derecho del río San Gabriel muestreados en Septiembre del 2013.

Sitio de Estudio Río San Gabriel			Sitio de Estudio Río San Gabriel		
Identificación del sitio de muestreo	Actividad Específica [Bq kg^{-1}]	Inventario [Bq m^{-2}]	Identificación del sitio de muestreo	Actividad Específica [Bq kg^{-1}]	Inventario [Bq m^{-2}]
RSG-MI 0 m	1.12E+02	17200.18	RSG-MD 0 m	1.86E+00	275.90
RSG-MI 150 m	0.00E+00	0.00	RSG-MD 150 m	4.49E-01	72.30
RSG-MI 300 m	1.33E+00	218.86	RSG-MD 300 m	7.90E-01	122.77
RSG-MI 450 m	6.52E+01	8990.22	RSG-MD 450 m	3.85E-01	59.98
RSG-MI 600 m	1.85E+00	283.92	RSG-MD 600 m	1.23E+00	206.04
RSG-MI 750 m	0.00E+00	0.00	RSG-MD 750 m	1.44E-03	0.21
RSG-MI 900 m	1.55E+01	2320.94	RSG-MD 900 m	0.00E+00	0.00
RSG-MI 1050 m	3.97E+01	6651.93	RSG-MD 1050 m	2.94E-03	0.44
RSG-MI 1200 m	4.44E+01	7178.68	RSG-MD 1200 m	4.02E-01	63.20
RSG-MI 1350 m	1.32E-01	18.40	RSG-MD 1350 m	3.42E-01	56.22
RSG-MI 1500 m	9.33E+01	14303.90	RSG-MD 1500 m	4.67E-01	76.81
RSG-MI 1650 m	1.06E+02	15751.58	RSG-MD 1650 m	9.88E-01	167.99
RSG-MI 1800 m	4.94E+01	7367.95	RSG-MD 1800 m	1.60E-03	0.23
RSG-MI 1950 m	9.06E+01	14231.29	RSG-MD 1950 m	9.03E-01	135.50
RSG-MI 2100 m	8.38E+01	12722.41	RSG-MD 2100 m	5.97E-01	102.58
RSG-MI 2250 m	2.43E+01	3923.39	RSG-MD 2250 m	4.90E-01	83.03

RSG-MI X: Río San Gabriel Margen Izquierdo.

RSG-MD X: Río San Gabriel Margen Derecho.

X : Distancia entre puntos de muestreo en metros.

Tabla 3. Valores obtenidos de la actividad específica de ^{137}Cs en suelos ubicados en los márgenes izquierdo y derecho del río Jigüina muestreados en Septiembre del 2013.

Sitio de Estudio Río Jigüina			Sitio de Estudio Río Jigüina		
Identificación del sitio de muestreo	Actividad Específica [Bq kg ⁻¹]	Inventario [Bq m ⁻²]	Identificación del sitio de muestreo	Actividad Específica [Bq kg ⁻¹]	Inventario [Bq m ⁻²]
RJ-MI 0 m	5.78E-01	91.42	RJ-MD 0 m	9.36E-01	136.37
RJ-MI 150 m	4.42E-01	68.16	RJ-MD 150 m	8.58E-01	135.60
RJ-MI 300 m	7.97E-01	130.18	RJ-MD 300 m	1.71E-01	25.74
RJ-MI 450 m	2.54E-01	35.92	RJ-MD 450 m	6.13E-01	85.13
RJ-MI 600 m	0.00E+00	0.00	RJ-MD 600 m	5.17E-01	84.08
RJ-MI 750 m	4.81E-01	71.83	RJ-MD 750 m	3.05E-01	53.78
RJ-MI 900 m	4.72E-01	74.49	RJ-MD 900 m	2.52E-01	37.78
RJ-MI 1050 m	7.10E-01	97.14	RJ-MD 1050 m	4.04E-01	65.30
RJ-MI 1200 m	9.11E-01	156.02	RJ-MD 1200 m	6.55E-01	102.38
RJ-MI 1350 m	8.71E-01	135.73	RJ-MD 1350 m	1.52E+00	211.53
RJ-MI 1500 m	4.81E-01	75.35	RJ-MD 1500 m	5.22E-01	80.46
RJ-MI 1650 m	2.52E-01	39.52	RJ-MD 1650 m	8.58E-01	144.48
RJ-MI 1800 m	8.78E-02	15.86	RJ-MD 1800 m	8.25E-01	148.15
RJ-MI 1950 m	5.46E-01	91.42	RJ-MD 1950 m	7.15E-01	103.32
RJ-MI 2100 m	6.82E-01	96.42	RJ-MD 2100 m	5.51E-01	93.52
RJ-MI 2250 m	6.93E-01	112.46	RJ-MD 2250 m	6.93E-01	112.46

RJ-MI X: Río Jigüina Margen Izquierdo

RJ-MD X: Río Jigüina Margen Derecho.

X : Distancia entre puntos de muestreo en metros.

Tabla 4. Estimación de la erosión en la microcuenca del río San Gabriel y el río Jigüina aplicando el modelo proporcional.

Sitio de Estudio Río San Gabriel				Sitio de Estudio Río Jigüina			
Identificación del sitio de muestreo	Modelo Proporcional [t ha ⁻¹ año ⁻¹]	Identificación del sitio de muestreo	Modelo Proporcional [t ha ⁻¹ año ⁻¹]	Identificación del sitio de muestreo	Modelo Proporcional [t ha ⁻¹ año ⁻¹]	Identificación del sitio de muestreo	Modelo Proporcional [t ha ⁻¹ año ⁻¹]
RSG-MI 0 m	-400,0	RSG-MD 0 m	-61,83	RSG-MI 0 m	-189,81	RSG-MD 0 m	-86,48
RSG-MI 150 m	709,6	RSG-MD 150 m	-311,38	RSG-MI 150 m	-243,3	RSG-MD 150 m	-88,25
RSG-MI 300 m	-385,88	RSG-MD 300 m	-249,52	RSG-MI 300 m	-100,7	RSG-MD 300 m	-340,83
RSG-MI 450 m	179,97	RSG-MD 450 m	-326,48	RSG-MI 450 m	-317,43	RSG-MD 450 m	-204,29
RSG-MI 600 m	-381,68	RSG-MD 600 m	-147,46	RSG-MI 600 m	-400,0	RSG-MD 600 m	-206,7
RSG-MI 750 m	-400,0	RSG-MD 750 m	-399,74	RSG-MI 750 m	-234,85	RSG-MD 750 m	-276,36
RSG-MI 900 m	-250,27	RSG-MD 900 m	-400,0	RSG-MI 900 m	-228,73	RSG-MD 900 m	-313,14
RSG-MI 1050 m	29,12	RSG-MD 1050 m	-399,46	RSG-MI 1050 m	-176,67	RSG-MD 1050 m	-249,86
RSG-MI 1200 m	63,11	RSG-MD 1200 m	-322,53	RSG-MI 1200 m	-41,28	RSG-MD 1200 m	-164,61
RSG-MI 1350 m	-398,81	RSG-MD 1350 m	-331,1	RSG-MI 1350 m	-87,93	RSG-MD 1350 m	86,33
RSG-MI 1500 m	522,76	RSG-MD 1500 m	-305,85	RSG-MI 1500 m	-226,76	RSG-MD 1500 m	-215,01
RSG-MI 1650 m	616,16	RSG-MD 1650 m	-194,09	RSG-MI 1650 m	-309,13	RSG-MD 1650 m	-67,82
RSG-MI 1800 m	75,32	RSG-MD 1800 m	-399,71	RSG-MI 1800 m	-363,54	RSG-MD 1800 m	-59,38
RSG-MI 1950 m	518,08	RSG-MD 1950 m	-233,91	RSG-MI 1950 m	-189,81	RSG-MD 1950 m	-162,46
RSG-MI 2100 m	420,74	RSG-MD 2100 m	-274,27	RSG-MI 2100 m	-178,33	RSG-MD 2100 m	-184,98
RSG-MI 2250 m	-146,9	RSG-MD 2250 m	-298,23	RSG-MI 2250 m	-141,43	RSG-MD 2250 m	-141,43

Tasa de sedimentación por medio de la técnica de ^{210}Pb en perfiles de sedimento del Embalse Apanás – Asturias

El perfil de sedimento del río San Gabriel registró variaciones de ^{210}Pb entre los primeros 5 cm de profundidad (Fig.2a), para disminuir exponencialmente hasta los 15 cm de profundidad; mientras el perfil de sedimento muestreado en el río Jigüina mostró una variación del ^{210}Pb entre los primeros 3 cm de profundidad, para luego mostrar hasta los 21 cm material transportado con las mismas actividades de ^{210}Pb y

después disminuir exponencialmente a partir de los 22 cm de profundidad (Fig. 2b). Los resultados del perfil colectado frente a la desembocadura del río San Gabriel y frente a la desembocadura del río Jigüina se presentan en las Figuras 2a y 2b de concentración vs profundidad.

Los contenidos de ^{210}Pb en los sedimentos analizados ilustran que la mayor actividad específica de este radioisótopo natural en el río San Gabriel es de 11.54 Bq kg^{-1} , mientras en el río Jigüina la máxima actividad es de 29.31 Bq kg^{-1} .

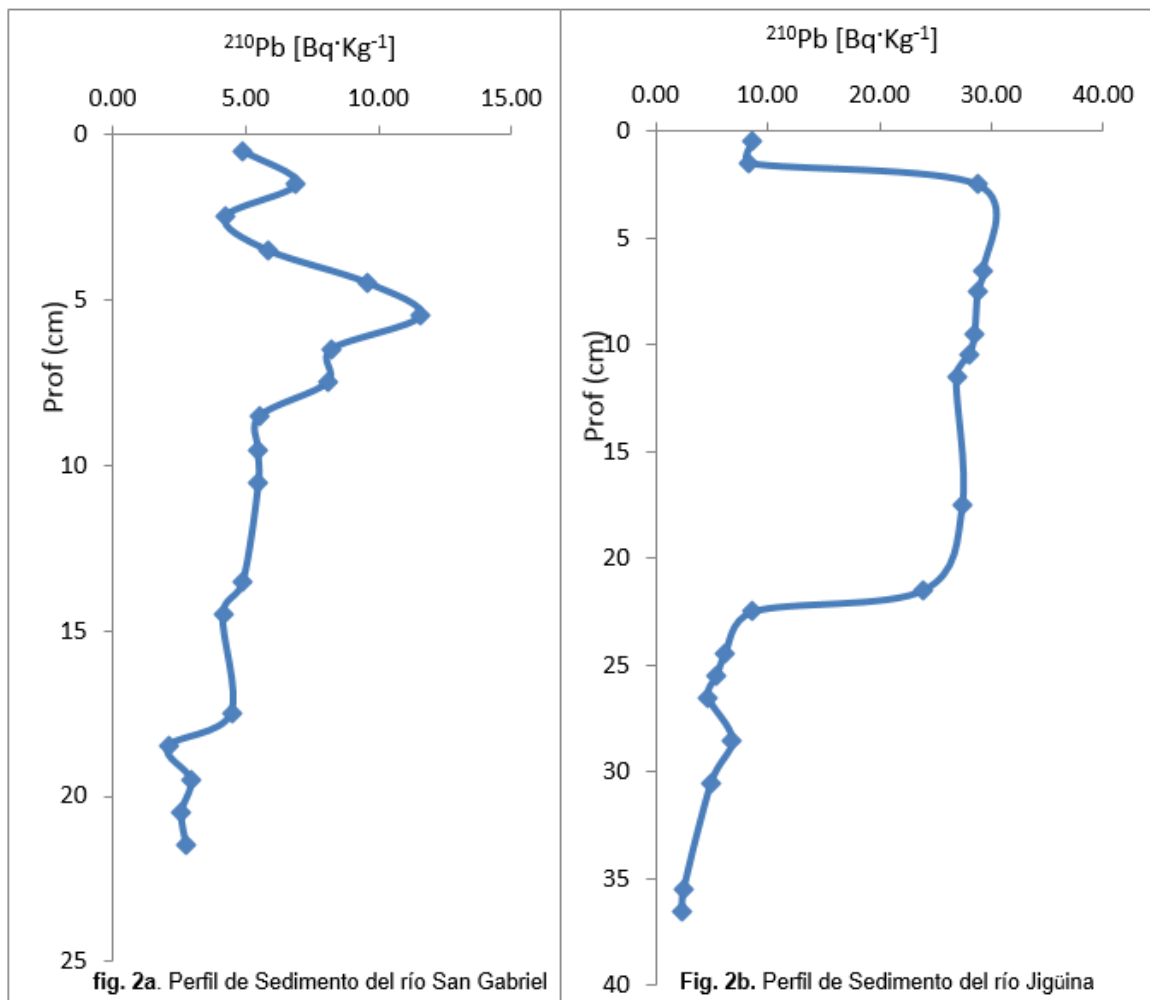


Fig.2. Variación espacial de Concentración de ^{210}Pb vs Profundidad en un perfil de sedimento del río San Gabriel (fig.2a) y del río Jigüina (fig.2b).

Distribución vertical de ^{210}Pb

En el caso del perfil de sedimento captado en el embalse Apanás – Asturias frente a la desembocadura del río San Gabriel se muestra una disminución irregular con la profundidad lo cual puede ser producto de procesos post depositacionales, principalmente resuspensión y/o eventos de deposición rápida junto con decaimiento radioactivo en los primeros centímetros de profundidad y decaimiento radioactivo hasta los 15 cm de profundidad y procesos de resuspensión y deposición rápida hasta los 22 cm de profundidad. En cambio el perfil captado en el embalse Apanás frente a la desembocadura del río Jigüina se aprecia mezcla en los tres primeros cm de profundidad y procesos de acumulación del mismo sedimentos entre los 3 a 21 cm de profundidad y decaimiento radioactivo hasta los 36 cm de profundidad.

Geocronología de los sedimentos del área de estudio

Río San Gabriel

Para el perfil de sedimento ubicado en el embalse Apanás - Asturias frente a la desembocadura del río San Gabriel la edad varió entre 3 a 49 años. Los resultados

obtenidos en la tasa de acumulación de sedimentos variaron entre 0.06 a 0.08 $\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ entre 1966 – 1998; mientras que la tasa de sedimentación varió en un rango de 0.13 a 0.14 cm yr^{-1} entre 1966 – 1994. En la Figura 3 se muestra las variaciones de la tasa de sedimentación y acumulación del perfil de sedimento captado frente a la desembocadura del río San Gabriel. En la Tabla 5 se muestra la geocronología de los sedimentos ubicados frente a la desembocadura del río San Gabriel.

Tabla 5. Geocronología de los sedimentos Apanás – Asturias ubicado frente a la desembocadura del río San Gabriel basados en distribución de ^{210}Pb en el embalse.

Perfil de Sedimento del Río San Gabriel				
Profundidad [cm]	Edad [año]	Año	r [$\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$]	s [cm año^{-1}]
RSG 6-7 cm	3	2012	0.20	0.73
RSG 7-8 cm	8	2007	0.19	0.56
RSG 8-9 cm	12	2003	0.21	0.61
RSG 9-10 cm	14	2001	0.17	0.47
RSG 10-11 cm	17	1998	0.08	0.27
RSG 11 - 12 cm	21	1994	0.05	0.14
RSG 12 - 13 cm	28	1986	0.05	0.12
RSG 13 - 14 cm	39	1975	0.05	0.13
RSG 14 - 15 cm	49	1966	0.06	0.13

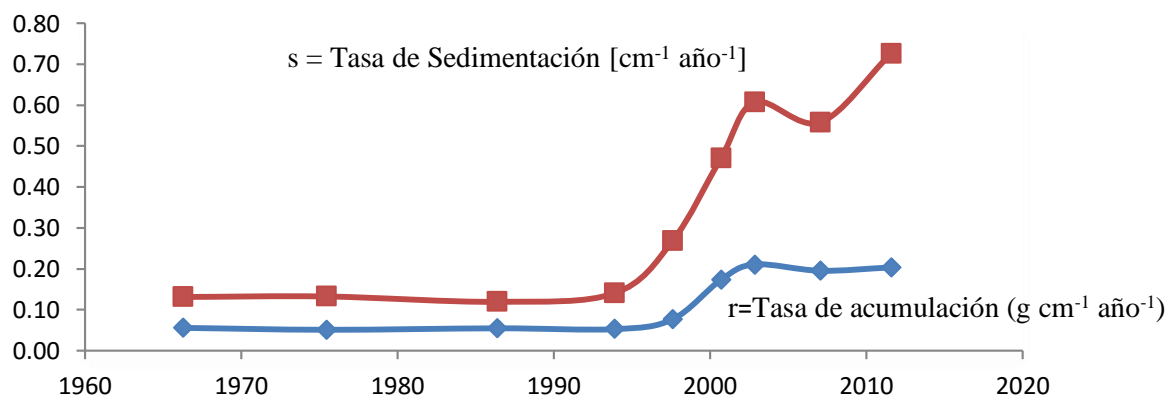


Fig. 3. Variaciones de la tasa de sedimentación y acumulación a través del tiempo en el embalse Apanás – Asturias frente a la desembocadura del río San Gabriel.

Río Jigüina

La edad de los sedimentos en el perfil captado en el embalse Apanás – Asturias frente a la desembocadura del río Jigüina varió entre 7 a 46 años. En la Tabla 6 se puede apreciar la geocronología para el perfil de sedimento captado frente a la desembocadura del río Jigüina.

En el perfil de sedimento captado frente a la desembocadura del río Jigüina la tasa de acumulación de sedimentos varió entre 0.01 a 0.05 $\text{g cm}^{-2} \text{yr}^{-1}$ entre 1979 – 2008 y la tasa de sedimentación varió entre 0.01 a 0.06 entre 1969 – 1993. En la Figura 4 se muestra las variaciones de la tasa de sedimentación y acumulación del perfil de sedimento captado frente a la desembocadura del río Jigüina.

Tabla 6. Geocronología de los sedimentos basados en distribución de Pb en el embalse Apanás ubicado frente a la desembocadura del río Jigüina.

Perfil de Sedimento del Río Jigüina				
Profundidad [cm]	Edad [año]	Año	r [$\text{g cm}^{-2} \text{año}^{-1}$]	s [cm año^{-1}]
RJ 22-23	7	2008	0.05	0.28
RJ 23-24	10	2005	0.02	0.09
RJ 24-25	15	2000	0.01	0.06
RJ 25-26	17	1998	0.03	0.15
RJ 26-27	20	1995	0.04	0.21
RJ 27-28	22	1993	0.01	0.06
RJ 28-29	26	1989	0.01	0.04
RJ 29-30	30	1985	0.01	0.04
RJ 30-31	36	1979	0.01	0.03
RJ 31-32	40	1975	0.00	0.02
RJ 32-33	46	1969	0.00	0.01

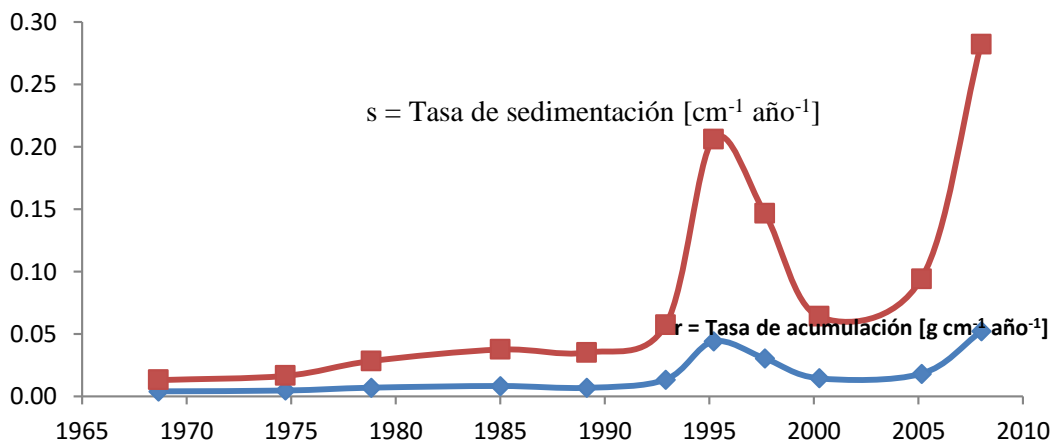


Fig. 4. Variaciones de la tasa de sedimentación y acumulación a través del tiempo en el embalse Apanás – Asturias frente a la desembocadura del río Jigüina.

Discusión

Sitios de referencia: Río San Gabriel y Jigüina

Los resultados obtenidos de las muestras de suelo en las áreas de referencia ubicadas en las microcuencas del río San Gabriel y río Jigüina representan la actividad de ^{137}Cs acumulada que ha sido estabilizada en el suelo hasta la fecha de muestreo porque no ha

sido afectada por erosión y deposición (Tabla 1). Por lo anteriormente escrito, la actividad de ^{137}Cs representa el nivel base de movimiento del ^{137}Cs en el suelo, se debe sobre todo a procesos físicos y que las pérdidas de este están estrechamente relacionadas a pérdidas de suelos y que su movimiento relacionado a procesos biológicos y químicos es despreciable. Ambos sitios cumplieron con los requisitos

de sitio de referencia porque de acuerdo a las mediciones de las actividades de ^{137}Cs los suelos no han sido perturbados ^{137}Cs de los suelos de ambos sitios de referencia. Según Hernández (2013), es por la erosión y deposición de partículas de sedimentos.

Sitios de estudio: Parte baja del Río san Gabriel y Jigüina

La comparación de la distribución con la profundidad del inventario de ^{137}Cs mostró que los primeros cm de profundidad de 0 a 21 cm contienen más del 50 % del inventario total en ambos sitios de referencia. Esto pudiera estar asociado a la fuerte retención del ^{137}Cs en los suelos de ambas microcuencas. Por otro lado en la parte más profunda de los perfiles de suelo de 22 cm a 44 cm de profundidad la actividad de ^{137}Cs es baja y en algunos casos es nula; es decir, los inventarios de ^{137}Cs son prácticamente nulos.

Los resultados de ^{137}Cs obtenidos en el margen izquierdo son más altos al compararlos con los resultados obtenidos de ^{137}Cs en el margen derecho del río. A partir de estos resultados se puede afirmar que el margen derecho del río San Gabriel constituye el sector más afectado por la erosión. Sin embargo es importante mencionar que según los inventarios de ^{137}Cs en ambos márgenes del río en algunos perfiles de suelo no se detectan contenido de ^{137}Cs , es decir; los inventarios de ^{137}Cs son prácticamente nulos, lo que denota que se ha perdido casi totalmente todo este perfil del suelo. Según Hernández (2013), el relieve es uno de los principales factores de erosión de los suelos. Debido a que el ^{137}Cs se absorbe a las arcillas, este es transportado por el suelo. Por lo anteriormente escrito, cuando hay movimiento de suelos hay pérdidas de ^{137}Cs y ganancia cuando hay depósito.

Al contrastar los inventarios totales de ^{137}Cs obtenidos en los diferentes sitios ubicados en

ambos márgenes del río San Gabriel se observa una variación de la actividad específica desde la desembocadura hasta 2.250 m río arriba. Los resultados de ^{137}Cs obtenidos en ambos márgenes (izquierdo y derecho) presentaron muchas variaciones entre sí. El ^{137}Cs en los suelos cultivados muestra una distribución uniforme a través del lecho arado (Cline y Richards, 1972). Cabe señalar que estos resultados son menores al compararlos con los valores obtenidos de ^{137}Cs en el río San Gabriel. Por lo tanto, se puede afirmar que en ambos márgenes del río Jigüina están disminuyendo los contenidos de ^{137}Cs debido a la pérdida de suelos producto de la erosión. El movimiento del ^{137}Cs se debe a procesos físicos, tamaño de partícula y materia orgánica (Hernández, 2013).

De acuerdo a los valores obtenidos de ^{137}Cs utilizando el modelo proporcional se enuncian pérdidas considerables de suelo en los márgenes izquierdos y derechos de los ríos San Gabriel y Jigüina. Estos valores constituyen una señal de alerta de la magnitud de los procesos erosivos en ambos márgenes del río San Gabriel y Jigüina y una justificación para estudios futuros de cuantificación de pérdida de suelos aplicando la técnica nuclear de ^{137}Cs en otras microcuencas de la cuenca.

En condiciones naturales el suelo con mínima pendiente (Ángulo de inclinación nula o casi nula) debe estar menos expuesto a la erosión; sin embargo, los resultados demuestran como la actividad antrópica favorece la pérdida de suelo por erosión en las microcuencas estudiadas. Además se debería tomar en cuenta que los suelos en ambos sitios de estudio están desprovistos de su cobertura vegetal natural y también están expuestos a técnicas inadecuadas de cultivo por lo que están propensos a la erosión.

Tasa de sedimentación por medio de la técnica de ^{210}Pb en perfiles de sedimento del Embalse Apanás – Asturias

Los perfiles de sedimentos ubicados frente a la desembocadura del río San Gabriel y río Jigüina mostraron mezcla superficial para luego disminuir con la profundidad. De manera general, ambos perfiles de sedimentos presentaron una disminución exponencial de ^{210}Pb con respecto a la profundidad de acuerdo a su condición de elemento radiactivo.

Una explicación alternativa de las variaciones de ^{210}Pb en ambos perfiles de sedimentos puede estar dada por los efectos de mecanismos de resuspensión y aporte de material fino debido a la erosión, lo que aumenta la remoción de este radionúclido desde la columna de agua, de tal forma que una partícula pasaría varios ciclos de depositación - resuspensión antes que se deposite definitivamente en los sedimentos, generando este exceso superficial.

La diferencia de las actividades obtenidas de ^{210}Pb en ambos perfiles de sedimentos se puede deber a aportes locales desde las microcuencas y a la presencia de mayor cantidad de material fino en el río Jigüina, lo que aumenta la remoción de ^{210}Pb desde la columna de agua. Es importante mencionar que el sitio ubicado frente a la desembocadura del río Jigüina presentó grandes cantidades de materiales finos (64 % de arcilla). El depósito atmosférico de ^{210}Pb en cualquier región es gobernado por factores geográficos y meteorológicos regionales, los cuales son razonablemente constantes en un período de varios años, dando lugar a un flujo de masa constante y por lo tanto a una tasa constante de acumulación de ^{210}Pb s, en la que cada capa de material acumulado tendrá la misma actividad inicial de ^{210}Pb s (Arvizú, 2004). Debido a lo anteriormente escrito, esto podría estar influyendo en las actividades obtenidas de ^{210}Pb , porque el área de la

microcuenca del río Jigüina es la más grande (183.9 km²) de la subcuenca del embalse Apanás – Asturias.

Distribución vertical de ^{210}Pb

En general, los perfiles de sedimentos analizados en este estudio mostraron una disminución de la actividad de ^{210}Pb con la profundidad hasta un nivel que varió según la localidad. Estos cambios anómalos en ambos perfiles de sedimentos posiblemente se deben a procesos de resuspensión y eventos de deposición rápida, lo cual indica un predominio de los procesos de acumulación y decaimiento radioactivo. Es importante señalar que ambos perfiles de sedimentos permiten calcular el exceso de ^{210}Pb por medio del promedio de las concentraciones de ^{210}Pb en el fondo del perfil de sedimento, los cuales muestran una actividad aproximadamente constante, lo que permite que los sedimentos de estas dos estaciones puedan ser utilizados para estimar la geocronología de ellos.

Geocronología de los sedimentos del área de estudio

Río San Gabriel y Río Jigüina

De acuerdo a los resultados obtenidos de ^{210}Pb el perfil de sedimentos registra la historia de los últimos 49 años y se evidencian cambios bruscos en la tasa de acumulación de sedimentos a partir del año 2001, mientras que la tasa de sedimentación muestra a partir del año de 1998 un aumento casi en un 100 %. El perfil de sedimentos ubicado frente a la desembocadura del río Jigüina registra la historia de los últimos 46 años. La tasa de sedimentación y acumulación encontrada en el sitio ubicado en el embalse Apanás – Asturias frente a la desembocadura del río Jigüina muestra un incremento diferente en comparación con el

obtenido frente a la desembocadura del río San Gabriel. Es notorio que la acumulación de sedimento se observa a partir del año 1979, en cambio la tasa de sedimentación aumentó en más del 100 % a partir de 1995.

En general, los resultados suministraron edades deferentes para ambos perfiles de sedimentos. Esta diferencia de edad se debe a la profundidad en que se detecta el ^{210}Pb en exceso. La acumulación es más estable en frente de la desembocadura del río San Gabriel, por lo tanto no se notan cambios marcados en la acumulación de sedimentos, excepto la producida por la compactación. Para este estudio, las variaciones en las tasas de acumulación y sedimentación en ambos perfiles de sedimentos posiblemente están relacionadas con una combinación de diversos factores: incremento de la población en el entorno del embalse, tamaño de la cuenca, tipos de suelo, cambios en el uso del suelo (Aumento de la agricultura) y la influencia de algunos fenómenos naturales (huracanes y tormentas tropicales). Cabe señalar que el embalse Apanás - Asturias fue construido en el año de 1964, lo que coincide con la edad obtenida en este perfil de sedimentos.

Conclusiones

La aplicación de la técnica nuclear del ^{137}Cs en los suelos de las microcuencas de los ríos San Gabriel y Jigüina muestra pérdidas de suelo en los sitios de estudio ubicados en el margen izquierdo y margen derecho de los ríos antes mencionados.

De acuerdo a los resultados de ^{137}Cs obtenidos en los sitios de estudio seleccionados ambos márgenes de los ríos (izquierdo y derecho) están siendo afectados por la erosión; destacándose el margen derecho del río San Gabriel el sector más afectado.

La sedimentación en dos perfiles de sedimentos en el embalse Apanás – Asturias ubicados frente a las desembocaduras de los ríos San Gabriel y Jigüina indican un aumento en la tasa de sedimentación en las últimas dos décadas relacionándose con el aumento de la población, aumento en la frontera agrícola o cambios del uso del suelo y la ocurrencia de fenómenos naturales como huracanes y tormentas tropicales.

En un futuro cercano, la sedimentación podría disminuir peligrosamente la capacidad de almacenamiento del volumen total de agua en el embalse Apanás – Asturias; amenazando de esta manera la producción de energía eléctrica y las actividades de tipo socio-económicas desarrolladas en la zona, principalmente las relacionadas con la pesca e irrigación.

Agradecimientos

Al Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAN-Managua) por el apoyo a esta investigación. En especial al personal que apoyó el estudio.

A la Empresa Nacional de Electricidad (ENEL), por financiar este estudio y autorizar la publicación de los resultados permitiendo agregar este artículo en la revista.

Referencias

- Appleby, P.y Oldfield, F.(1978). The calculation of Lead – 210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. University of Liverpool, Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics and Department of Geography. Vol. 5 U.K. p 1-8.
- Arvizu, M. (2004) Geocronología de la acumulación de metales pesados en marismas de las lagunas Chiricahueto

- y Estero de Urías, Sinaloa. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias del Mar (Química Acuática Mazatlán, Sinaloa, Junio de 2004.
- Cline, J. y Richards, W.(1972).Radioactive Strontium and Cesium in cultivated and abandoned plots.HealthPhys. 317-324.
- Garcés, G Navas, A. y Machín, G. (1997). Una aproximación sedimentológica al aterramiento de embalses y la erosión de cuencas de montaña: El embalse de Barasona y la cuenca del Esera – Isabena (Pirineo centrales, Huesca). Instituto pirenaico de ecología. EEAD. CSIC. Estación experimental de Aula Dei. CSIC. Zaragoza.
- Hernández, R. y Flebes, J. (2011). Estudio de la erosión de los suelos en áreas protegidas de Cienfuegos utilizando el ^{137}Cs como trazador. Julio - Diciembre, 2011.
- Hernández, R. (2013) Cuantificación de la erosión de los suelos en zonas de interés económico y ambiental de la provincia de Cienfuegos, Cuba, utilizando el ^{137}Cs como trazador. Julio, 2013.
- IAEA, (2008): Proyecto Enviromental Radionuclides as Indicators of Land Degradation in Latin American, Caribbean and Antartic Ecosystems, RLA 5/051 (ARCAL C).
- IAEA,(2012). Radiocronología de sedimentos costeros utilizando ^{210}Pb : Modelación, Validación y aplicaciones. OIEA, VIENA, 2012. STI/PUB/1538. ISBN 978-92-0-325210-2.
- Koide, M. Bruland, K. y Goldberg,(1973). Th-228/Th-232 and Pb-210 geochronologies in marine and lake sediments, Scripps Institution of Oceanography, University of California, La Jolla, California U.S.A. Vol. 37 p. 1171-1187.
- Sánchez., J. Asencio, M.y Ruiz, C.(2012).Radiocronología de Sedimentos Costeros Utilizando ^{210}Pb : Modelos, Validación y Aplicaciones. OIEA, VIENA, 2012. STI/PUB/1538. ISBN 978-92-0-325210-2.
- Walling, D. Bradley, S. y Wikinson, J. (1986): A Cesium 137 budget approach to the investigation of sediment delivery from a small agricultural drainage basin in Devon, UK. (Proceeding of the Symposium on Drainage Basin Sediment Delivery). 423 – 435. Albuquerque. NM. IAHS Publ. No. 159.
- Walling, D. y Quine, T.(1995). The use of fallout radionuclide measurements in soil erosion investigations.IAEA. Proceedings of the international FAO/IAEA Symposium of nuclear tecniques in soil – plants studies for sustainable agriculture and environmental preservation. 597-619. IAEA. Viena. Austria. Proc. Series STI/PUB/947.
- Wise, M. (1980). Cesium 137 And lead – 210; a review of tecniques and some applications in geomorphology in Cullingford R.A. Timescales in Geomprphology: Wiley. New York. USA. 109 – 127.