

Datación de sedimentos recientes utilizando isótopos radioactivos en el río Verde, en el estado de Oaxaca, México

**José Alfredo González Verdugo¹, Edith R. Salcedo Sánchez², M. Joselina Espinoza Ayala³,
Manuel Martínez Morales⁴**

Fecha de recepción: marzo de 2014 – Fecha de aprobación: marzo 2015

RESUMEN

Con objeto de conocer la evolución de los procesos sedimentarios en la parte baja del río Verde, Oaxaca, se realizaron mediciones en dos núcleos de sedimentos. El fechado y determinación de la tasa de sedimentación, se realizó utilizando los isótopos radioactivos Plomo-210 y Cesio-137, que sirven como indicadores de períodos de deposición de los últimos 100 años. La velocidad de sedimentación en el Río Verde obtenida por medio del isótopo Pb -210 es 0.69 a 0.89 cm/año. Por otro lado, la velocidad de sedimentación en la zona de estudio mediante el isótopo Cs-137 es del orden de 0.61 cm/año y 0.87 cm/año. El método de Cesio-137 proporciona marcadores distintivos de eventos, mientras que el método de Plomo-210 proporciona pendientes de concentración, que al aplicarse de manera conjunta proporcionan una validación de ambos métodos. En este estudio, los dos métodos coinciden en los valores de sedimentación para la zona del Río Verde. Los resultados de este trabajo permiten conocer la dinámica de los procesos de transporte de sedimentos en la zona, información que resulta útil para la planeación de obras hidráulicas y estimación de los impactos ambientales, así como la implementación de las medidas de mitigación correspondientes.

Palabras clave: Datación, tasa de sedimentación, isótopos radioactivos, marcadores, morfología de ríos.

Dating of recent sediments using radioactive isotopes in the Río Verde, Oaxaca state, Mexico.

ABSTRACT

This study presents the results of measurements on two recent sediment cores taken in the lower part of Río Verde in Oaxaca. The dating and determination of the sedimentation rate was performed using radioactive isotopes Lead-210 and Cesium-137, which serve as indicators of deposition periods for the last 100 years. The sedimentation rate in the Río Verde obtained by the Pb-210 isotope is from 0.69 to 0.89 cm / year. On the other hand, the same rate in the study area by the isotope Cs-137 is about 0.61 cm/year and 0.87 cm / year. Cesium-137 gives distinct event markers; whereas Pb-210 yields slope concentrations. However, by applying both methods, the dating techniques complement each other. Both methods agree on the sedimentation rate for the Verde River site. The results of this study provide insight into the dynamics of sediment transport processes in the area, information that is useful for planning hydraulic projects, estimation of environmental impacts and the implementation of appropriate mitigation measures.

Palabras clave: Datation, sedimentation rate, radioactive isotopes, markers, river morphology

^{1, 3, y 4} Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

² Universidad Nacional Autónoma de México

² Correo electrónico: edithsalcedos@gmail.com

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1° de enero de 2016. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 19, No.3, 2016, ISSN1665-529-X

INTRODUCCIÓN

Cuando se proyecta y dimensiona una obra o estructura hidráulica, como las presas, es necesario conocer los procesos de sedimentación en las corrientes donde se planea su construcción. La tasa de sedimentación y el tipo de acumulación de los sedimentos, están condicionados por varios factores, principalmente de origen natural y antrópico; en yacimientos morfológicamente complejos, el papel crucial lo juega la morfología del cuerpo de agua que es esencial para determinar las condiciones directas de la deposición (Tylman, 2004; Saxena *et al.*, 2002).

Otro elemento importante es la configuración de la cuenca, que es vital para determinar la incidencia de la erosión, transporte y acumulación de sedimentos, y también es un factor importante para establecer la variabilidad de las tasas de sedimentación (Hakanson y Jansson, 2002).

Un análisis de los cambios de las propiedades de los sedimentos en los núcleos representativos debe ir precedida de una identificación de las condiciones de sedimentación que influyen en los diferentes aspectos de la valoración ambiental, como son el deterioro de la calidad del agua, determinación de las tasas de erosión histórica y presente en cuencas e identificación de los periodos de respuestas a los rápidos cambios ambientales (Soto *et al.*, 2000, Tylman, 2004;).

En cuanto a la aplicación de los métodos Pb-210 y Cs-137 en la determinación de velocidades de sedimentación en ríos es incipiente, pero ha probado su utilidad en estudios recientes (Humphries *et al.*, 2010 y Czajka-Kaczka, 2002). Los resultados de dichos estudios permitieron establecer la variabilidad de la sedimentación a lo largo de un río, así como a la identificación de eventos de mayor acumulación de material asociado a inundaciones.

Una estimación del valor de estas diferencias es posible gracias a la datación de sedimentos utilizando métodos radioisotópicos de los cuales los más utilizados son el método Pb-210 y Cs-137 (Goslar *et al.*, 2000; Soto *et al.*, 2000; Smith, 2001; Kotarba *et al.*, 2002; Tylmann, 2003). El método de Pb-210 es una técnica relativamente reciente para determinar un marco geocronológico de la tasa de sedimentación, el cual utiliza un isótopo natural inestable con una vida media de 22.26 años. Esta vida media, relativamente corta, permite su utilización en la determinación de la edad absoluta de registros sedimentarios que abarcan, aproximadamente, los últimos 100 años (Castro, 2009).

Por otro lado, el Cs-137 se aplica para obtener edades de los sedimentos en los últimos 40 años, dado que dicho isótopo es liberado en la atmósfera y depositado

en la superficie terrestre por la precipitación. Su presencia en el ambiente se relaciona directamente con la actividad termonuclear atmosférica. La producción (y deposición) de Cs-137 inició alrededor de 1952 y 1954, llegó a un máximo en 1963 y tiene una vida media de 30.3 años (Olsen *et al.*, 1982; Hewitt, 2000).

Existen básicamente dos métodos para determinar la velocidad de sedimentación mediante radioisótopos (Appleby *et al.*, 1978): el CRS (Constant Rate Supply ó Velocidad de sedimentación constante) y CIC (Constant Initial Concentration ó Concentración inicial constante). En este trabajo se consideró el método CIC ya que en la zona de estudio, es frecuente la incidencia de eventos hidrometeorológicos extremos lo que origina un transporte de sedimentos y depositación variable.

El objetivo de este trabajo es determinar la tasa de sedimentación reciente y analizar su variabilidad en 2 núcleos de sedimentos tomados en la parte baja del río Verde ubicado en la costa chica del estado de Oaxaca, México. Los resultados de este trabajo permitieron evaluar el proceso natural de deposición de sedimentos tanto en morfologías de ríos meándricas como rectas, además de proporcionar valores de sedimentación actuales para evaluar en el futuro los posibles impactos en caso de que se construya alguna estructura hidráulica que modifique la morfología del río.

Área de Estudio

El río Verde se encuentra ubicado en la denominada costa chica del estado de Oaxaca, dentro de la Región Hidrológica No. 20 (RH20) "Costa Chica Río Verde, y se considera el más importante desde el punto de vista hidrográfico. Se ubica en las coordenadas geográficas 15° 58' y los 17° 37' de latitud norte y de 96° 14' a 98° 06' de longitud oeste. Para la toma de núcleos de sedimentos se seleccionaron dos puntos de muestreo, ubicados en la cuenca baja del río sobre su corriente principal. Los sitios de muestreos se seleccionaron de tal forma que fuesen representativos de los procesos de sedimentación y de los ambientes geomorfológicos del río; así, se seleccionó un sitio donde el río presenta un ambiente meándrico y el otro sitio en una zona donde el río fluye de manera recta.

El río Verde es uno de los ríos más grandes de la Costa del Pacífico de Mesoamérica en términos de área de drenaje y de descarga (Tamayo, 1964). La cuenca alta de drenaje del río, se compone principalmente de varios valles de clima templado del altiplano, incluyendo los valles de Oaxaca, Ejutla y Nochixtlan (Joyce y Mueller, 1997). Estos valles se encuentran a elevaciones que van desde 1500 hasta 2500 msnm, con

temperaturas medias anuales de 16-20 °C y precipitación media anual de 400 mm a 1000 mm (Goman, *et al.*, 2005).

La cuenca baja se compone enteramente de la costa del río Verde. El clima de la parte baja es cálido y húmedo con una precipitación media anual de 1000-2000 mm y temperaturas medias que van de 25 a 28 °C. El río desciende desde los valles del altiplano a la costa, a través de profundos y estrechos desfiladeros que dejan poco espacio para el almacenamiento de los sedimentos. El gradiente del río muestra un perfil convexo. Estas propiedades hacen que los ambientes geomorfológicos en el valle inferior sean sensibles al aumento de las cargas de sedimentos como resultado de los cambios en el uso del suelo, el clima y la tectónica de las partes altas (Goman, *et al.*, 2005).

Durante la última década, diferentes estudios arqueológicos y geomorfológicos sobre la parte baja del cauce del río Verde han documentado cambios en el paisaje dinámico de la zona y el cauce que terminaron principalmente durante el período Formativo Terminal. El río Verde ha cambiado su morfología serpenteante que lo caracterizaba hace 2000 años a un patrón de flujo trezado como posible resultado de la erosión en las tierras altas. Se cree que el cambio en la morfología del río ha dado lugar a la expansión de la llanura de inundación en el último

tramo caracterizado por su riqueza agrícola. Los datos geomorfológicos y arqueológicos han demostrado que los patrones de asentamiento en la zona se han visto seriamente afectados por estos cambios (Goman, *et al.*, 2005).

METODOLOGÍA

Método de Pb-210

El desarrollo y aplicaciones del plomo-210, como trazador geocronológico están bien documentados desde la década de los 70 (Goldberg, 1963; Oldfield y Appleby, 1983). El plomo-210 es una forma radioactiva natural del plomo, que se encuentra en pequeñas cantidades en la mayoría de los suelos, como parte de la desintegración radioactiva del Uranio-238 (U-238). También se produce en forma natural, por la desintegración radioactiva del gas Radón-222 (Rn-222), que se difunde a la atmósfera con una tasa constante de aproximadamente 42 átomos min⁻¹·cm⁻², y posteriormente se desintegra a través de varios productos de corta vida media hasta generarse el Pb-210 (Figura 1). Este Pb-210 atmosférico vuelve a la litósfera durante precipitaciones o deposición seca, teniendo un tiempo de residencia en la atmósfera entre unos 5 a 10 días. Por consiguiente, existe un exceso de Pb-210 que no se encuentra en equilibrio con el Ra-226, que ha sido generado en la atmósfera e incorporado rápidamente a los sedimentos (Oldfield y Appleby, 1983).

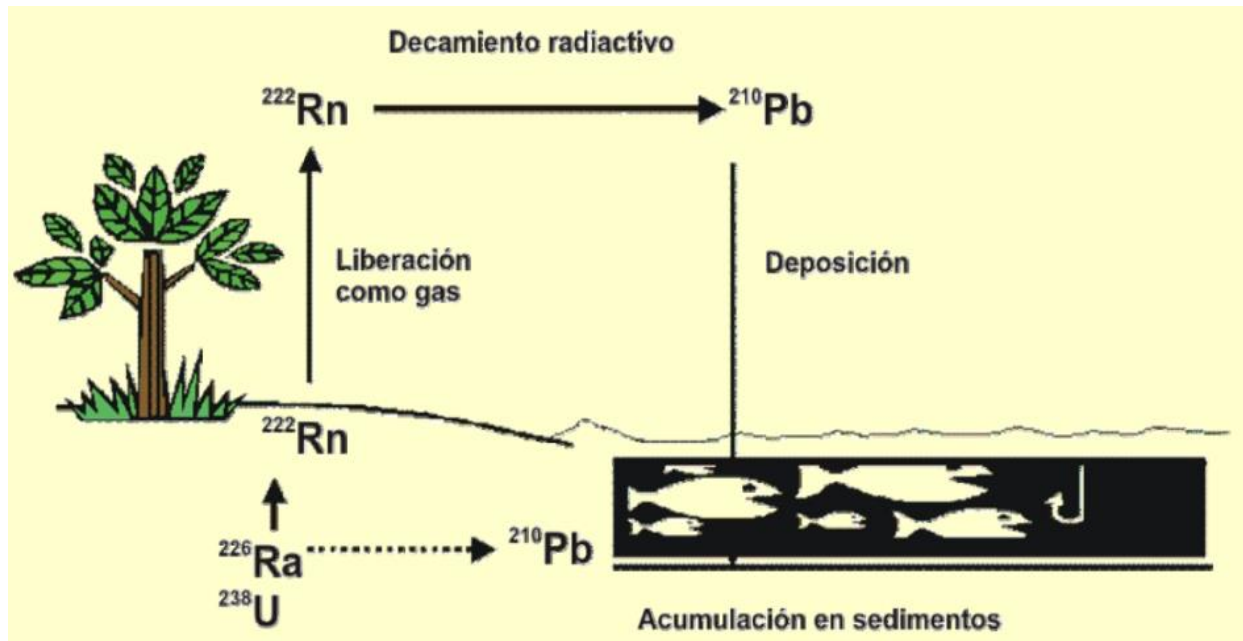


Figura 1. Origen de ²¹⁰Pb en sedimentos (Fuente: MyCore Scientific. 2003).

El Pb-210 es un isótopo natural inestable, con una vida media de 22.26 años. Esta vida media, relativamente corta, permite su utilización en la determinación de la edad absoluta de registros sedimentarios que abarcan los últimos 100 años (Soto *et al.*, 2000; Appleby, 2001; Castro, 2009). Las diminutas cantidades de Pb-210 depositadas constantemente sobre la superficie de la tierra, se mezclan con los sedimentos que se acumulan en los fondos de los sistemas acuáticos. Para una determinada localidad, la disponibilidad de Pb-210 se presenta a un ritmo constante que se deriva de la deposición directa, desde el transporte aguas arriba y de la descomposición de Rn-222 en el agua. El resultado de este proceso es una concentración relativamente alta de Pb-210 en los sedimentos superficiales (Hewitt, 2000).

El método de Pb-210 tiene una mejor respuesta en áreas de deposición tranquilas como tierras pantanosas (Orson, *et al.*, 1992), bahías, lagos (Robbins y Edgington, 1975) y los remansos de los ríos. Sin embargo, el método de Pb-210 se utiliza a menudo en conjunción con el método de Cs-137 en los ríos activos con el fin de obtener máxima información cronológica (Hewitt, 2000).

A causa de la desintegración radioactiva, el exceso de Pb-210 (derivado de la lluvia natural), es generalmente detectable a profundidades que corresponden a 100 años o de mayor edad, ya que ha decaído y la concentración medida representa el nivel de fondo que es característico de los sedimentos. Si una curva logarítmica se ajusta en un perfil completo de Pb-210 desde la superficie hasta el nivel de 100 años, la velocidad de sedimentación se obtiene de la pendiente de la recta que representa un promedio del marco de tiempo. A veces se analizan segmentos más cortos de los perfiles, que conducen a tasas de sedimentación promedio durante períodos cortos de tiempo.

El decaimiento de Pb-210 se traduce en una disminución logarítmica de la concentración de Pb-210 en exceso y de su relación con la profundidad en el caso más simple, donde la tasa de sedimentación y la tasa de Pb-210 son constantes, y los sedimentos de la capa superficial son casi uniformes con sus propiedades físicas e intrínsecas en el contenido de las series-uranio (Hewitt, 2000). El modelo utilizado para el cálculo de tasas de sedimentación y de edades de las distintas capas del sedimento se le denomina Concentración Constante Inicial (C.I.C). Este modelo parte de la hipótesis de la constancia de la concentración inicial en cada capa de sedimento. Si C(0) es la concentración inicial, se puede calcular la edad t_i a partir del valor actual medido C_i en cada capa

i del sedimento (Appleby, 1998) tal y como se presenta en las ecuaciones 1 y 2:

$$C_i = C(0) \exp\{-\gamma t_i\} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Dónde:

γ es la constante de desintegración del Pb-210 $\gamma = \ln \frac{2}{22.23} \text{ años}^{-1}$, y despejando

$$t_i = \left(\frac{1}{\gamma}\right) \ln \left[\frac{C(0)}{C_i}\right] \quad \text{Ecuación (2)}$$

Método de Cs-137

El Cs-137 es uno de los principales componentes de la precipitación radioactiva antropogénica. Ambientalmente, se clasifica dentro del grupo de contaminantes inorgánicos producidos por fisión nuclear (Hewitt, 2000). El Cs-137 fue generado como un subproducto de las pruebas de armas y accidentes nucleares, estando presente en el ambiente desde los primeros ensayos nucleares de 1945. Su distribución global ha estado controlada tanto por las inyecciones estratosféricas del isótopo, como por los patrones de circulación atmosférica. Ambientalmente, las características (i.e., alta energía, comportamiento geoquímico, movilidad en los niveles tróficos y bioacumulación), lo convierten en uno de los radioisótopos más peligrosos para los seres vivos, generando lesiones celulares (i.e., cáncer) y modificaciones genéticas (Olsen *et al.*, 1982).

El Cs-137, es un producto secundario de la generación de energía termonuclear. La deposición se inició alrededor de 1954 y llegó a un máximo en 1963. La determinación de la tasa de sedimentación de este isótopo se basa en encontrar el perfil de actividad Cs-137 que es dominado por un amplio 'pico', que concuerda con la cúspide máxima en 1963, que es cuando el Cs-137 alcanzó su máximo en la atmósfera, y así en el gráfico se determinan los años de acumulación y el período de años de 1963 hasta la fecha de la determinación tal y como se muestra en la figura 2 (Hewitt, 2000).

El Cs-137 es inyectado a la estratósfera, y desciende a la tropósfera principalmente en las latitudes medias y polares. Posteriormente, precipita, en forma húmeda y seca, sobre la superficie terrestre (Olsen *et al.*, 1982). Llega a los ríos por precipitación directa y a través de la escorrentía de la cuenca, la cual erosiona y transporta las partículas de suelo contaminado. Así, en la columna de agua, las partículas con Cs-137, deberían decantar siguiendo un patrón de distribución similar a la precipitación radioactiva.

El método de Cs-137 es fundamentalmente diferente del método Pb-210, ya que considera la fecha con base en dos "marcadores" en lugar de concentración en

picos para su interpretación; estos marcadores son 1954 que es el año en que las concentraciones se consideran detectables y 1963 concentración máxima, por lo tanto, si se detecta Cs-137 a una profundidad dada, la fecha se interpreta como 1954 o después. Por ejemplo, para el cálculo en un perfil muestra en 1995 para un horizonte de Cs-137 cerca de 48 cm de profundidad, el marcador se puede utilizar para la determinación de la tasa de sedimentación de la siguiente manera (48 cm de profundidad) / (41 años que se calculan de la diferencia entre 1954 año de aparición y 1995 año de muestreo) = 1,2 cm/año. Otra manera de calcular dicha tasa de sedimentación es usando la máxima concentración de Cs-137 en el marcador de 1963, en que fue alrededor de 37 cm, de esta manera la tasa de sedimentación se calcula de la siguiente manera (37 cm de profundidad) / (32 años de diferencia entre 1963 y 1995) = 1,2 cm / año (Hewitt, 2000).

Muestreo núcleos de sedimento

Se tomaron dos núcleos de sedimentos ubicados en dos puntos sobre la corriente del río Verde, Oaxaca (ver figura 3 y tabla 1). El punto de mayor elevación corresponde a una zona donde se aprecia un cambio en la dirección del río, mientras que el de menor elevación corresponde a una zona recta. Las columnas de los sedimentos se muestrearon en los bancos de material

depositados en las márgenes del río. Durante el muestreo, la velocidad del río era del orden de 0.7 m/s y 0.5 m/s, aguas arriba y aguas abajo respectivamente, con un tirante de agua de 0.50 m para ambos sitios. Para el muestreo se utilizó un dispositivo plástico cilíndrico de 0.80 m de longitud y 0.12 m de diámetro. Las muestras se separaron *in situ* cada 0.025 m y se conservaron con hielo durante su transportación. Subsiguientemente se almacenaron por 30 días a 4 °C (período de estabilización) hasta su preparación en el laboratorio y su posterior análisis.

De los núcleos de sedimentos muestreados en la corriente del río Verde se obtuvieron 19 muestras del punto 1 denominado Puente Río Verde y 22 muestras del punto 2 denominado La Huichicata, correspondientes a las distintas profundidades de cada uno de los núcleos. Las muestras de cada uno se etiquetaron y se secaron en una estufa de laboratorio durante 24 horas a 110 °C. Después se molieron, tamizaron y envasaron en recipientes de plástico perfectamente limpios. Las muestras preparadas se almacenaron durante 30 días para que se estableciera el equilibrio radioactivo y los descendientes de vida media corta de este último. Finalmente, las muestras de sedimento se analizaron por espectrometría de rayos gamma para su posterior análisis en el laboratorio Core Scientific International en Winnipeg Canadá.

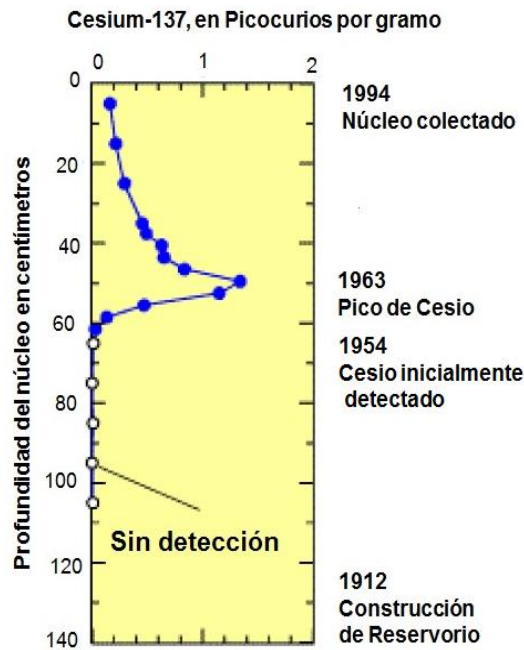


Figura 2. Perfil característico de Cesium-137 en un núcleo de sedimento.

Tabla 1. Coordenadas de los puntos de muestreo de los núcleos de sedimentos.

Sitios de toma de muestras	Descripción	Ubicación
Sitio 1	Abajo del Puente Río Verde	N 16°09' 25 W 97° 44' 25
Sitio 2	La Huichicata (adelante del puente el Zanate)	N 16°14' 13 W 97° 40' 05

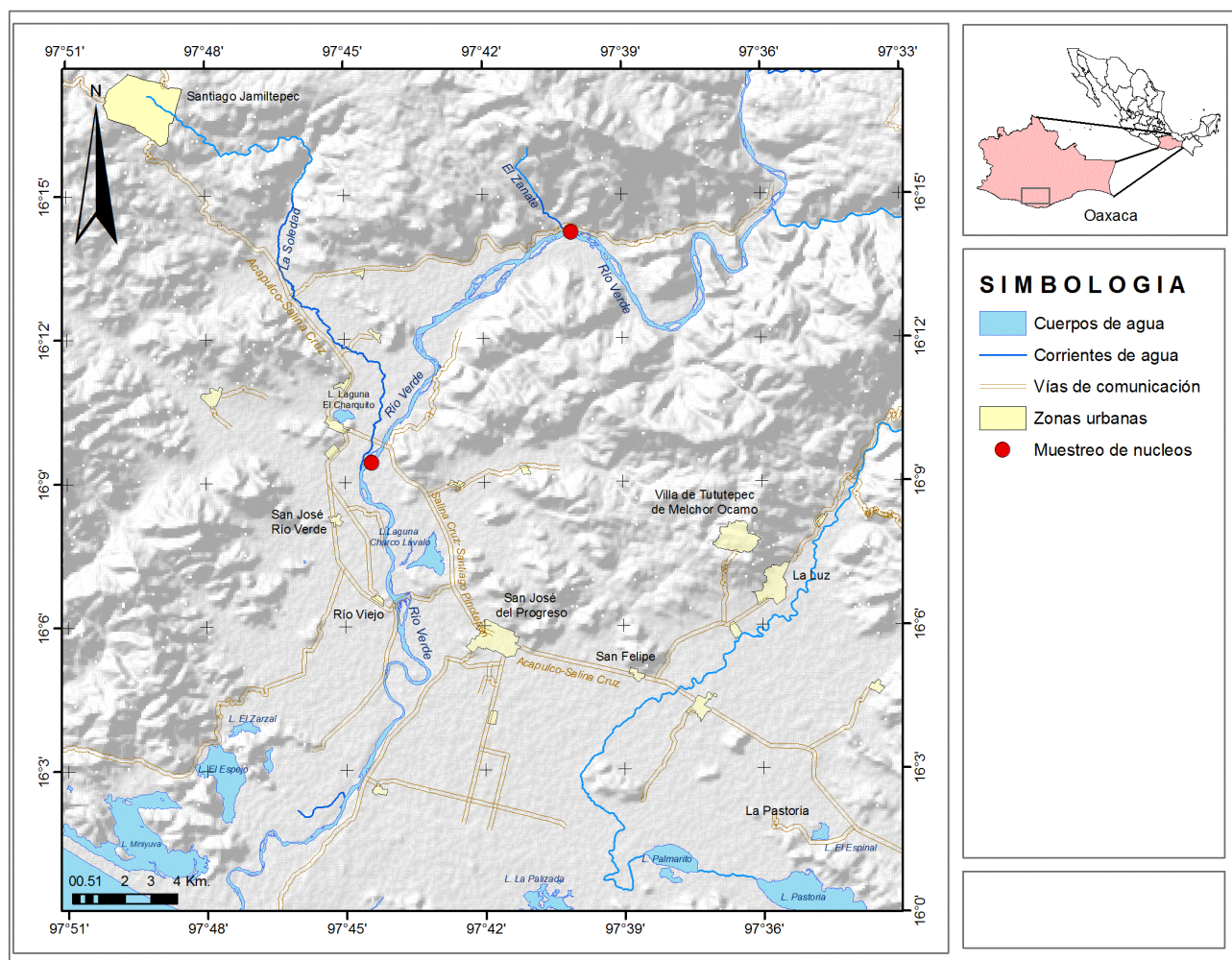


Figura 3. Ubicación de sitios de toma de muestra de núcleos.

RESULTADOS

Concentración de Pb-210

Los resultados de la concentración del radioisótopo en los dos testigos colectados se representan en gráficas de concentración versus profundidad (Figura 4). De manera general se puede observar que la concentración

tiende a disminuir en profundidad; este indicador de decaimiento es una herramienta de valoración inicial de los resultados para la valoración de la concentración de Pb-210 en los núcleos colectados, para su posterior selección o exclusión, ya que si presenta alteraciones, esta valoración no sería apta para el cálculo de la tasa

de sedimentación, pero en este caso no se presentó esta situación.

Los resultados obtenidos concuerdan con los eventos hidrológicos naturales y antropogénicos registrados en la zona. Aguas abajo del sitio 2 (aproximadamente 1 km) se construyó una presa derivadora en el año 1992, lo cual provocó un incremento en el nivel del agua por el remanso que se produce y que a su vez favorece la sedimentación en el sitio. Además en este sitio, el patrón del río es anastomosado con dos o más canales trenzados, lo que indica que la carga de sedimentos es mayor que la que puede transportar un río similar durante los flujos normales. Esto explica la variabilidad de la curva de Plomo-210 (Figura 4) debido al incremento de las cargas de sedimento tanto por causas naturales como antropogénicas (a partir de 1992).

Determinación de la tasa de sedimentación Pb-210

Para el cálculo de la tasa de sedimentación en cada punto, se consideró como primera aproximación el suponer que la tasa se mantiene constante durante todo el tiempo de acumulación del sedimento, para lo cual se utiliza el modelo C.I.C. (*Constant Initial Concentration*). Teniendo en cuenta que en este modelo se supone un aporte constante de Pb-210 y una tasa de sedimentación también constante, el Pb-210 en exceso en cada una de las capas del sedimento debe relacionarse con la profundidad. Esta relación expresa que la concentración en exceso de plomo disminuye exponencialmente con la profundidad debido a la desintegración radiactiva, al ser cada profundidad una medida del tiempo transcurrido desde la formación de la capa hasta la actualidad; lo anterior se puede expresar matemáticamente si en la ecuación 1 se reemplaza $t=z/a$, resultando:

$$C(Pb) = C0 \exp\{-\gamma z/a\} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Dónde: γ es la constante de desintegración del Pb-210, z es la profundidad promedio de cada capa y a es la

tasa de sedimentación. En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos con este modelo.

A partir de la tasa de sedimentación en el sitio 1 se obtiene una velocidad de sedimentación de 0.69 cm/año, mientras que el sitio 2 presenta una tasa de sedimentación de 0.89 cm/año

Determinación de la tasa de sedimentación Cs-137

Los resultados de los isótopos muestran una banda muy amplia (Figura 5). Se observa que la primera ocurrencia de Cs-137 en el sitio 1 se presenta entre los 40 y 47 cm de profundidad en el perfil de sedimentos mientras que la actividad máxima fue detectada entre los 20 y 30 cm de profundidad. Esto significa que la primera ocurrencia de Cs en 1954 (± 2 años) corresponde a una profundidad aproximada de 45 cm, mientras que el máximo de deposición de Cs en 1963, corresponde a 27.5 cm de profundidad. Para el sitio 1, considerando la actividad máxima a 27.5 cm, la diferencia en años de 1963 a 2008 (año de muestreo) es de 45 años, así, se obtiene una tasa de sedimentación de 0.61 cm/año. Considerando el marcador de 1954 y la diferencia en años 1954 a 2008 y su aparición en este año fue a los 45 cm, la tasa de sedimentación sería de 0.83 cm/año.

En el caso del sitio 2, se observa que la primera ocurrencia de Cs-137 se presenta entre 40 y 52 cm de profundidad, mientras que la actividad máxima fue detectada 25 y 35 cm de profundidad. Esto significa que la primera ocurrencia de Cs en 1954 (± 2 años) corresponde a una profundidad aproximadamente de 47.5 cm (figura 5), mientras que el máximo de deposición de Cs-137 en 1963, corresponde a 25 cm de profundidad, con esta información se tiene una tasa de sedimentación para este sitio de 0.55 cm/año, para el sitio 2 considerando el marcador de 1963 y su aparición en este año que fue a los 47.5 cm, la tasa de sedimentación sería de 0.87 cm/año, verificando ampliamente en ambos casos los rangos obtenidos con el método de Pb-210.

Tabla 2. Resultados del cálculo de la tasa de sedimentación

Sitio	C (Pb)	Tasa de sedimentación
1	$95.095 \exp\{-0.045 z\}$ R =0.96	$a = \ln 2 / \gamma .045 = 0.69$ cm/año
2	$241.11 \exp\{-0.0347 z\}$ R = 0.85	$a = \ln 2 / \gamma .0347 = 0.89$ cm/año

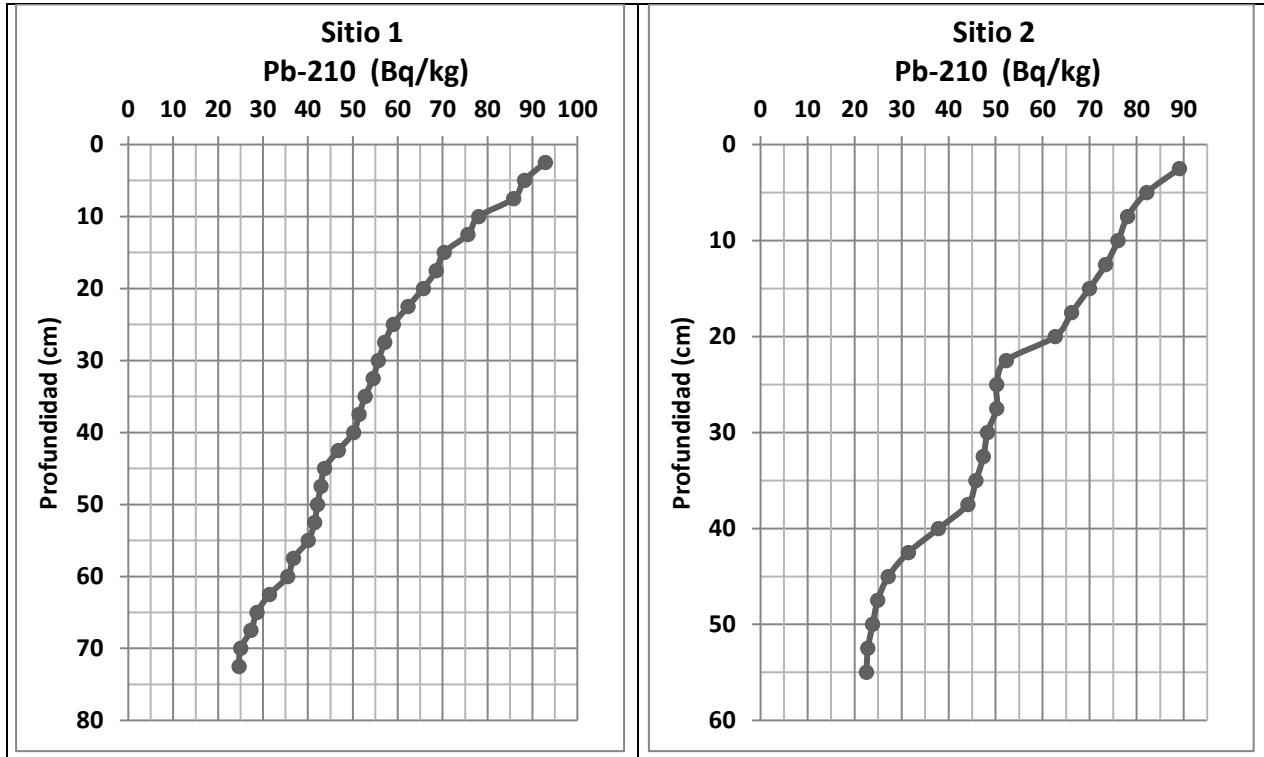


Figura 4. Actividad de ^{210}Pb total en los sitios muestreados.

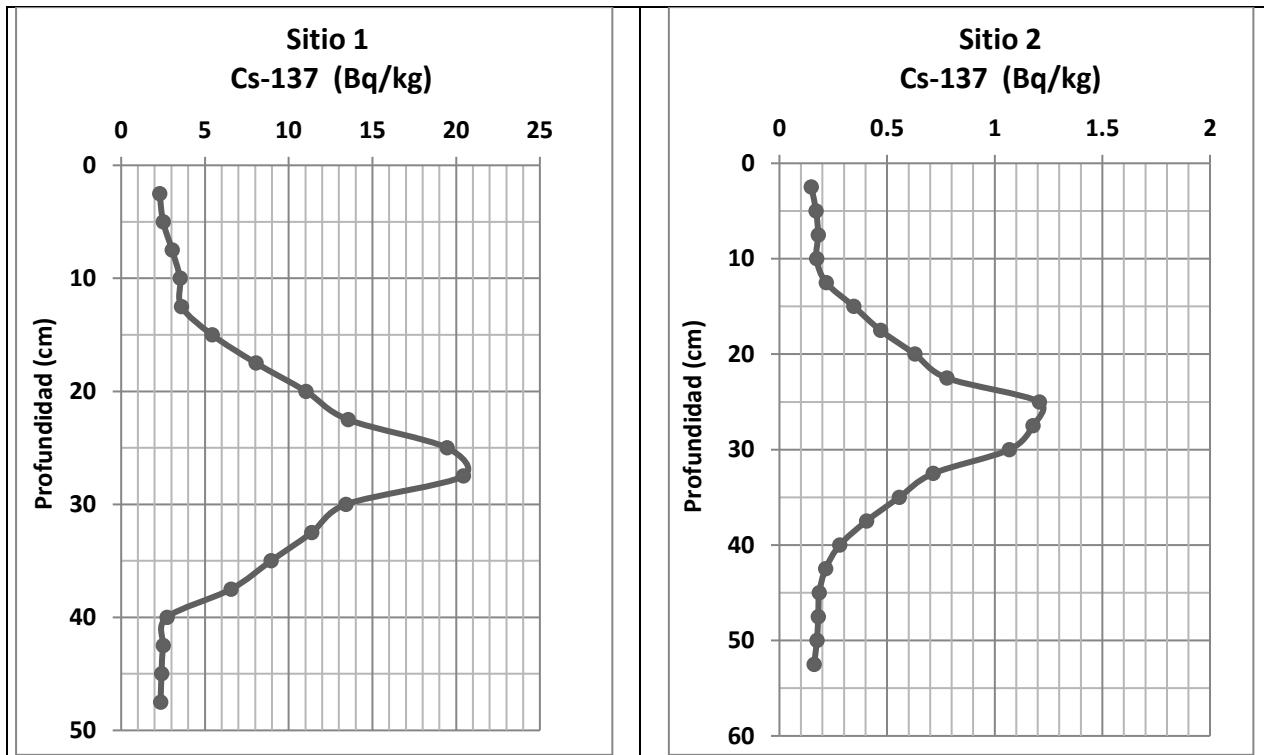


Figura 5. Actividad de ^{137}Cs total en los sitios muestreados.

DISCUSIÓN

La velocidad de sedimentación en el Río Verde obtenida por medio del isótopo Pb-210 es 0.69 y 0.89 cm/año. Por otro lado, la velocidad de sedimentación determinada mediante el isótopo Cs-137 es del orden de 0.61 cm/año y 0.87 cm/año. Las tasas de sedimentación obtenidas tanto por el método de Cs-137 como de Pb-210 son del mismo orden, lo cual da certeza de la validez de los resultados obtenidos en este estudio.

Existe una correlación directa de los eventos de mayor depósito de material así como la mezcla de material reciente con material más antiguo que se confirma con la presentación de los dos pulsos en los años 23 y 50 aproximadamente, lo que da como resultado una edad global aparentemente más reciente para los sedimentos identificados.

Los cálculos de la velocidad de depositación muestran que existe una mayor velocidad en el sitio 2 que está aguas arriba, debido a que existe una mayor cantidad de material que está compuesto por arenas, las cuales no pueden viajar con la misma facilidad que las arcillas.

Combinando métodos isotópicos con granulometría detallada se pueden identificar eventos que afectaron los depósitos del río, por ejemplo, avenidas, derrumbes provocados por terremotos, entre otros. Por ejemplo, en este estudio se identificaron dos eventos de mayor depositación hacia los años 1961 y 1990. El pico de actividad máxima para Cs-137 identificado en la zona de estudio confirma su aplicabilidad para estas latitudes.

REFERENCIAS

Appleby, P.G., Oldfield F. (1978). The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported Pb-210 to the sediment. *Catena*, vol. 5, 1-8.

Appleby, P.G. (1998): Dating recent sediments by Pb-210: problems and solutions. *STUK*, Helsinki, 5-24.

Castro Mojica M. (2009). "Cálculo de la sedimentación reciente en la planicie de inundación del río Beni mediante el uso del radioisótopo atmosférico 210 Pb". Tesis de licenciatura. UMSA Universidad Mayor de San Andrés, La Paz (Bolivia).

Czajka – Kaczka, A. 2002. The rate of sedimentation on regulated river floodplains: the upper Vistula and the upper Odra rivers, southern Poland. In *Palaeofloods, Historical Floods and Climatic Variability: Application in Flood Risk Assessment*. Cap 11. Proceedings of the PHEFRA Workshop, Barcelona, 2002). 73-78

Goman, M., Joyce A., Mueller R. (2005). Stratigraphic Evidence for Anthropogenically Induced Coastal Environmental Change from Oaxaca, Mexico. *Quaternary Research*, vol. 63, 250-260.

Goslar T., Ganowicz M., Czernik J., Sikorski J. (2000). First measurements of natural activities of ²¹⁰Pb in the Institute of Physics, Silesian University of Technology. *Geochronometria*. vol. 18, 29-34.

Los resultados obtenidos en este estudio indican que para El Río Verde, la dinámica del río ha permitido un depósito de material en los últimos 70 años en el cauce actual.

CONCLUSIONES

Aplicando métodos isotópicos se determinó la velocidad de sedimentación en el río Verde la cual es de 0.69 a 0.89 cm/año. En este estudio se identificaron dos eventos de mayor depositación hacia los años 1961 y 1990.

El modelo C.I.C. (Constant Initial Concentration) utilizado para el cálculo de la tasa de sedimentación con el trazador Pb-210, presentó un perfil claro de la disminución de la actividad con la profundidad, fortaleciendo su hipótesis que supone un aporte constante de Pb-210 y una tasa de sedimentación también constante.

Combinando métodos isotópicos con mediciones de batimetrías y granulometrías del río se pueden identificar eventos que afectaron los depósitos de sedimento como por ejemplo; avenidas, derrumbes provocados por sismos, entre otros.

El estudio realizado sobre el río Verde, permite conocer la dinámica de los procesos de transporte de sedimentos en la zona, información que resulta útil para la planeación de obras hidráulicas y que permite estimar los posibles impactos ambientales, así como la implementación de las medidas de mitigación correspondientes.

Humphries M. S., Kindness A., Elleryb W. N., Hughesb J. C., Benitez-Nelson C. R. (2010). ^{137}Cs and ^{210}Pb derived sediment accumulation rates and their role in the long-term development of the Mkuze River floodplain, South Africa. *Geomorphology*. Vol. 119, Issues 1–2, 88–96.

Joyce A., Mueller R. (1997). Prehispanic human ecology of the Río Verde drainage basin, Oaxaca, Mexico. *World Archaeology*. 729, 75–94.

Kotarba A., Lokas E., Wachniew P. (2002). ^{210}Pb D ating of young Holocene sediments in high-mountains lakes of the Tatra Mountains. *Geochronometria*. vol. 21, 73-77.

MyCore Scientific. 2003. 226Ra-210Pb Separation. <http://www.mycore.ca/226Ra-210Pb%20Separation.htm>.

Olsen, C.R.; Cutshall, N.H.; Larsen, I.L. (1982). Pollutant-particle associations and dynamics in coastal marine environments: a review. *Marine Chemistry*, vol. 11, 501-533.

Saxena D. P., Joss P., Van Grieken R., Subramanian V. (2002). Sedimentation rate of floodplain sediments of the Yamuna river basin (tributary of the Ganges, India) by using ^{210}P , no.3 b and ^{137}Cs techniques. *Journal of Radioanalytical and Nuclear chemistry*. 251, vol.3, 399-408.

Smith J.N., 2001: Why should we believe ^{210}Pb sediment geochronologies?. *Journal of Environmental Radioactivity*. vol. 55, 121-123.

Soto J., Gómez J., Díaz O., Golen A. (2000). Estudio de tasas de Sedimentación y Datación de sedimentos en la Bahía de Santander (España). *Revista Cubana de Física*; 2000, 30-35.

Tamayo J.L. (1964). The hydrography of Middle America. In: West, R.C. (Ed.), *Handbook of Middle American Indians. Natural Environments and Early Cultures*, University of Texas Press, Austin, vol. 1. 84– 121.

Tylmann W., 2003: Reliability of dating recent lake sediments on the example of a small and shallow reservoir (Pusty Staw, N Poland). *Limnological Review*. vol. 3, 255-260.

Tyman W. (2004). Estimating recent sedimentation rates using ^{210}Pb on the example of morphologically complex Lake (Upper Lake Radunskie, N Poland). *Geochronometria*. Vol. 23, 21-26.

Este documento debe citarse como: González Verdugo J. A., Salcedo Sánchez Edith R., Espinoza Ayala M. J., Martínez Morales M. (2015). **Datación de sedimentos recientes utilizando isótopos radioactivos en el río Verde, en el estado de Oaxaca, México**. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 19-3, pp. 138-145, ISSN 1665-529-X.