

# Calibración de un sistema de espectrometría gamma en configuración pozo para muestras de sedimentos acuáticos

Tesis de grado  
que para optar por el grado de:  
**Maestro en Ciencias (Físicas)**

Presenta:

**Félix Ernesto Charry Pastrana**

Tutor principal:

**Dr. Joan Albert Sánchez Cabeza**

Miembros del Comité Tutor

**Dr. Efraín Rafael Chávez Lomeli**

**Dra. Libertad Barrón Palos**

Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad de México, 19 de junio de 2019

## Importancia del fechado de núcleos sedimentarios acuáticos

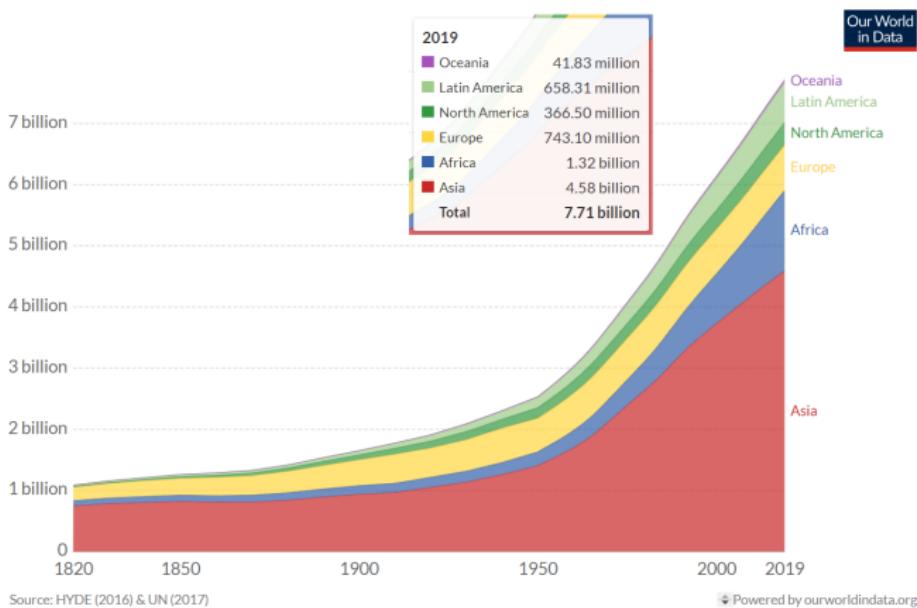
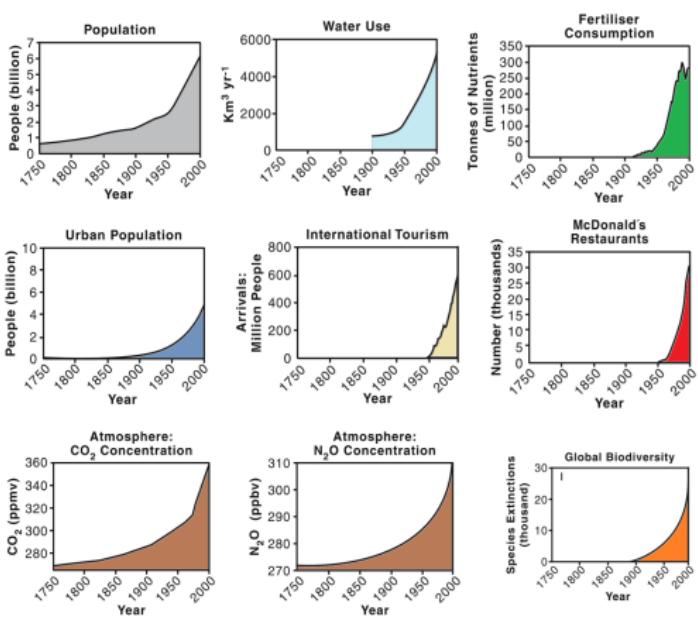


Figura: Población mundial por regiones<sup>1</sup>

7.710'000.000 de personas

<sup>1</sup>World Population Growth, Max Roser et. al., última revisión mayo 2019

## Importancia del fechado de núcleos sedimentarios acuáticos



## Figura: Actividades humanas y cambios a escala global<sup>2</sup>

## ¡Cambio Global y Climático!

<sup>1</sup> Global Change and the Earth System. A Planet Under Pressure. W. Steffen et. al., 2004

## Importancia del fechado de núcleos sedimentarios acuáticos

El **Cambio Global** es el conjunto de *cambios* observados de manera sistemática y a escala planetaria debido a **actividades antropogénicas**<sup>1</sup>.

Estos cambios quedan registrados en observatorios (\$\$\$) y archivos ambientales.

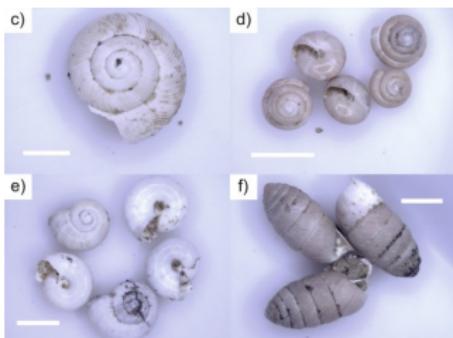


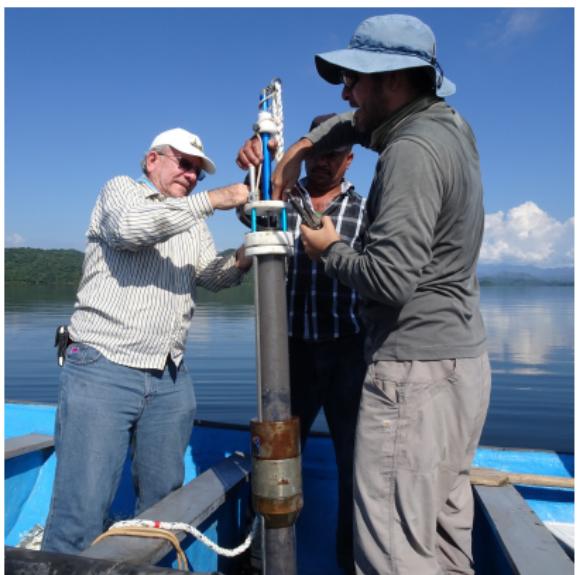
Figura: Archivos ambientales: moluscos<sup>2</sup>, árboles<sup>3</sup> y núcleos sedimentarios.

<sup>1</sup> *Beyond Global Warming: Ecology and Global Change*, Vitousek, 1994

<sup>2</sup>G. Újvária Újvária et. al., Quaternary Geochronology, 2016

<sup>3</sup>K. Haneca et. al., Journal of Archaeological Science, 2009

## Núcleos sedimentarios



**Figura:** Muestreo de un núcleo sedimentario en un ambiente lacustre.

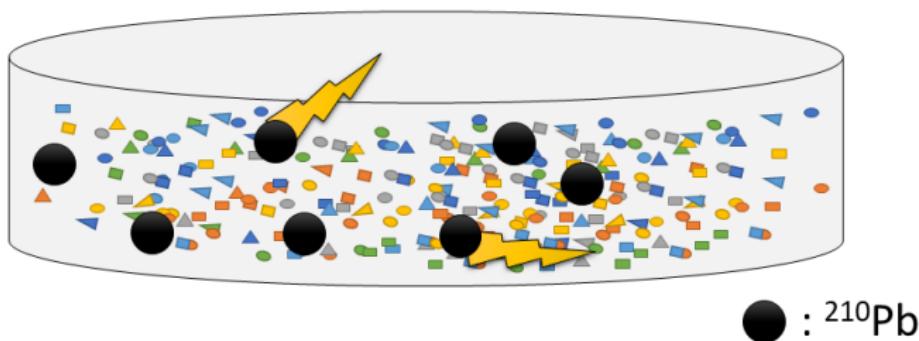
Para el estudio del Cambio Global se utilizan habitualmente núcleos sedimentarios porque:

- son concentradores de muchas de las substancias presentes en los sistemas acuáticos (por ejemplo, la mayor parte de los contaminantes), y
  - son relativamente fáciles de colectar y analizar.

Para diagnosticar, evaluar y predecir se necesita un **marco temporal**.

## Hipótesis y problema

El **marco temporal** de los núcleos sedimentarios se establece con la **cantidad de  $^{210}\text{Pb}$**  presente en el sedimento.



La cuantificación de  $^{210}\text{Pb}$  ( $A$ ) depende de su composición (autoabsorción).

El fechado depende de  $A$ , y  $A$  depende de la composición.

## Hipótesis:



Si se conoce la composición elemental

→ se determina mejor  $^{210}\text{Pb}$

→ fechados de mayor calidad.

## Hipótesis y problema

El **problema** es que la mayoría de los laboratorios que realizan el fechado con  $^{210}\text{Pb}$  **asumen una composición elemental constante**.

¿La composición **cambia** con el tiempo?

¿Todos los mares, humedales o lagos son iguales?



**Figura:** Recolección manual de un núcleo sedimentario<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Radiocronología de sedimentos costeros utilizando  $^{210}\text{Pb}$ : modelos, validación y aplicaciones, Sanchez-Cabeza et. al., 2012.

## Objetivo general



El objetivo general es **mejorar la cuantificación** de los radionúclidos utilizados en el fechado de sedimentos recientes ( $^{210}\text{Pb}$  y  $^{214}\text{Pb}$ ) a través de **correcciones de densidad y composición**.

El objetivo no es realizar la calibración de un sistema de espectrometría gamma ni fechar núcleos sedimentarios.

## Actividad de un núcleo radiactivo

La actividad  $A$  de un radionúclido es el número de desintegraciones nucleares por unidad de tiempo  $t$  y es proporcional a la cantidad de átomos radiactivos  $N$  presentes en la muestra

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N, \quad \lambda = \frac{\ln(2)}{T_{\frac{1}{2}}}, \quad (1)$$

donde  $T_{\frac{1}{2}}$  es el tiempo en el cual la actividad de un radionúclido decrece a la mitad de su valor original.

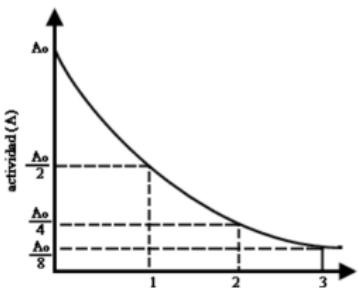
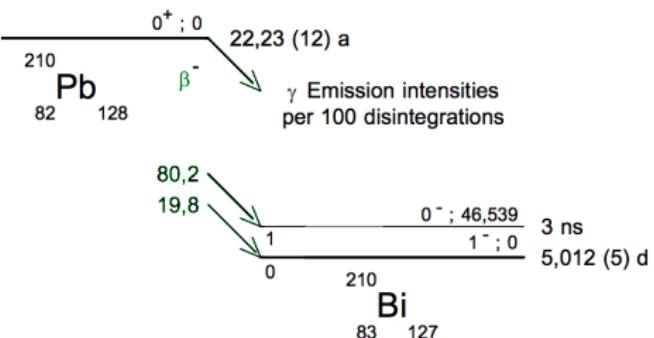


Figura: Comportamiento exponencial del decadimento radiactivo.

- (1)  $^{238}\text{U}$   $4.468 \times 10^9$  y  
↓
- (6)  $^{226}\text{Ra}$  1600 y  
↓ $\alpha$
- (7)  $^{222}\text{Rn}$  3.8232 d  
↓ $\alpha$
- (8)  $^{218}\text{Po}$  3.094 m  
↓ $\alpha$
- (9)  $^{214}\text{Pb}$  26.8 m  
↓
- (12)  $^{210}\text{Pb}$  22.3 y  
↓ $\beta$
- (13)  $^{210}\text{Bi}$  5.013 d  
↓
- $^{206}\text{Pb STABLE}$**

Figura: Serie de  $^{238}\text{U}^1$ .  
desintegración !  
Equilibrio Secular !

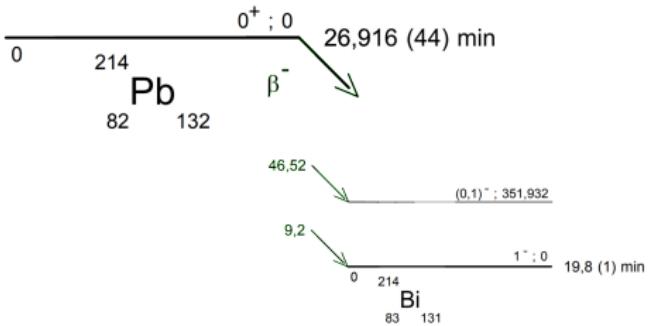
$^{210}\text{Pb}$  γ  $^{214}\text{Pb}$



**Figura:** Esquema de desintegración de  $^{210}\text{Pb}^1$ .

$$T_{\frac{1}{2}}(^{210}\text{Pb}) = 22,23(12) \text{ años},$$

$$E(^{210}\text{Pb}) = 46,534 \text{ keV},$$



**Figura:** Esquema de desintegración de  $^{214}\text{Pb}^1$ .

$$T_{\frac{1}{2}}(^{214}\text{Pb}) = 26,916(44) \text{ minutos.} \quad (2)$$

$$E(^{214}\text{Pb}) = 351,932 \text{ keV.} \quad (3)$$

<sup>1</sup>Data Decay Evaluation Project. [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/DDEPdata.htm](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm)

## Ciclo de $^{210}\text{Pb}$ en ecosistemas acuáticos

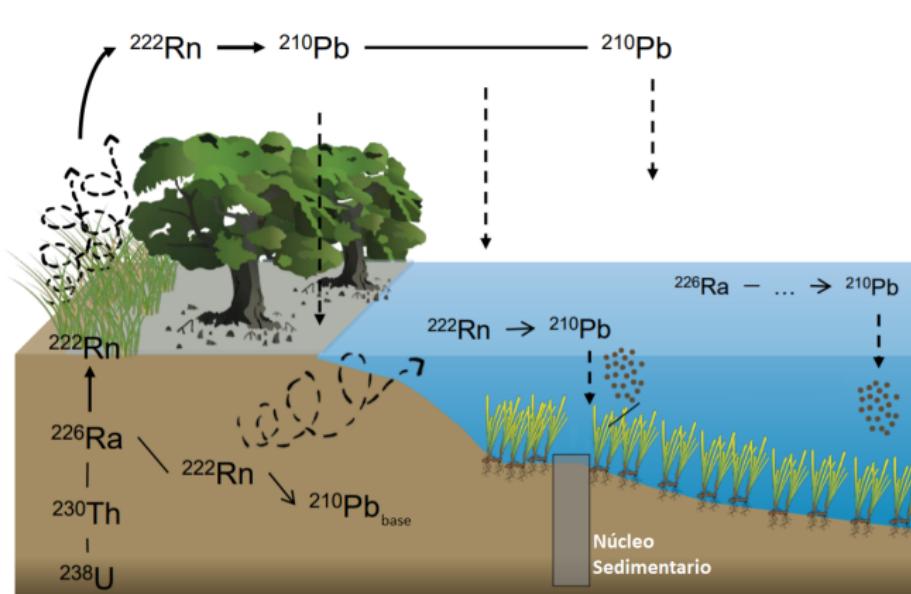


Figura: Ciclo de  $^{210}\text{Pb}$  en un sistema costero<sup>1</sup>.

$$^{210}\text{Pb}_{\text{total}} = ^{210}\text{Pb}_{\text{base}} + ^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} \quad (4)$$

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  es  $^{210}\text{Pb}$  generado en la atmósfera y en los cuerpos de agua.

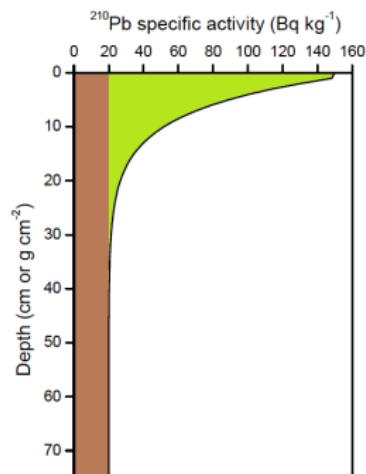
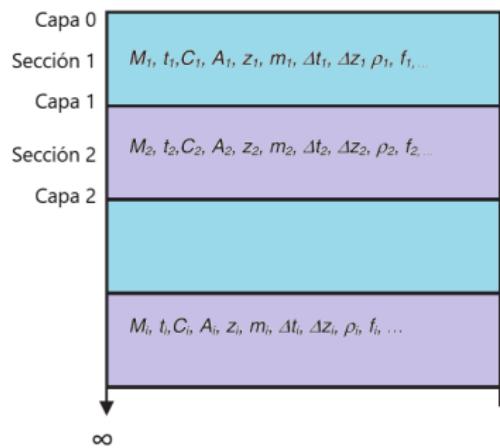


Figura: Perfil ideal de actividad específica de  $^{210}\text{Pb}$ <sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Arias-Ortiz et al., Biogeosciences, 15(22):6791–6818, 2018

## Fechado de núcleos sedimentarios

El **modelo** utilizado asume que el flujo de  $^{210}\text{Pb}$  es constante.



Sea

- $A_i$ : Actividad específica de  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  de la sección  $i$ -ésima,
- $m_i$ : profundidad másica promedio de la sección  $i$ -ésima.

Entonces el fechado de la capa  $i$ -ésima es

$$t(i) = \frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{\sum_{j=1}^{\infty} A_j m_j}{\sum_{j=i+1}^{\infty} A_j m_j} \right). \quad (5)$$

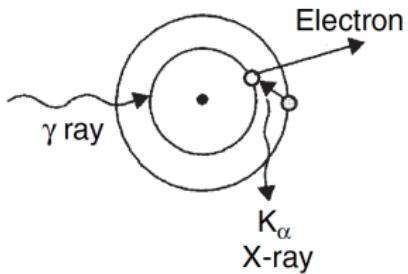
**Figura:** Sección y capas de corte para el fechado de un núcleo sedimentario<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Sanchez-Cabeza y Ruiz-Fernández, Geochimica et Cosmochimica Acta, 82:183–200, 2012.

## Interacción de la radiación con la materia

Los canales de interacción entre los rayos gamma y la materia **dependen de la energía de la radiación incidente**.

### Efecto fotoeléctrico



### Efecto Compton

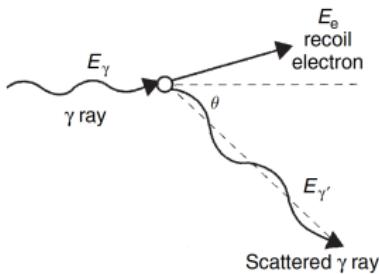


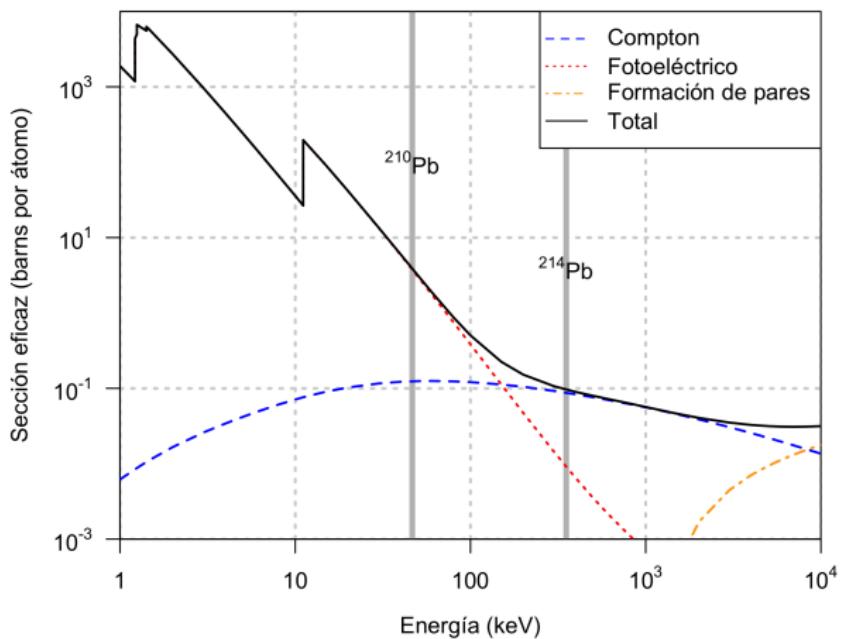
Figura: Mecanismo del efecto fotoeléctrico<sup>1</sup>.

Figura: Mecanismo del efecto Compton<sup>1</sup>.

Para  $E > 1,022 \text{ MeV}$ , existe la probabilidad del proceso **Formación de Pares**.

<sup>1</sup>Gilmore, G., *Practical gamma-ray spectrometry*, Wiley, 2008.

## Sección eficaz total



La sección eficaz total  $\sigma_{\text{total}}$  es

$$\sigma_{\text{total}} = \sum_i \sigma_i. \quad (6)$$

La interacción de la radiación con la materia se cuantifica a través del **coeficiente másico de atenuación**  $\frac{\mu}{\rho}$

¡Incluye la densidad!

Figura: Sección eficaz total y parcial (fotoeléctrico, Compton y Formación de pares) de fotones sobre germanio.

## Detectores de germanio hiper puro en configuración de pozo

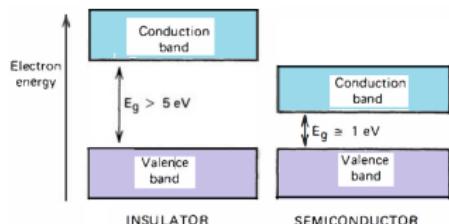


Figura: Estructura de bandas para las energías electrónicas en aislantes y semiconductores<sup>1</sup>.

- Densidad elevada en comparación con detectores gaseosos.
- Los detectores de Ge son ampliamente utilizados en física nuclear y necesitan refrigeración debido a su banda de energía prohibida tan pequeña (0.66 eV).
- \* Proporcionan un ángulo sólido cercano a  $4\pi$ .
- \* La eficiencia adquiere su valor máximo en la parte inferior del pozo.

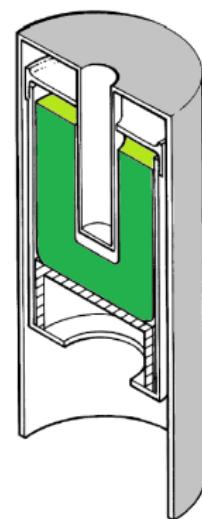


Figura: Vista isométrica simplificada de un detector de Ge en configuración de pozo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Radiation Detection and Measurement*, G. F. Knoll, 2010.

<sup>2</sup> ORTEC, GWL Series Coaxial HPGe Detector Product Configuration Guide, 2006.

## Sistema de espectrometría gamma



Figura: Sistema de espectrometría de rayos gamma.

- Detectores de germanio hiper-puro tipo pozo, marca ORTEC y modelos GWL-120-15-5, GWL-120-15-LB-AWT, GWL-150-15-LB-AWT.
- Blindaje pasivo cilíndrico con  $\sim 10$  cm de plomo de bajo fondo y dos capas de Cu y Sn.
- Sistema de refrigeración equipo MÖBIUS Recycler, ORTEC.
- Electrónica asociada: DSPEC jr 2.0, ORTEC.

## Eficiencia

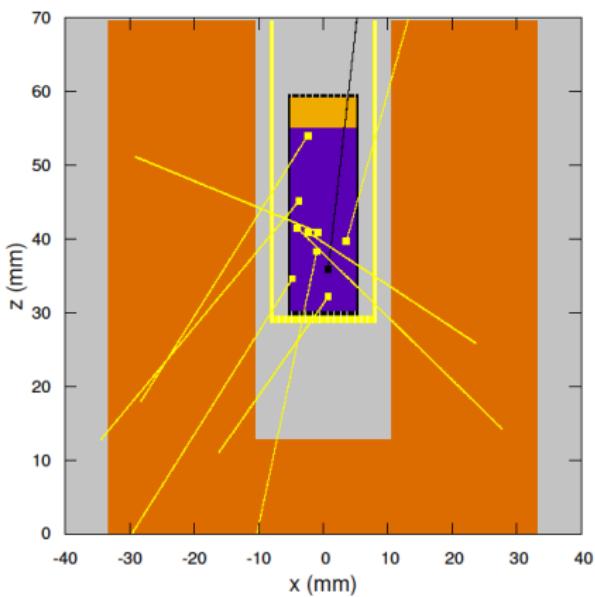
$$\epsilon = \frac{\text{Números de eventos registrados}}{\text{Número de eventos emitidos}}, \quad (7)$$

$$\epsilon(E) = \epsilon_{\text{intríseca}}(E) \cdot \epsilon(\Omega) \cdot \text{TCSC} \cdot \eta(E), \quad (8)$$

donde  $\eta(E)$  : factor de autoabsorción.

La actividad  $A$  de un radionúclido se determina mediante la ecuación<sup>1</sup>

$$A = \frac{N(E) - B(E)}{\epsilon(E) f_\gamma(E) t} \propto \frac{1}{\epsilon(E)} \quad (9)$$



Las correcciones en la  $\epsilon$  afecta directamente a  $A$ .

<sup>1</sup>Olivares et al., Applied Radiation and Isotopes, 130:34 – 42, 2017.

## Calibraciones

Se utiliza una **solución acuosa patrón de emisores gamma** y un material de referencia **Uranio - Torio ORE DL1a** para realizar las calibraciones.

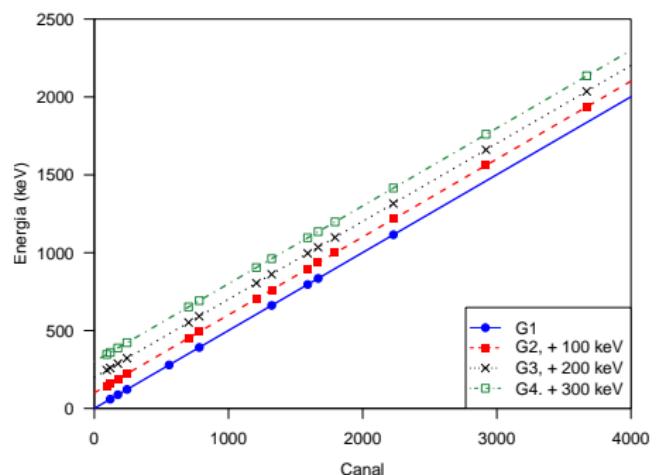


Figura: Calibración canal-energía para los sistemas de espectrometría de rayos gamma.

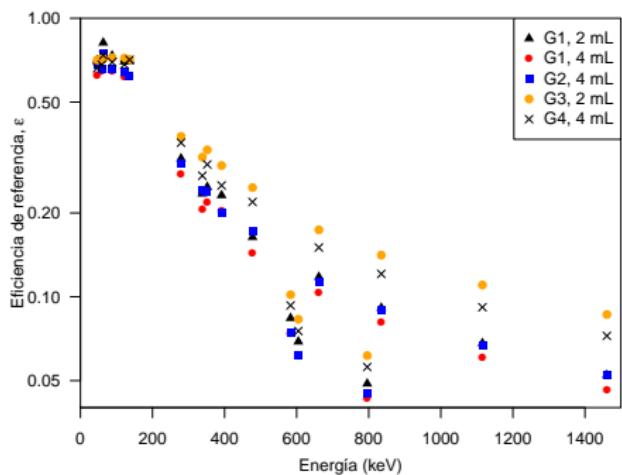
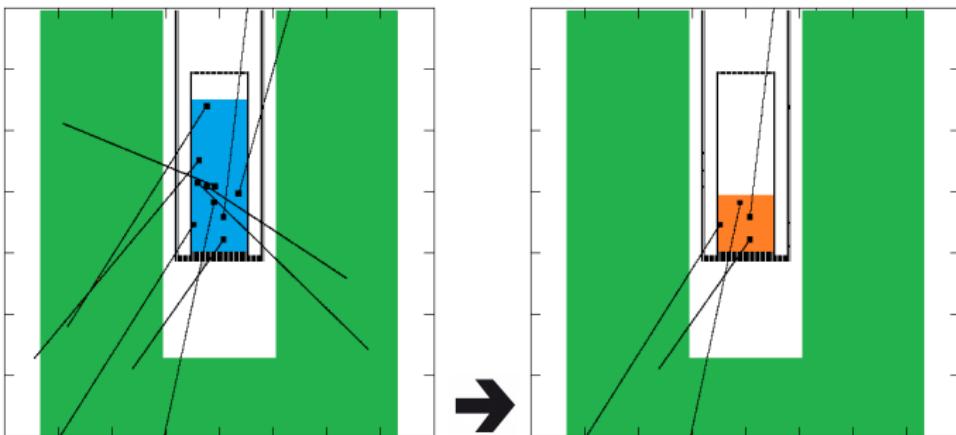


Figura: Eficiencia de referencia para diferentes detectores y geometrías (2 mL y 4 mL) del LGIG.

## Función de transferencia



Eficiencia y composición  
de referencia



Eficiencia para una composición  
y geometría diferente

$$\epsilon = \frac{\overline{\Omega}}{\overline{\Omega}_{\text{referencia}}} \epsilon_{\text{referencia}}, \quad (10)$$

## Función de transferencia

ANGLE permite el cálculo de la eficiencia  $\epsilon$  mediante **funciones de transferencia**,

$$\epsilon = \frac{\bar{\Omega}}{\bar{\Omega}_{\text{referencia}}} \epsilon_{\text{referencia}}, \quad (11)$$

partiendo de una eficiencia de referencia  $\epsilon_{\text{referencia}}$ , donde

$$\bar{\Omega} = \int_{V_S, S_D} F_{\text{atenuación}} F_{\text{efectivo}} \frac{\vec{TP} \cdot \hat{n}}{|\vec{TP}|^3} d\sigma. \quad (12)$$

$F_{\text{atenuación}}$  se relaciona con  $\frac{\mu}{\rho}$ .



¡Es necesario definir el **100 %** de las composiciones!

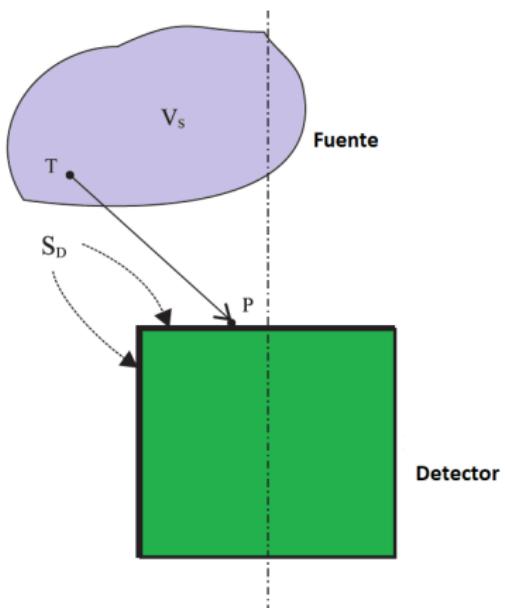


Figura: Variables involucradas en el cálculo de  $\bar{\Omega}$ .

## Análisis elemental: espectrometría de fluorescencia de rayos X, XRF

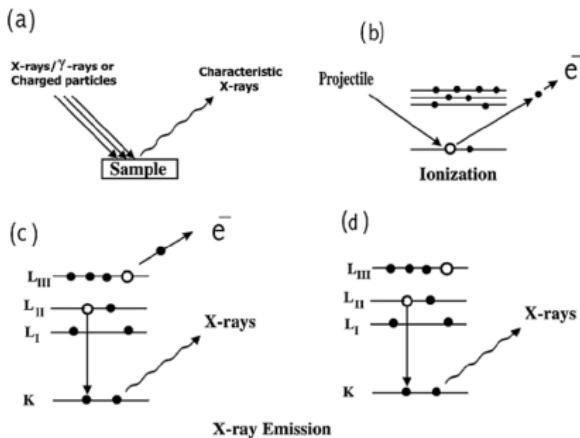


Figura: Representación esquemática de la emisión de rayos X<sup>1</sup>.

En el LGIG se mide la concentración elemental para  $Z > 10$ .

La cantidad de masa requerida es de 2 a 4 g.



Figura: Vista superior equipo de fluorescencia de rayos X, *SPECTRO XEPOS III*, del LGIG.

## Análisis elemental: carbono y nitrógeno, C-N

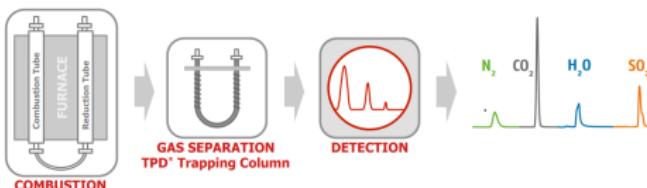


Figura: Procedimientos para el análisis C-N: combustión, separación de gases y detección<sup>1</sup>.

La medición se realiza mediante cromatografía de gases y un detector de termoconductividad.

La cantidad de masa necesaria es  $\sim 20$  mg.

La incertidumbre en la medición se calcula a través de triplicados.



Figura: Analizador elemental de C-N Vario Micro Cube, Elementar.

<sup>1</sup>Flyer vario MICRO cube, marca Elementar.

## 100 % de la composición elemental

$$100\% \text{ de la composición} = X_{\text{medido}} + X_{\text{desconocido}}, \quad (13)$$

$$X_{\text{medido}} = \text{XRF(Na, Mg, ..., U)} + \text{C-N}. \quad (14)$$

Se desconoce elementos ligeros, entre los que se destacan H y O porque son constituyentes relevantes de

- la materia orgánica (fundamentalmente C, H y O), y
- de los carbonatos (Ca, C y O).

$$X_{\text{desconocido}} = \text{hidrógeno} + \text{oxígeno}, \quad (15)$$



## Composición de referencia y corregida

**Composición de referencia** : agua,



**Composición corregida** : XRF + C-N + Oxígeno + Hidrógeno.

Las cantidades que se relacionan con las composiciones son

- la eficiencia  $\epsilon$ ,
- la actividad específica  $A$  de un radionúclido, y
- los resultados del fechado

$$A_{\text{corr}} = \frac{\epsilon_{\text{ref}}}{\epsilon_{\text{corr}}} A_{\text{ref.}} \quad (16)$$

## Objetivos

**Objetivo general:** mejorar la cuantificación de los radionúclidos utilizados en el fechado de sedimentos recientes ( $^{210}\text{Pb}$  y  $^{214}\text{Pb}$ ) a través de correcciones de densidad y composición para cada muestra analizada.

### Objetivos específicos

- Caracterizar los detectores de Ge: fondos, calibración de canal-energía y eficiencia-energía.
- Seleccionar núcleos sedimentarios representativos de diversos sistemas acuáticos mexicanos.
- Determinar la composición elemental de algunas secciones y proponer su composición completa.
- Desarrollar códigos de programación para la lectura e integración de los datos, así como para ejecutar de manera sistemática ANGLE.
- Estudiar los efectos de la densidad y composición elemental sobre la eficiencia para energías de 46.54 keV y 351.93 keV.
- Estudiar el efecto de las correcciones realizadas en las actividades y el fechado de los núcleos seleccionados en relación a los resultados con una composición de referencia.

## Objetivos

**Objetivo general:** mejorar la cuantificación de los radionúclidos utilizados en el fechado de sedimentos recientes ( $^{210}\text{Pb}$  y  $^{214}\text{Pb}$ ) a través de correcciones de densidad y composición para cada muestra analizada.

### Objetivos específicos

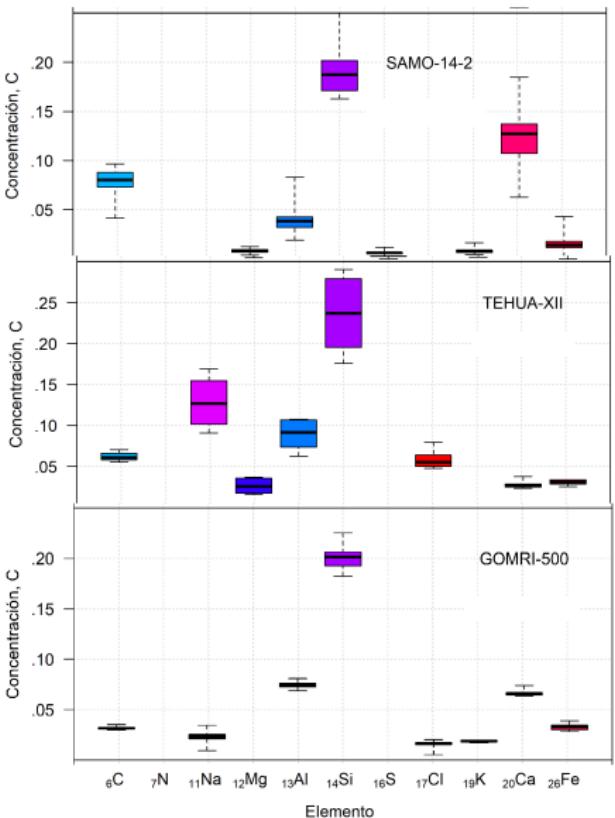
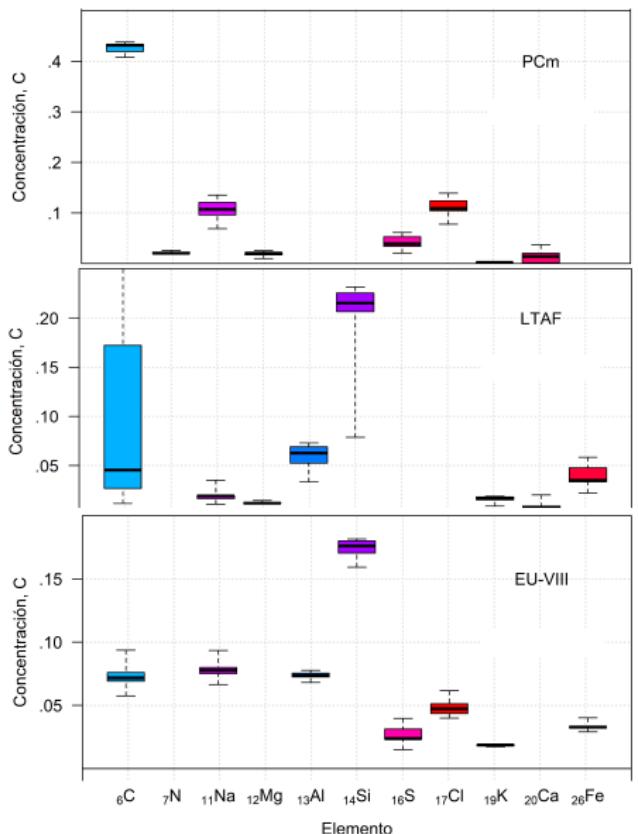
- Caracterizar los detectores de Ge: fondos, calibración de canal-energía y eficiencia-energía.
- Seleccionar núcleos sedimentarios representativos de diversos sistemas acuáticos mexicanos.
- Determinar la composición elemental de algunas secciones y proponer su composición completa.
- Desarrollar códigos de programación para la lectura e integración de los datos, así como para ejecutar de manera sistemática ANGLE.
- Estudiar los efectos de la densidad y composición elemental sobre la eficiencia para energías de 46.54 keV y 351.93 keV.
- Estudiar el efecto de las correcciones realizadas en las actividades y el fechado de los núcleos seleccionados en relación a los resultados con una composición de referencia.

## Zonas de Estudio

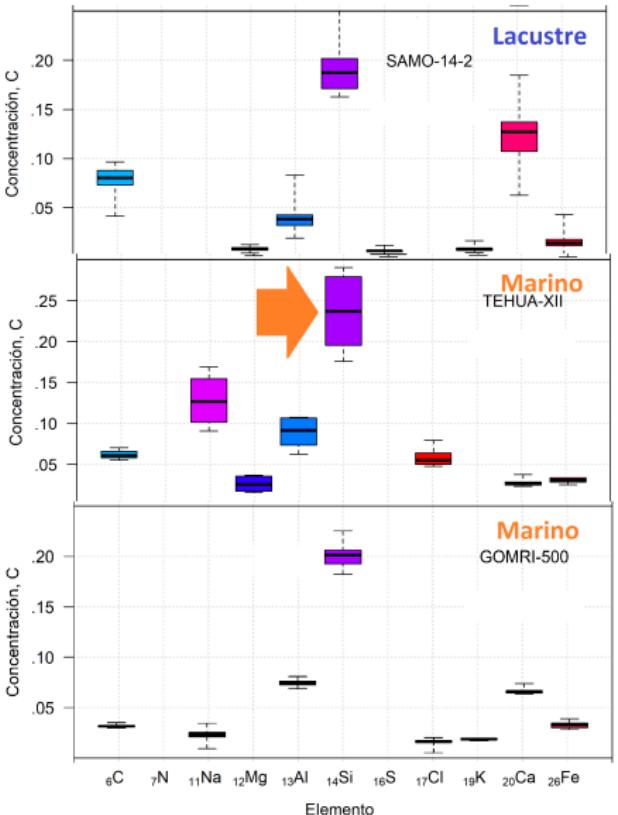
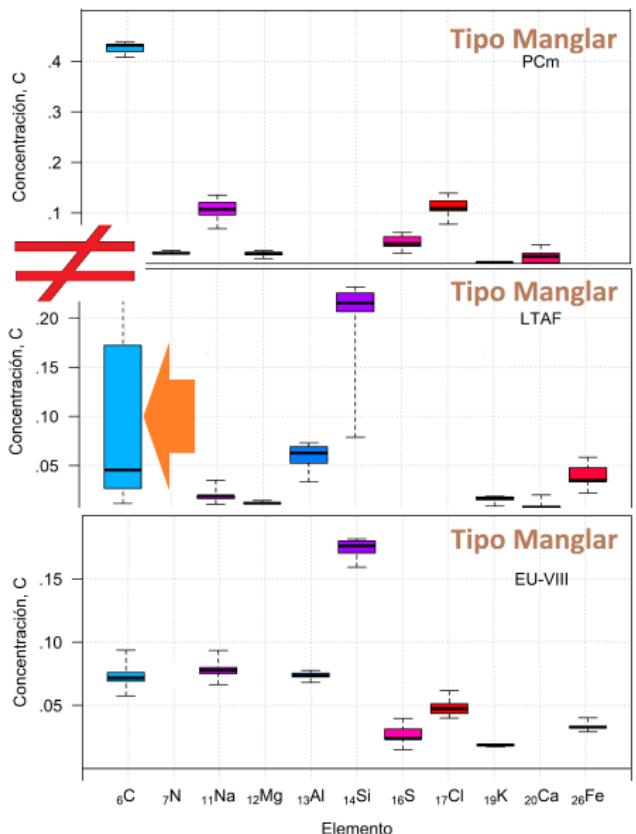


Figura: Ubicación geográfica de los núcleos sedimentarios seleccionados para el presente trabajo.

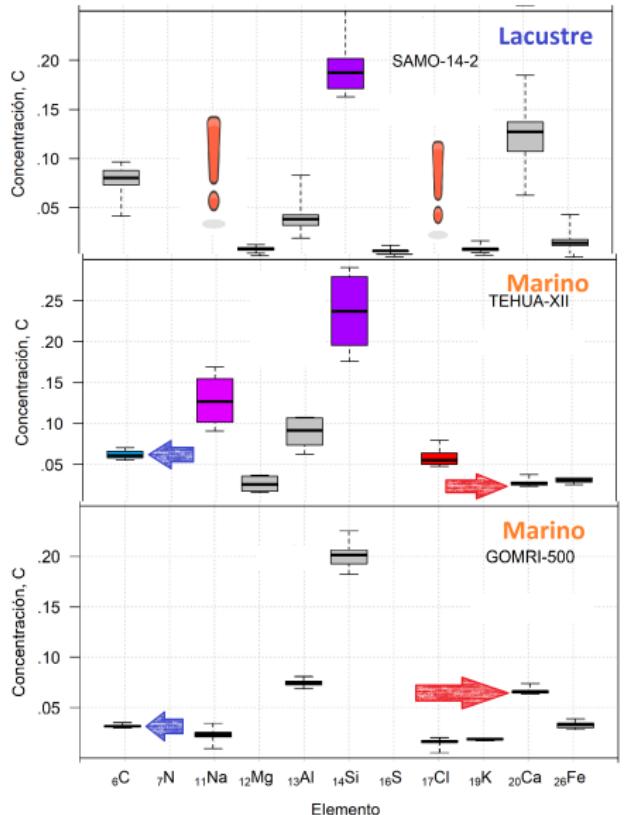
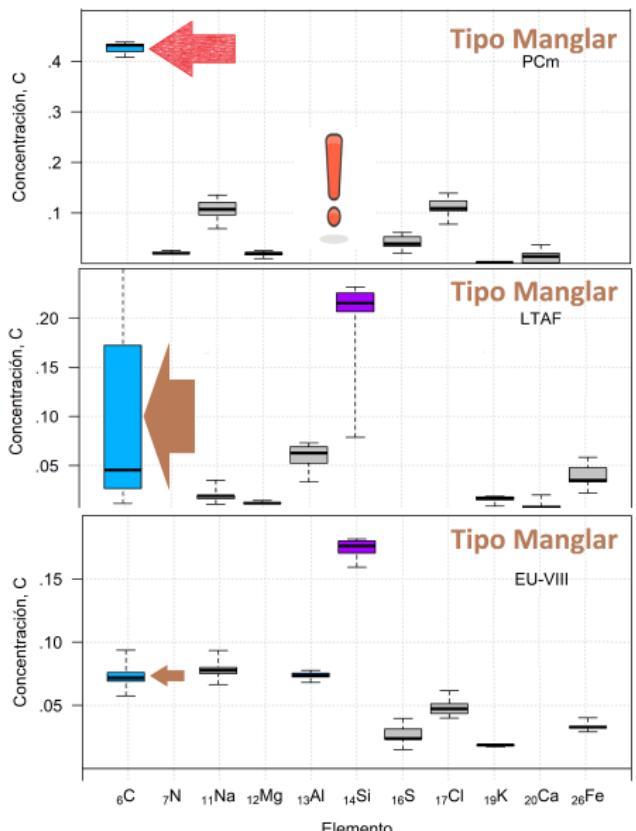
# Composición elemental medida de los núcleos sedimentarios



## Composición elemental medida de los núcleos sedimentarios



## Composición elemental medida de los núcleos sedimentarios



## Composición elemental medida de los núcleos sedimentarios

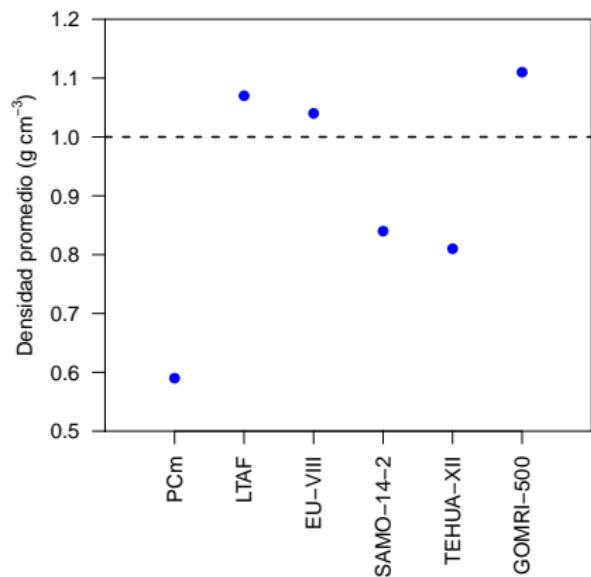
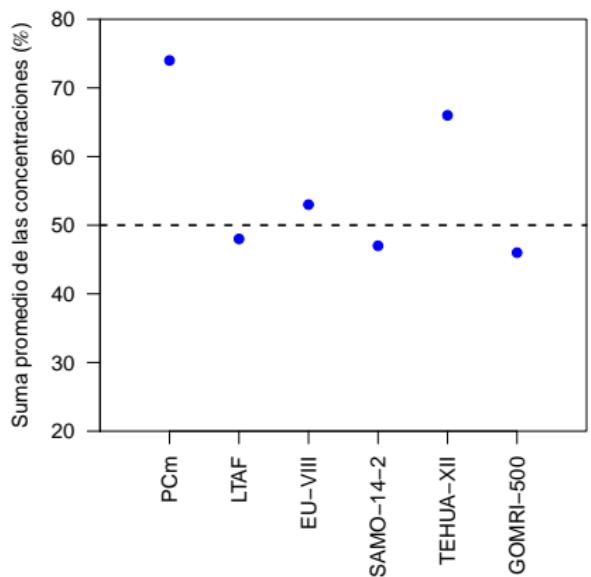
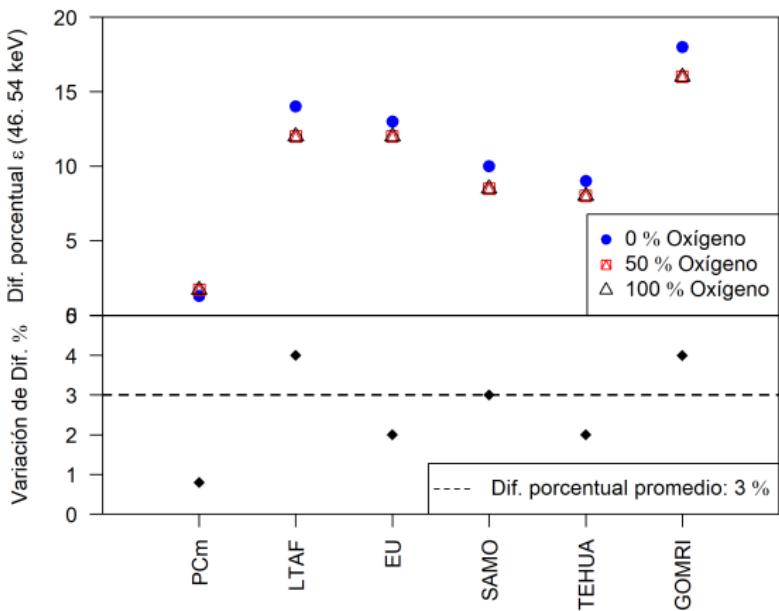


Figura: Suma de las concentraciones absolutas promedio medidas y valor de la densidad promedio  $\bar{\rho}$  (en  $\text{g cm}^{-3}$ ) a lo largo de los núcleos sedimentarios.

## Composición corregida



La desviación promedio calculada (3 %) es inferior a la incertidumbre de la medida

∴ **composición corregida = 50 % oxígeno y 50 % hidrógeno de  $X_{\text{desconocido}}$ .**

# Perfiles de $^{210}\text{Pb}$ para una composición de referencia y corregida

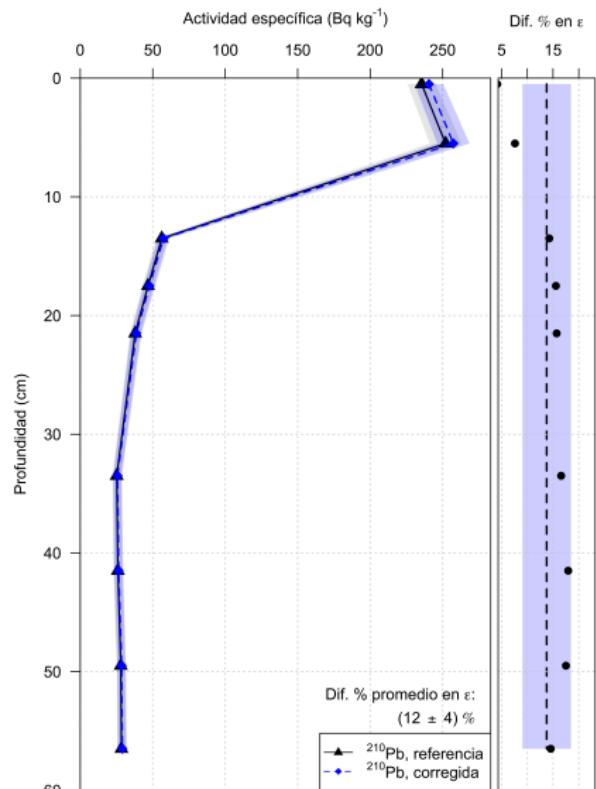
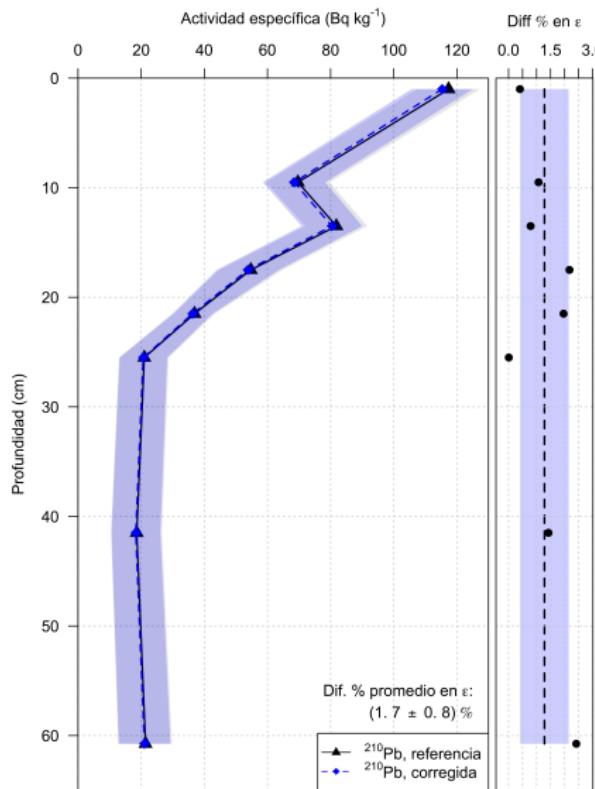


Figura: PCm y LTAF

## Perfiles de $^{210}\text{Pb}$ para una composición de referencia y corregida

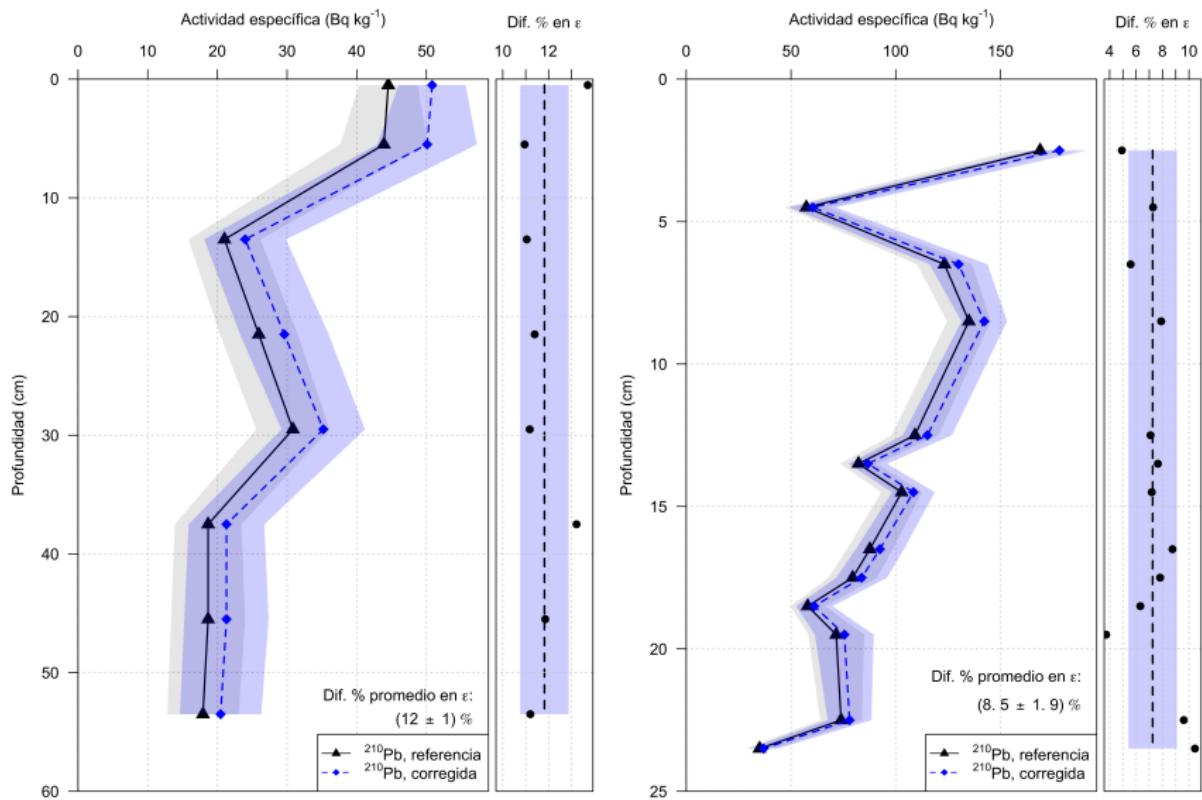


Figura: EU-VIII y SAMO-14-2

# Perfiles de $^{210}\text{Pb}$ para una composición de referencia y corregida

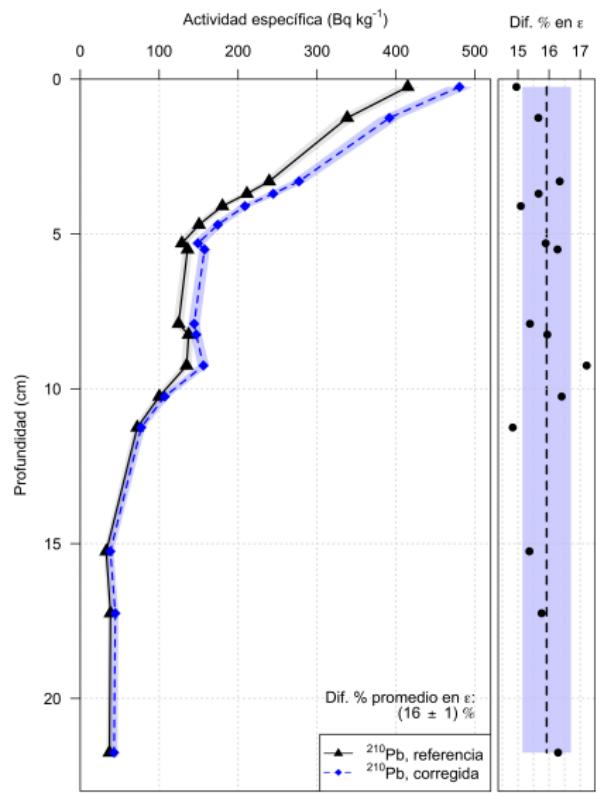
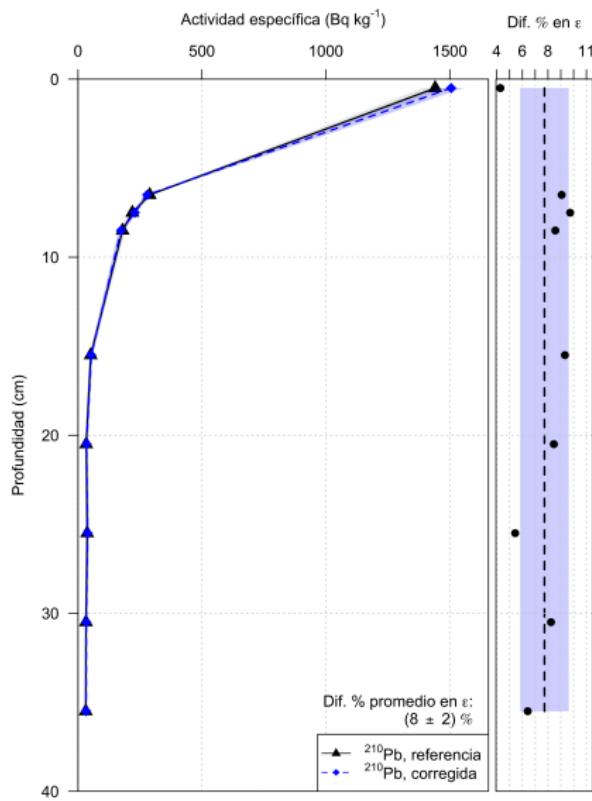


Figura: TEHUA-XII y GOMRI-500

# Perfiles de $^{210}\text{Pb}$ para una composición de referencia y corregida

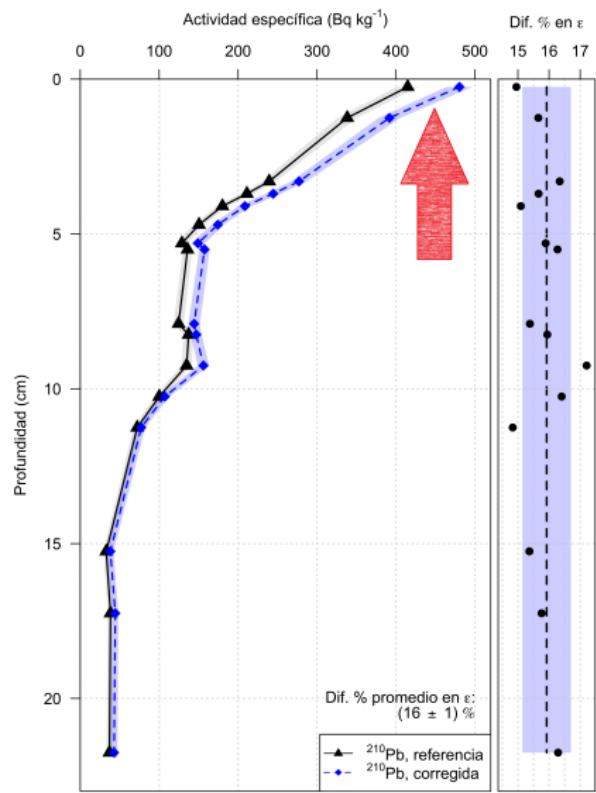
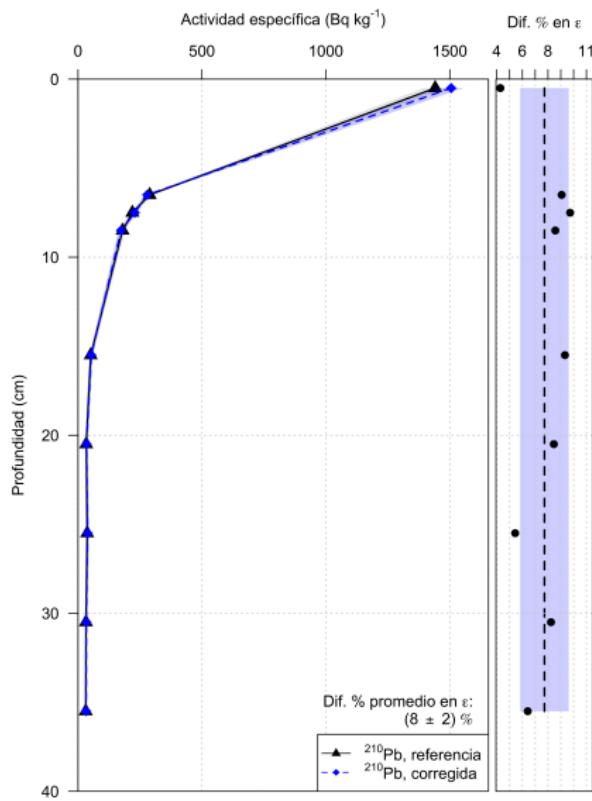
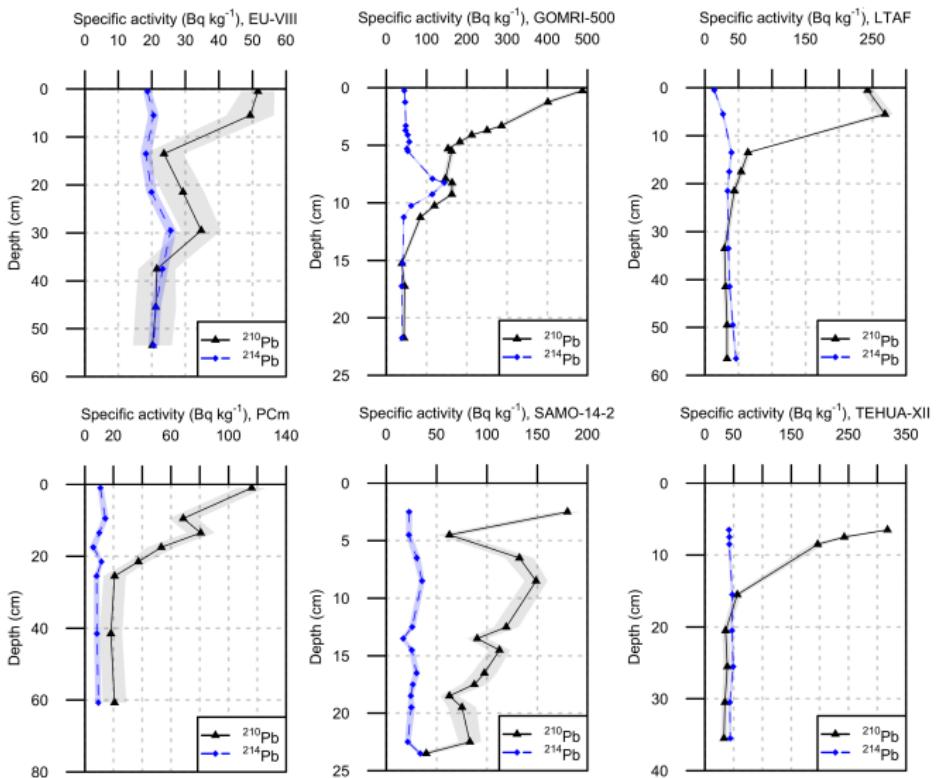
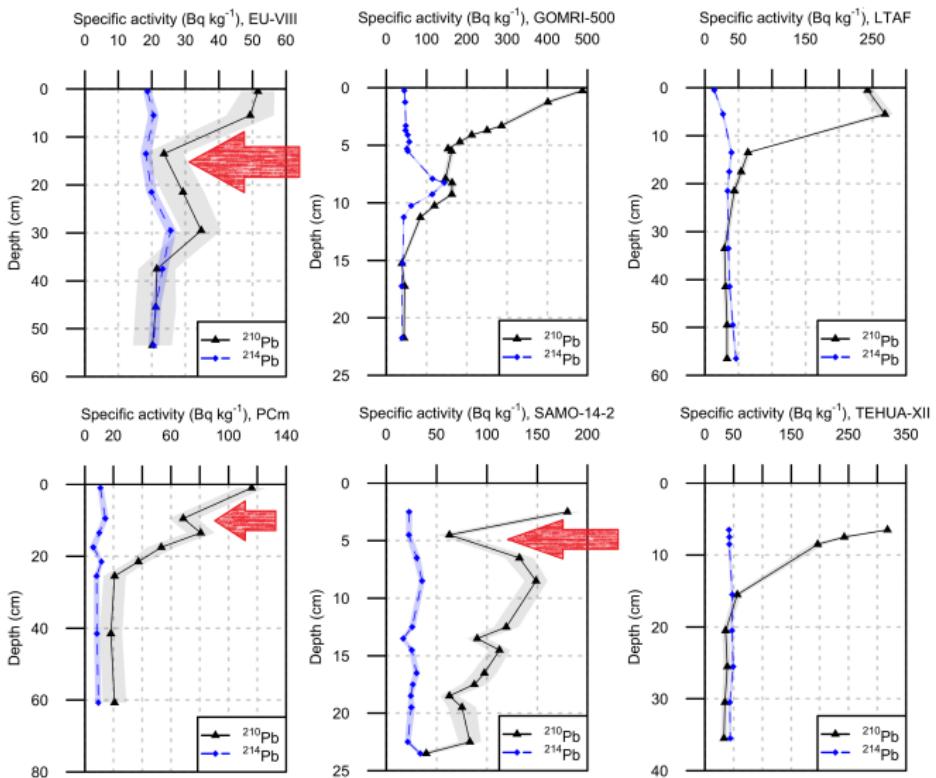


Figura: TEHUA-XII y GOMRI-500

## Perfiles de $^{210}\text{Pb}$ y $^{214}\text{Pb}$ .



## Perfiles de $^{210}\text{Pb}$ y $^{214}\text{Pb}$ .



## Equilibrio secular

$$\delta = \frac{A(^{214}\text{Pb}) - A(^{210}\text{Pb})}{A(^{214}\text{Pb})} \times 100 \quad (17)$$

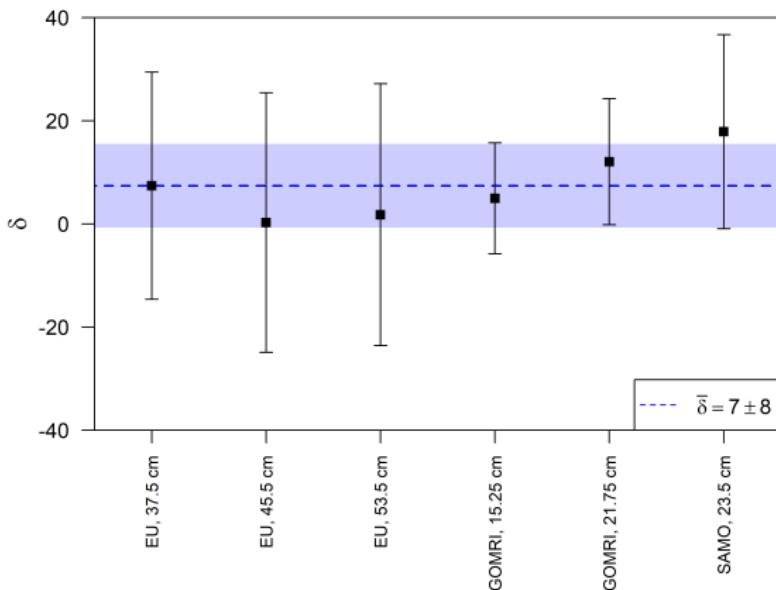


Figura: Diferencia porcentual  $\delta$  de los valores de la actividad específica de  $^{210}\text{Pb}$  respecto a la actividad específica de  $^{214}\text{Pb}$  para las secciones que se encuentran en equilibrio.

## Modelos de edad para dos composiciones

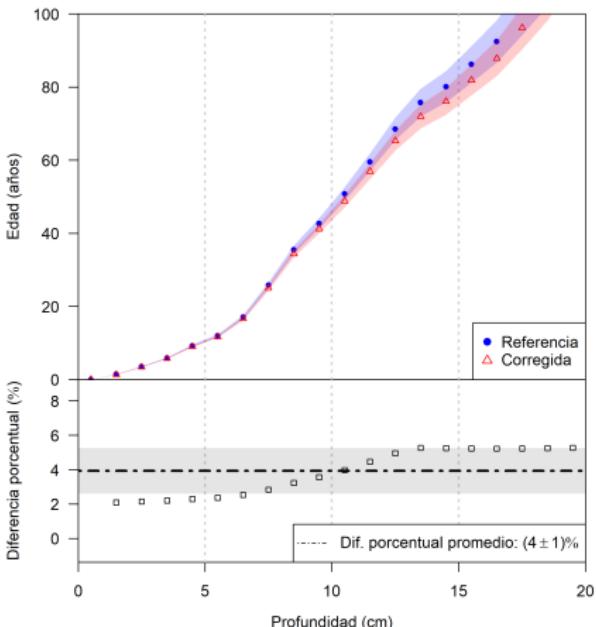
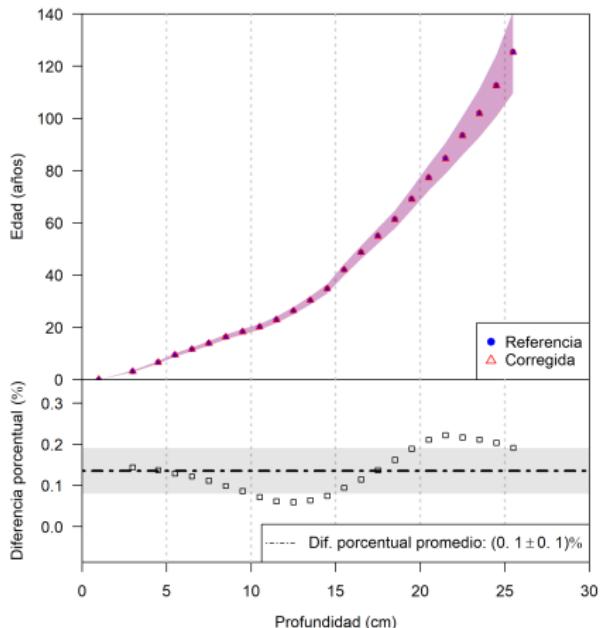


Figura: PCm y LTAF

## Modelos de edad para dos composiciones

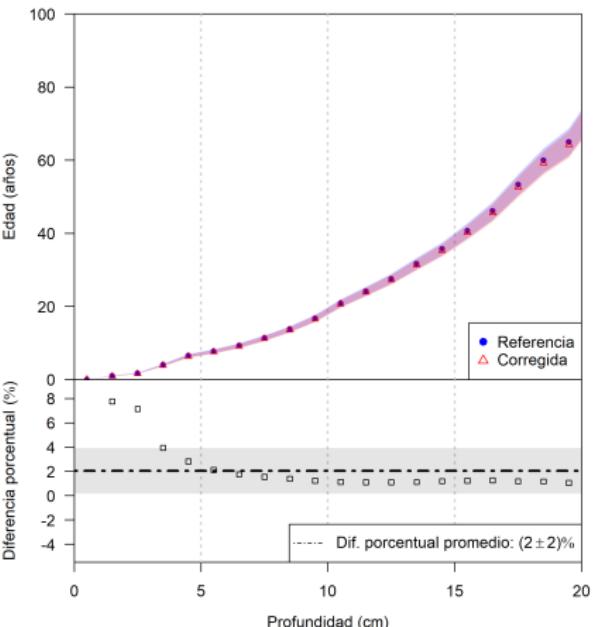
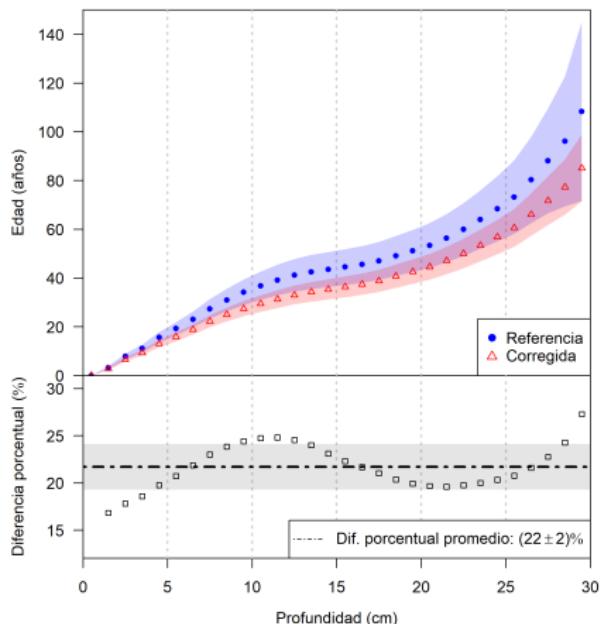
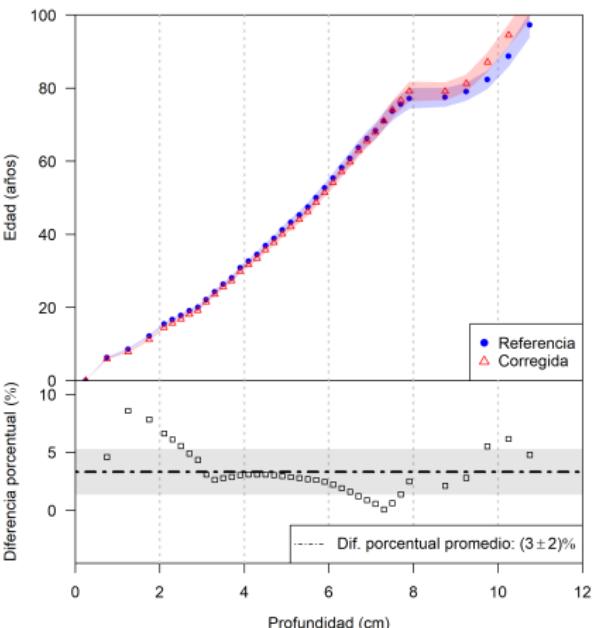
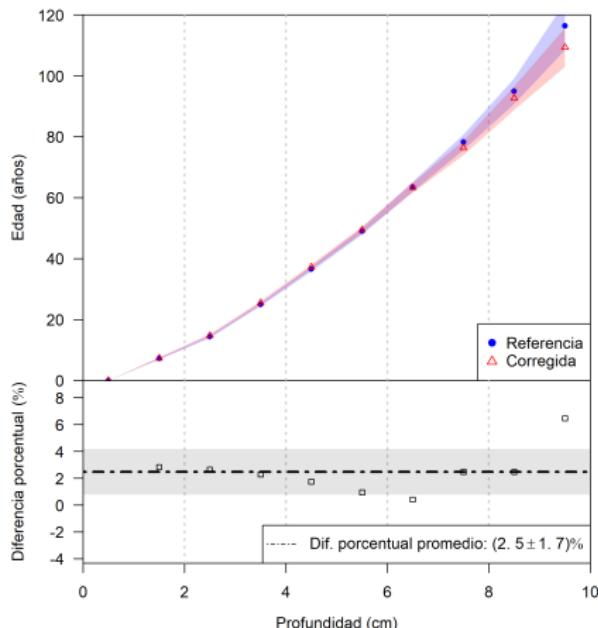


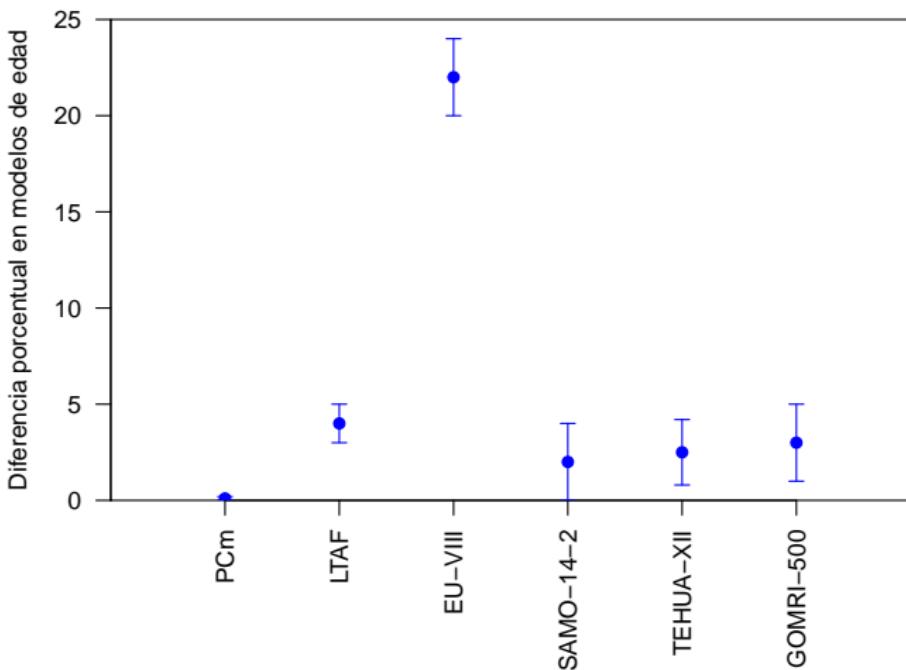
Figura: EU-VIII y SAMO-14-2

## Modelos de edad para dos composiciones



## Figura: TEHUA-XII y GOMRI-500

## Diferencias porcentuales en modelos de edad



$$t(i) = \frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{\sum_{j=1}^{\infty} A_j m_j}{\sum_{j=i+1}^{\infty} A_j m_j} \right). \quad (18)$$

## Conclusiones

- Se seleccionaron los núcleos sedimentarios: EU-VIII, GOMRI-500, PCm, LTAF, SAMO-14-2 y TEHUA-XII. Gran variabilidad en la composición elemental inter- e intra-núcleos, de los que se conoce 46 % hasta 75 % de su composición promedio.
- Composición corregida: XRF + C-N + composición desconocida con el 50 % de contribución de oxígeno y el 50 % de hidrógeno.
- La diferencia entre la eficiencia de todas las muestras varió entre 1.7 y 16 %.
- Las desviaciones de las actividades de  $^{210}\text{Pb}$  fueron de 10 % para EU-VIII, LTAF, SAMO-14-2 y TEHUA-XII, y de 16 % para GOMRI-500 para composiciones de referencia y corregidas.
- PCm presentó el mayor porcentaje de composición conocida promedio (75 %), una diferencia promedio de 1.7 % entre las eficiencias y una diferencia próxima a cero entre los modelo de fechado.
- Se realizó el fechado de los núcleos sedimentarios utilizando el modelo CF. Las fechas corregidas variaron entre 0.1 % y 22 %. Estas desviaciones no se correlacionaron de forma simple con la corrección de la eficiencia (y por lo tanto de la actividad) ni con su variabilidad, pues el modelo de edad incluye de forma compleja las sumas de los productos de las masas y las concentraciones.

## Conclusión

En la mayoría de los núcleos sedimentarios analizados se desconoce el 50 % de su composición elemental. Esto puede causar una diferencia porcentual en el valor de las actividades de  $^{210}\text{Pb}$  de 16 % y una diferencia de hasta 22 % en el fechado, por lo tanto, es necesario siempre corregir la eficiencia, la actividad y el fechado debido a su composición.

Portada

Justificación y objetivo general  
oooooooo

Introducción y metodología  
oooooooooooooooooooo

Resultados y discusión  
oooooooooooooooooooo

Conclusiones  
oo●oooooooooooooooooooo

«Así es - suspiró el coronel -.  
*La vida es la cosa mejor que se ha inventado.* »

Gabriel García Márquez  
El coronel no tiene quien le escriba, 1961.

Portada

Justificación y objetivo general  
oooooooo

Introducción y metodología  
oooooooooooooooooooo

Resultados y discusión  
oooooooooooooooooooo

Conclusiones  
ooo●oooooooooooooooooooo

## Título optional para la tesis

**Corrección de las actividades y del fechado con  $^{210}\text{Pb}$  debido a la composición elemental para núcleos sedimentarios acuáticos mexicanos.**

Portada

## Equilibrio Secular

En una serie de desintegración radiactiva, sea el núcleo progenitor  $A$  y los núcleos radiactivos descendientes  $B$  y  $C$ , y las condiciones iniciales

$$N_A(t = 0) = N_{A,0}, \quad N_B(t = 0) = N_C(t = 0) = 0 \quad (19)$$

$$N_A(t) = N_{A,0} \exp(-\lambda_A t) \quad (20)$$

$$N_B(t) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_{A,0} \left[ \exp(-\lambda_A t) - \exp(-\lambda_B t) \right] \quad (21)$$

$$N_C(t) = \alpha \exp(-\lambda_A t) + \beta \exp(-\lambda_B t) + \gamma \exp(-\lambda_C t) \quad (22)$$

$$\alpha = \frac{\lambda_A \lambda_B}{(\lambda_C - \lambda_A)(\lambda_B - \lambda_A)} N_{A,0} \quad (23)$$

$$\beta = -\frac{\lambda_A \lambda_B}{(\lambda_C - \lambda_B)(\lambda_B - \lambda_A)} N_{A,0} \quad (24)$$

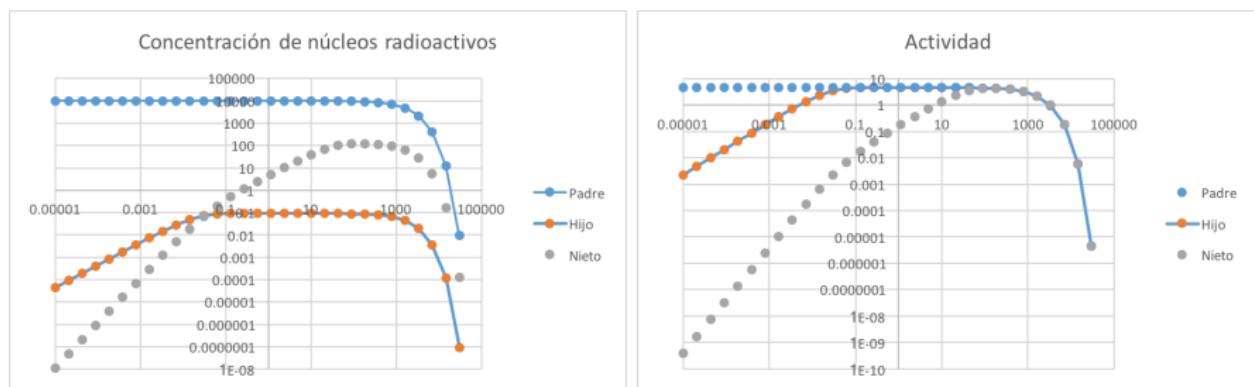
$$\gamma = -\lambda - \beta \quad (25)$$

$$\text{Actividad}(t) = N(t) \lambda \quad (26)$$

## Equilibrio Secular

Para

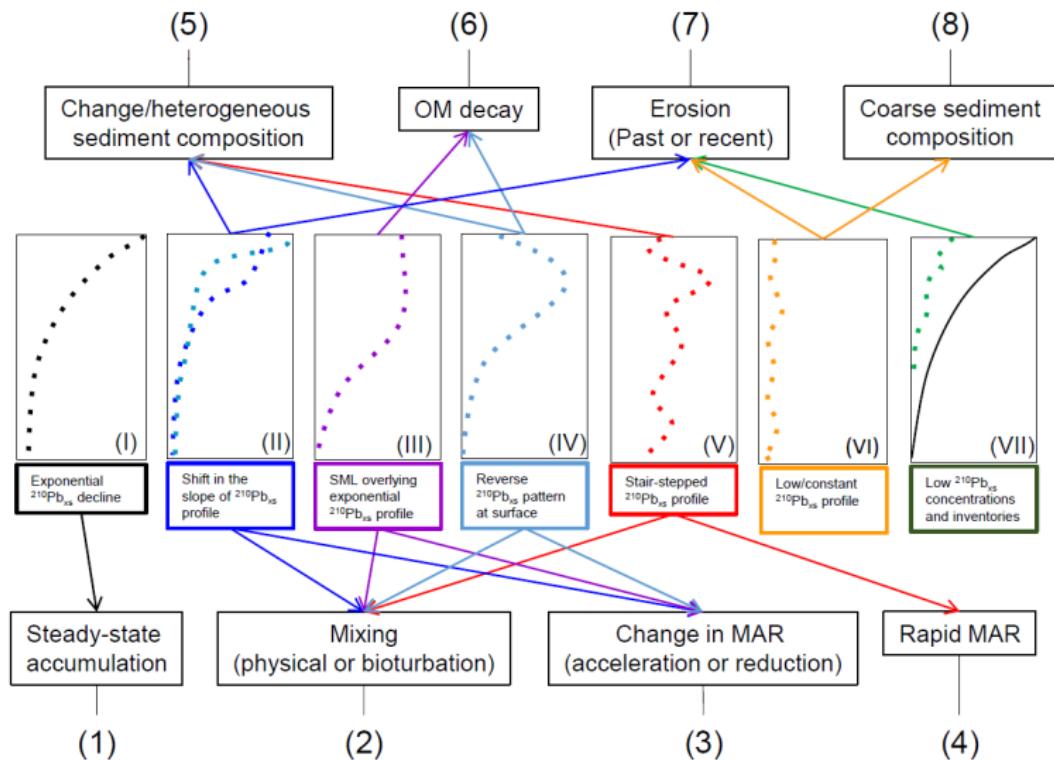
$$T_{\frac{1}{2},A} = 1500, \quad T_{\frac{1}{2},B} = 0,014, \quad T_{\frac{1}{2},C} = 20, \quad (27)$$



$$\text{Actividad}(t) = N(t) \lambda \quad (28)$$

Portada

## Forma de los perfiles de $^{210}\text{Pb}$



## Diagénesis

Diagénesis: son los cambios físicos (compactación), bioquímicos (descomposición de hojas) o biológicos (infauna) en un depósito sedimentario.

$^{210}\text{Pb}$  en el sedimentario puede ser afectado por

- Presencia de aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{=2}$
- Oxidación de  $^{210}\text{PbS}$
- Formación de sulfuros insolubles
- Aumento de SAR implica la descomposición de Materia Orgánica. Sediment Rate Acumulation, SAR,  $\frac{\text{m}}{\text{año}}$ , para lagos  $> 1 \text{ cm/año}$  y para mar  $> 0.1 \text{ cm/año}$ .

Portada

## LTAF

Un comportamiento inverso fue observado en el núcleo LTAF, pues las actividades de  $^{210}\text{Pb}$  son en este caso inferiores al  $^{214}\text{Pb}$ , lo que significa la presencia de un déficit de  $^{210}\text{Pb}$ , probablemente debido a un enriquecimiento de  $^{226}\text{Ra}$  (en equilibrio con el  $^{214}\text{Pb}$ ) debido a procesos diagenéticos. De hecho, LTAF es el núcleo sedimentario de manglar con mayor concentración de  $^{210}\text{Pb}$ , que puede ser debido a la migración hacia la superficie de  $^{226}\text{Ra}$  de capas inferiores, causando así su exceso respecto al  $^{210}\text{Pb}$ . Esto es consistente con el decrecimiento del  $^{214}\text{Pb}$  en las capas superficiales, indicando que parte del  $^{226}\text{Ra}$  está siendo transferido al agua intersticial, y de aquí a la columna de agua. En estos casos, es recomendable utilizar las concentraciones de  $^{210}\text{Pb}$  en el fondo del núcleo para estimar un valor constante del  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ .

## Fechado

- Es un modelo.
  - Capas (ayuda matemática, ( $i$ )) y secciones (¡existe!, tiene masa, concentración de  $^{210}\text{Pb}, {}_i$ ).
  - Sedimento: ¿Cuánto sedimento (metros) cae por unidad de tiempo (año)? SAR,  $s$ , y, para 1 metro $^2$ , ¿cuánto sedimento (kg) pasa en un año? MAR,  $r = \frac{dm}{S dt}$ .
  - $f$  es el flujo de  $^{210}\text{Pb}$ .

$$r = \rho s. \quad (29)$$

$$A(i, t = 0) = \frac{f(i)}{r(i)} \quad \rightarrow \quad A(i) = \frac{f}{r(i)} \exp(-\lambda t) \quad (30)$$

$$\mathbb{A}(i) = \sum_{j=i+1}^{j \rightarrow \infty} \Delta \mathbb{A}_j = \int_m^{\infty} A dm = \int_m^{\infty} \frac{f}{r} \exp(-\lambda t) dm = \frac{f}{\lambda} \exp(-\lambda t). \quad (31)$$

$$\mathbb{A}(i) = \mathbb{A}(0) \exp(-\lambda t). \quad (32)$$

$$t(i) = \frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{\mathbb{A}(0)}{\mathbb{A}(i)} \right) = \frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{\sum_{j=1}^{\infty} A_j m_j}{\sum_{j=i+1}^{\infty} A_j m_j} \right) \quad (33)$$

## Coeficiente m醩ico de atenuaci髇

Ley de atenuaci髇 exponencial<sup>1,2</sup>

$$\frac{I}{I_0} = \exp \left[ -\frac{\mu}{\rho} \rho x \right], \quad \frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma_{\text{total}}}{u A}, \quad (34)$$

donde  $u$  es la unidad de masa atómica y  $A$  el número de nucleones.

Portada

## Sección eficaz

$$\sigma = \frac{\text{Número de reacciones por blanco por segundo}}{\text{Flujo de proyectiles}} \quad (35)$$

$$\sigma = \frac{\text{No. de reacciones}}{\text{segundo}} \quad (36)$$

$$\sigma = \frac{\text{No. de proyectiles}}{\text{área} \times \text{segundo}}$$

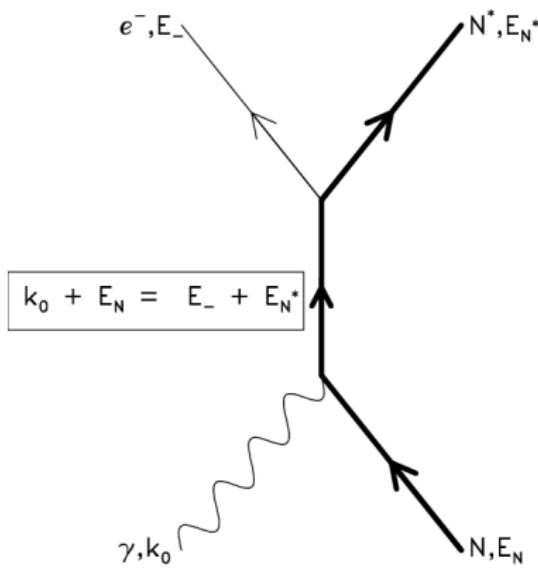
$$\sigma = \text{área} \quad \rightarrow \quad 1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2 \quad (37)$$

$$\sigma_{\text{foto}} \propto \begin{cases} Z^5 E^{-3,5}, & 13,6 \text{ eV} < E < m_e c^2, \\ Z^5 E^{-1}, & E > m_e c^2. \end{cases} \quad (38)$$

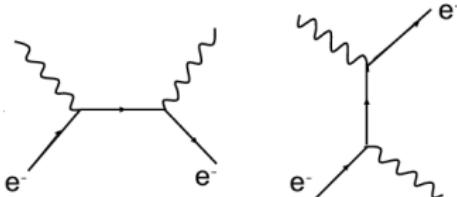
$$\sigma_{\text{Comp}} \propto \begin{cases} \sigma_{\text{Thompson}}(1 - 2\epsilon), & E \ll m_e c^2, \\ \log(\epsilon) \epsilon^{-1} Z, & E \gg m_e c^2, \end{cases} \quad (39)$$

donde  $\epsilon = \frac{E}{m_e c^2}$  y  $\sigma_{\text{Thompson}} = 0.66 \text{ barn}$ .

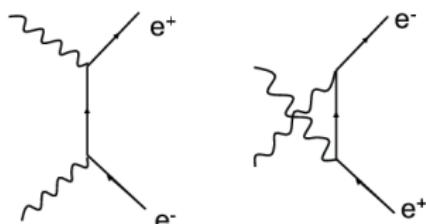
## Sección eficaz



Compton scattering:

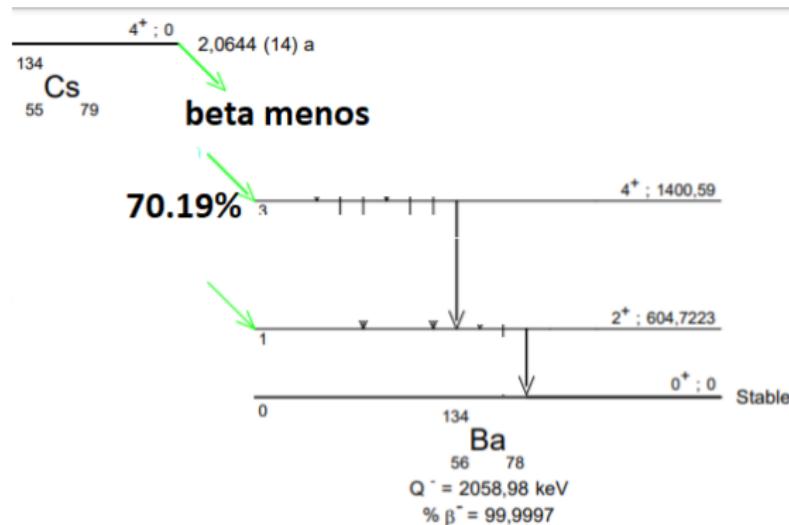


Pair production:

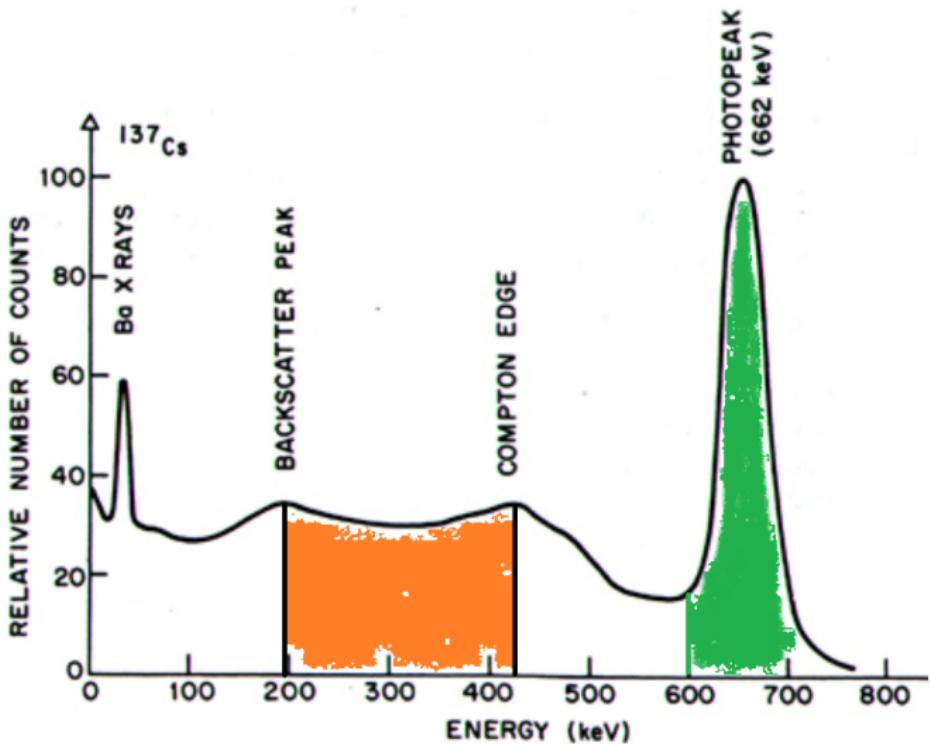


## TCSC - True Coincidence Summing Correction

True coincidence summing (TCS) occurs when two or more photons are emitted from the same decay of a radioactive nuclide and are detected within the resolving time of the gamma ray detector.



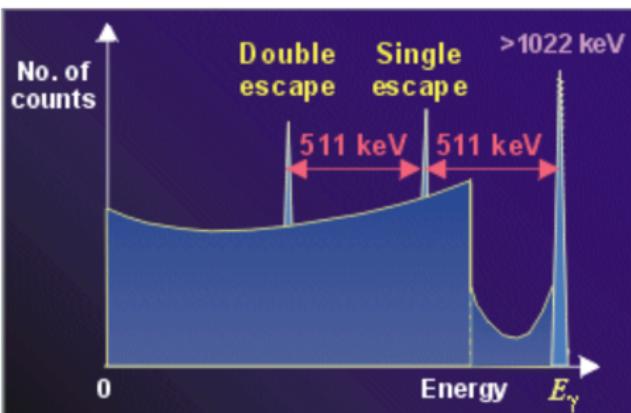
## Espectros: información general



## Espectros: información general

### Single and double escape peaks

In a real detector, if the incident gamma energy is above 1022 keV, pair production events result in the production of two 511 keV annihilation gamma-rays.



If only one of these gamma-rays escapes while the other is completely absorbed in the detector, 511 keV will be lost from the detector. This results in a separate peak in the spectrum representing  $E_\gamma - 511 \text{ keV}$ , called the **single** escape peak.

If both annihilation gamma-rays escape this gives rise to the **double** escape peak at  $E_\gamma - 1022 \text{ keV}$ .

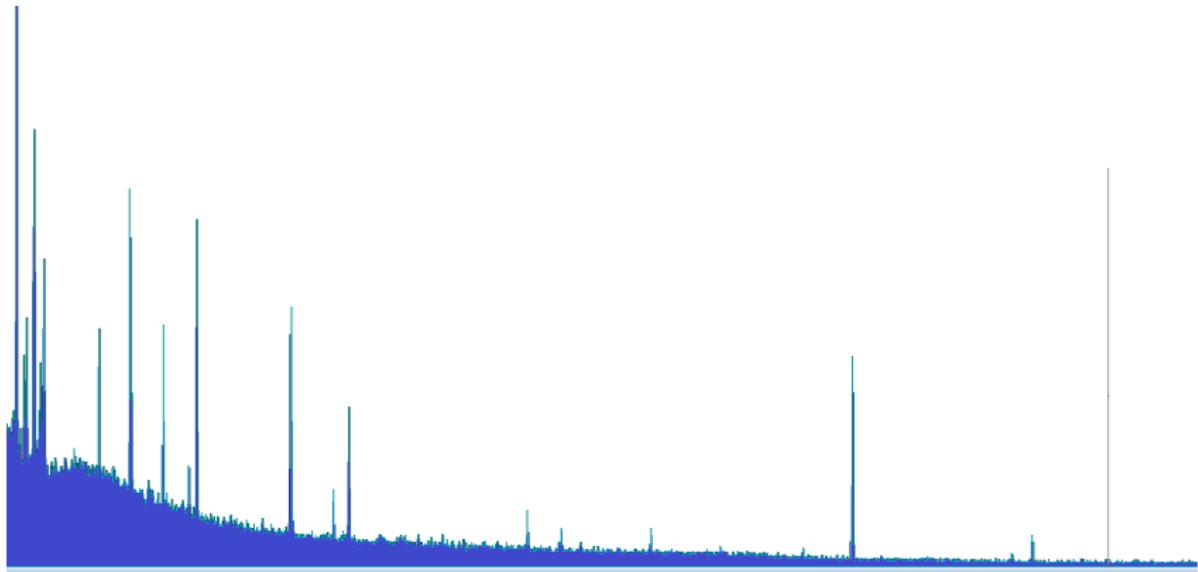
Justificación y objetivo general  
oooooooo

Introducción y metodología  
oooooooooooooooooooo

Resultados y discusión  
oooooooooooooooooooo

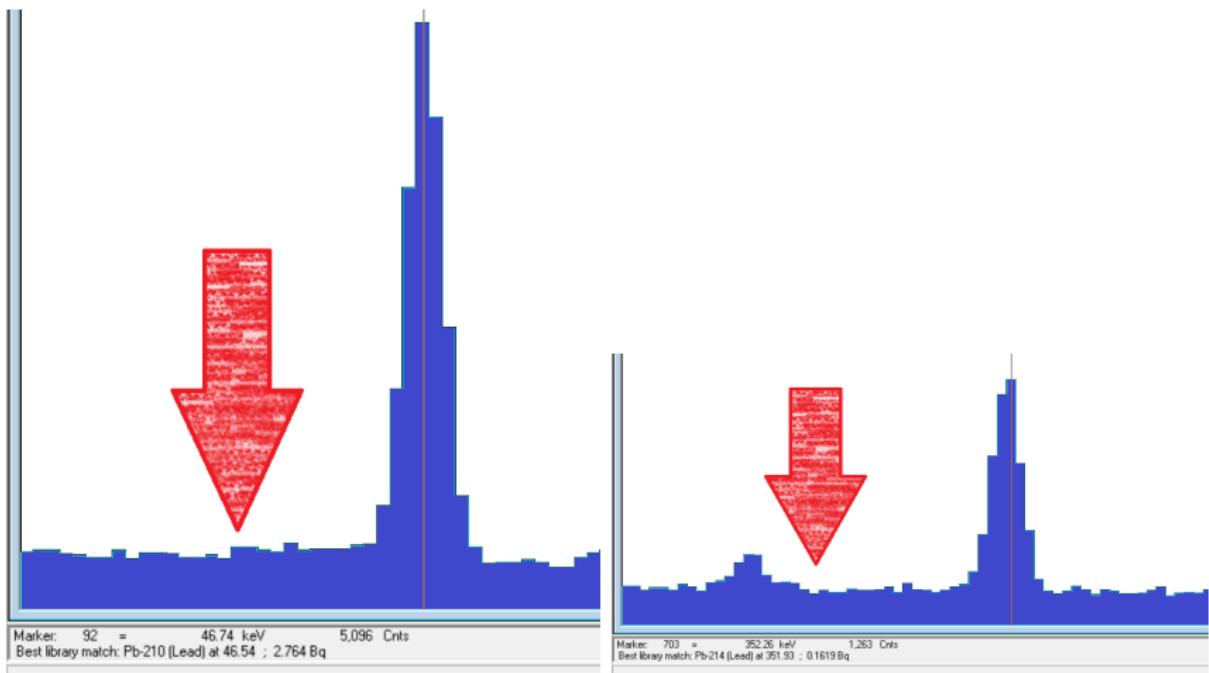
Conclusiones  
oooooooooooooooooooo●oooo

## Espectro de TEHUA-XII

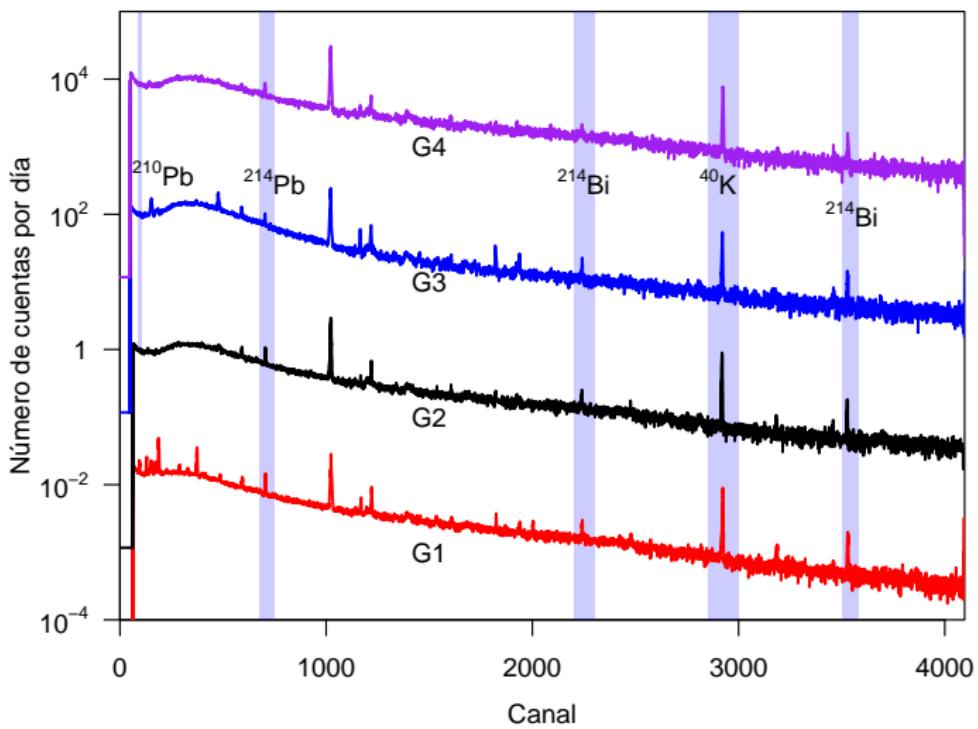


Portada

## Espectro de TEHUA-XII, $^{210}\text{Pb}$ y $^{214}\text{Pb}$



## Espectro de fondos



# Tiempo muerto

ORTEC g v - i ( 175) Wan32 G702W050 2018-11-12 11:  
UNAM Spectrum name: TEHUA XII-

Sample description  
G2 4ml TEHXII E-03C 20-21

Spectrum Filename: C:\GAMMA\Spectra\TEHUA XII\_E\_03\_C\_Agua  
112\_WAN32\TEHUA XII-E3C 20-21 G2 4ml e  
.Anl

Acquisition information  
Start time: 2018-05-02 11:59:35  
Live time: 196145  
Real time: 197249  
Dead time: 0.56 %  
Detector ID: 9

Detector system  
GAMMA 2

ORTEC g v - i ( 175) Wan32 G702W050 2018-11-12 12:  
UNAM Spectrum name: TEHUA XII-

Sample description  
G4 4ml TEHUA XII E-03C 03-04

Spectrum Filename: C:\GAMMA\Spectra\TEHUA XII\_E\_03\_C\_Agu  
a  
112\_WAN32\TEHUA XII-E3C 03-04 G4 4ml  
CUIDADO.Anl

Acquisition information  
Start time: 2015-12-01 09:34:59  
Live time: 259574  
Real time: 259666  
Dead time: 0.04 %  
Detector ID: 4

Detector system  
GAMMA 4

Sample description  
G2 4ml TEHXII E-03C 15-16

Spectrum File: C:\GAMMA\Spectra\TEHUA XII\_E\_03\_C\_Agua\_FECHP.20181  
112\_WAN32\TEHUA XII-E3C 15-16 G2 4ml en equilibrio  
.Anl

Acquisition information

Start time: 2018-04-30 08:34:04  
Live time: 183360  
Real time: 184981  
Dead time: 0.88 %  
Detector ID: 9

Detector system  
GAMMA 2

Calibration

Filename: G2 4ml agua 04122015 FECHP.Clb  
G2 4ml Agua Completa 18 energias 04122015

Portada

# Archivo RPT de EU-VIII 21.5 cm

G1 4ml EU-VIII 21-22 Agua.rpt: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

## Acquisition information

Start time: 2017-09-25 11:56:31  
Live time: 259448  
Real time: 260063  
Dead time: 0.24 %  
Detector ID: 10

## Detector system

GAMMA 1

## Calibration

Filename: G1 4ml Agua 20180723.Clb  
G1 4ml agua

## Energy Calibration

Created: 2017-07-25 17:42:36  
Zero offset: 0.227 keV  
Gain: 0.501 keV/channel  
Quadratic: -2.021E-07 keV/channel^2

## Efficiency Calibration

Created: 2018-07-23 18:00:20  
Knee Energy: 0.00 keV  
Above the Knee: Interpolative Uncertainty = 0.00 %  
Below the Knee: None Uncertainty = 0.00 %

## Library Files

Main analysis library: ANALISIS SEDIMENTO 05062015 (con  
Library Match Width: 0.750

## Analysis parameters

Analysis engine: ROI32 G702W050  
Start channel: 20 ( 10.25keV )  
Stop channel: 4048 ( 2024.83keV )  
Peak rejection level: 40.000%  
Peak search sensitivity: 3  
Sample Size: 4.1185E-03 +/- 1.000E-02%

## El ciclo de $^{210}\text{Pb}$ en ecosistemas acuáticos

La actividad de  $^{210}\text{Pb}$  presente en los sedimentos puede tener diversos orígenes:

- La desintegración de  $^{222}\text{Rn}$ , núcleo precursor de  $^{210}\text{Pb}$ , que es un gas noble y puede escapar de la tierra hacia la atmósfera después de la desintegración del núcleo progenitor  $^{226}\text{Ra}$ .  $^{222}\text{Rn}$  decae en la atmósfera en una corta serie de núcleos de vida media corta ( $\sim$  minutos) hasta  $^{210}\text{Pb}$ . Debido a la alta reactividad del Pb con las partículas, el  $^{210}\text{Pb}$  se une a partículas en suspensión y sedimenta al fondo de los sistemas acuáticos.
- $^{222}\text{Rn}$  puede escapar de la litosfera directamente a los cuerpos de agua y decaer en  $^{210}\text{Pb}$ , que también sedimenta al fondo. La suma de este componente y la anterior se denomina  $^{210}\text{Pb}$  en exceso,  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ , que es la base del fechado de sedimentos con  $^{210}\text{Pb}$ .
- $^{222}\text{Rn}$  que no escapa sino que se desintegra *in situ* y decae en  $^{210}\text{Pb}$ , conocido como  $^{210}\text{Pb}_{\text{base}}$ . Para sistemas cerrados por tiempos superiores a 150 años,  $^{210}\text{Pb}_{\text{base}}$  se encuentra en equilibrio con el radionúclido  $^{226}\text{Ra}$  con  $T_{\frac{1}{2}}(^{226}\text{Ra}) = 1600(7)$  años.