

Aplicación de la regresión lineal multivariable en la radiocronología en restos óseos usando ^{210}Pb

Application of Multivariable Linear Regression Radio-chronology in Skeletal Remains ^{210}Pb

Miguel Alfonso Ramos Sánchez¹, Orlando Hernández Fandiño²

Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, 8, 2026

Recibido: 15 de abril de 2026

Aceptado: 24 de marzo de 2026

Publicado en línea: 12 de septiembre de 2026

DOI: <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.8.2026.713>



Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento 4.0.

Citación: M. A. Ramos y O. Hernández, “Aplicación de la regresión lineal multivariable en la radiocronología en restos óseos usando ^{210}Pb ”, Revista de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, n.o 8, 2026

Resumen

Este trabajo evidencia la aplicabilidad de la química nuclear para hallar la antigüedad de restos óseos. Con este fin, se analizó un modelo lineal de decaimiento del radionúclido ^{210}Pb a partir de datos experimentales encontrados en un artículo publicado en el año 2001 por Swifta, Lauder, Black y Norris. Este artículo muestra la existencia de una correlación entre el contenido de ^{210}Pb y el intervalo de tiempo *post mortem* (IPM). En consecuencia, se pudo definir un modelo de regresión lineal multivariable con un intervalo de datación confiable el cual se estimó entre 15,4 y 88,4 años, donde se puede datar con una incertidumbre de $\pm 11,4$ años.

Palabras clave: datación, hueso, humano, plomo-210, radio-cronología.

Abstract

This study demonstrates the applicability of nuclear chemistry in determining the age of skeletal remains. To this end, a linear decay model for the radionuclide ^{210}Pb was analyzed based on experimental data from an article published in 2001 by Swifta, Lauder, Black, and Norris. This article demonstrates a correlation between the ^{210}Pb content and the postmortem time interval (PTI). Consequently, a multivariate linear regression model was developed with a reliable dating range estimated to be between 15.4 and 88.4 years, with a dating uncertainty of ± 11.4 years.

Keywords: dating, bone, human, lead-210, radio-cronology.

¹ Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Departamento de Química

² Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Departamento de Química

1. Introducción

En la actualidad existen diferentes métodos para conocer, a partir de restos humanos, información importante de un individuo como la etnia, sexo, edad, estatura y otros aspectos que realmente requieren un amplio conocimiento de anatomía y experiencia. No obstante, lograr estimar con precisión la medida de tiempo que lleva sin vida un individuo (a lo que se llama intervalo de tiempo *post-mortem* o IPM), mediante el estudio de sus restos óseos, sigue siendo un reto. Por tal razón este trabajo evidencia la utilidad de la química nuclear para hallar el IPM, a través de un modelo de datación que involucre el uso del isótopo radiactivo del plomo-210 (^{210}Pb), tomando como base lo reportado en la literatura.

Desde 1967 se sugiere el uso de la radiometría para el cálculo del IPM, por cuanto era posible cuantificar la presencia de ciertos radionúclidos artificiales en los huesos, los cuales existen debido al aumento reciente del empleo de la energía nuclear. Además, ya se conocía que muchos de estos isótopos artificiales se acumulan en los huesos [1]. Por este hecho, se decide utilizar radioisótopos para este trabajo, ya que se ven menos afectados por las condiciones ambientales y su desintegración se rige por una constante física.

Un ejemplo de datación absoluta radiométrica, es el método de datación por carbono-14 (^{14}C) que es usado como referente [2]. El uso del ^{14}C , para este efecto, en casos forenses ha sido cuestionado, dada que su vida media es de 5.700 ± 30 años [3]. Por ende, solo puede datar con gran precisión de 1.000 a 30.000 años de antigüedad. Sin embargo, Taylor [2] hizo uso del ^{14}C aprovechando sus recientes alteraciones en el ambiente, ocasionadas por pruebas de armas nucleares, logrando así identificar huesos que datan del año 1950 en adelante.

En general como remplazo del ^{14}C en la datación de restos óseos menos antiguos, se ha sugerido que el isótopo a estudiar debe presentar características como: ser abundante para detectarse fácilmente, contar con un período de vida media proporcional a la escala de tiempo de interés y poseer cierta función biológica que le permita ser incorporado de manera fija en el hueso humano.[4]

Existen varios radionúclidos que cumplen las características sugeridas, entre ellos el núcleo de plomo-210 (^{210}Pb), el cual se encuentra de forma natural en la corteza terrestre

y con el que se podría llegar a estimar la edad de una muestra, en un rango de tiempo equivalente a cinco veces su vida media, es decir cerca de 100 años de antigüedad[4][5][6].

Existen diferentes fuentes de ^{210}Pb que facilitan el ingreso de este elemento en forma de catión al cuerpo humano, donde tiende a acumularse, ya que el plomo tiene afinidad por los sitios de acción del calcio y, de este modo, el depósito de plomo en el hueso está influido por prácticamente todos los procesos que afectan el depósito o la movilización del calcio, lo cual ocasiona que cerca de 95 % del plomo en el cuerpo se almacene en los huesos [7].

Con mayor precisión se sabe que las concentraciones de ^{210}Pb son más altas dentro de los huesos de las costillas y huesos del cráneo, los cuales tienen mayor composición en bio-estructura cortical más densa y con menos porosidad [7].

2. Modelo de datación radiométrica usando ^{210}Pb

Experimentalmente se encuentra que la radiación de un radioisótopo disminuye de forma exponencial con el tiempo, sin depender de la temperatura o de otros factores. La velocidad de desintegración o actividad (A) es igual al número de átomos presentes (N), por una constante característica de desintegración (λ). Esto permite calcular el número de átomos remanentes en función del tiempo [8].

Por otro lado, cuando un núcleo producto de una desintegración también es inestable se habla de una cadena de desintegración. De este modo para conocer la cantidad de núcleos que se forman, se puede plantear diferentes ecuaciones diferenciales para cada miembro de la cadena. La solución general para una cadena de desintegraciones sucesivas fue dada por Bateman [10] en el año de 1910.

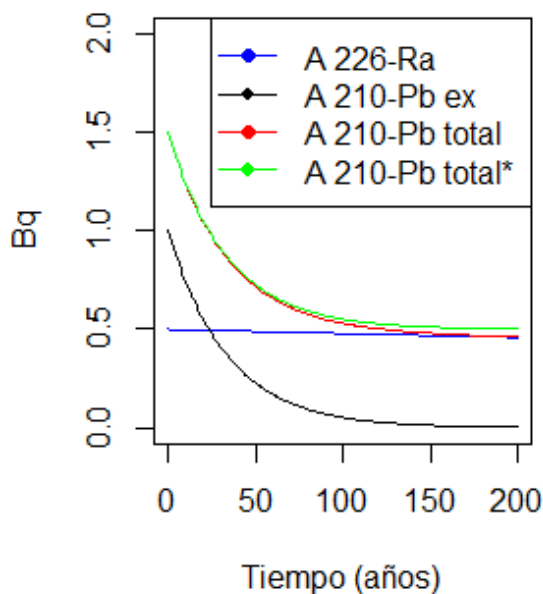
Engeneral, hay cuatro cadenas de desintegración naturales y el núcleo de ^{210}Pb pertenece a la serie de decaimiento de ^{238}U , la cual se distribuye ampliamente en el medioambiente, ya que es posible encontrarlo en la atmósfera, litósfera e hidrosfera [9]. Por ello, ha sido usado como trazador en estudios de procesos de depósito atmosférico y de contaminación antropogénica, además de estudios de geocronología de sedimentos.

El ^{210}Pb viene de la desintegración del ^{226}Ra , el cual tiene un tiempo de vida media de 1.600 años [3]. Estos elementos se pueden encontrar confinados en equilibrio transitorio

o secular dentro de matrices sólidas, donde la tasa de desintegración iguala a la tasa de producción de estos isótopos y se mantiene una concentración relativamente constante de los mismos. Sin embargo, en sistemas abiertos como el suelo, el ^{222}Rn (un gas noble con un tiempo de vida media de 3,8 días [3] que procede de la desintegración del ^{226}Ra) puede exhalarse a la atmósfera y finalmente decaer al ^{210}Pb , el cual tiene un tiempo de vida media mucho mayor ($22,23 \pm 0,12$ años[3]).

Como el núcleo de ^{226}Ra tiene un tiempo de vida media mucho más largo, una cantidad muy pequeña de él decaerá rápidamente a ^{210}Pb . De esta forma la actividad que se pueda medir de ^{210}Pb será debida a la suma de la actividad de los núcleos provenientes del decaimiento del ^{226}Ra y a los núcleos de ^{210}Pb que había inicialmente. La actividad del ^{210}Pb proveniente del ^{226}Ra se considera igual a la del núcleo padre, ya que su conversión es casi instantánea para la escala de tiempo de interés y además se puede considerar constante, ya que el ^{226}Ra decae muy lentamente (como se aprecia en la figura 1).

Figura 1. Simulación de la actividad de ^{210}Pb total, en comparación con una simulación donde se asume que la actividad de ^{226}Ra no decae con el tiempo. Esta última tiene el rotulo ^{210}Pb total*.



En estudios previos de datación con este isótopo de plomo en otras matrices, se encuentra la expresión de ^{210}Pb en exceso, lo que denota la diferencia entre la actividad del núcleo padre y el isótopo de plomo. Esto debido a que se pudo simplificar el problema de la datación solo teniendo en cuenta el decaimiento de los núcleos de plomo que no provienen del núcleo

padre. De esta manera no es necesario obtener una ecuación que involucre cada uno de los radionúclidos que están entre el decaimiento de ^{226}Ra al ^{210}Pb . Además, al analizar la solución de Bateman[10], se pueden respaldar estas aproximaciones por cuanto se puede despreciar el aporte de los núcleos intermedios debido a que los inversos de sus λ_i presentan valores muy bajos respecto a los valores para los núcleos ^{226}Ra y ^{210}Pb , lo que es congruente con que el tiempo de vida media de estos isótopos intermedios es muy corto. Así se obtiene un modelo lineal, donde se puede obtener el tiempo *post-mortem* (IPM) dependiendo de la actividad del ^{210}Pb , donde se deben conocer las condiciones iniciales de decaimiento para el ^{226}Ra y el ^{210}Pb .

$$\text{IPM} = \frac{-1}{\lambda_{^{210}\text{Pb}}} \ln A_{^{210}\text{Pb}} + \frac{1}{\lambda_{^{210}\text{Pb}}} \ln A_{^{210}\text{Pb}}^0 \quad (1)$$

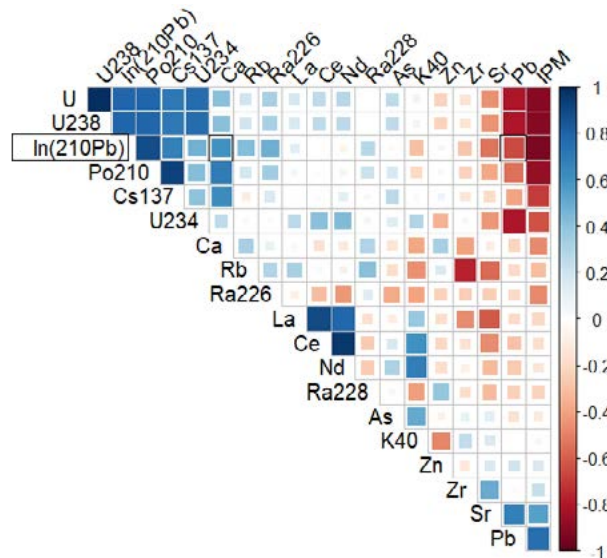
Este modelo lineal se puede aplicar a datos experimentales, como los hallados en la literatura. Dentro de los estudios encontrados cabe destacar uno publicado en el año 2001, realizado por Swift *et al* [4], donde se muestra por primera vez que existe una correlación entre el IPM y la actividad de ciertos radionúclidos naturales, artificiales y la concentración de algunos elementos traza. En este estudio se usó un grupo de muestras de hueso humano que pertenecían a 15 individuos, de los cuales 13 eran individuos femeninos.

En el estudio de Swift *et al.* se cuantificó la presencia en restos óseos de radioisótopos como ^{210}Po , ^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{137}Cs , entre otros, además de cuantificar elementos como plomo, calcio y zinc. Estos análisis se realizaron a partir de diferentes técnicas espectroscópicas entre las que se encuentran espectroscopia de gamma alfa y espectroscopia de absorción atómica. Aunque con los datos presentes en este trabajo se puede concluir que existe una correlación entre la actividad del ^{210}Po (la cual se considera igual a la de ^{210}Pb) y el IPM, no se logró establecer una tendencia clara. Por esa razón este trabajo empleó los datos encontrados [4], con el fin de determinar si es posible el uso del ^{210}Pb para la datación de restos humanos.

La correlación que se buscó responde a los valores de IPM frente al logaritmo natural de la actividad del ^{210}Pb en exceso, es decir sin contar los núcleos que derivan del decaimiento de ^{226}Ra . Sin embargo, se obtiene una mejor correlación con el logaritmo de la actividad de ^{210}Pb total (según lo describe la figura 2). Es importante, resaltar que la actividad del ^{226}Ra se reporta con una incertidumbre por encima del 40 %;

por tanto, es difícil determinar si el contenido de este isótopo es estadísticamente significativo.

Figura 2. Visualización de la matriz de correlación entre todas las variables incluidas en el trabajo de Swift *et al* [4]. Para el análisis se adiciona a los datos originales, una nueva columna de datos, la cual es el logaritmo natural de la actividad del ^{210}Pb .

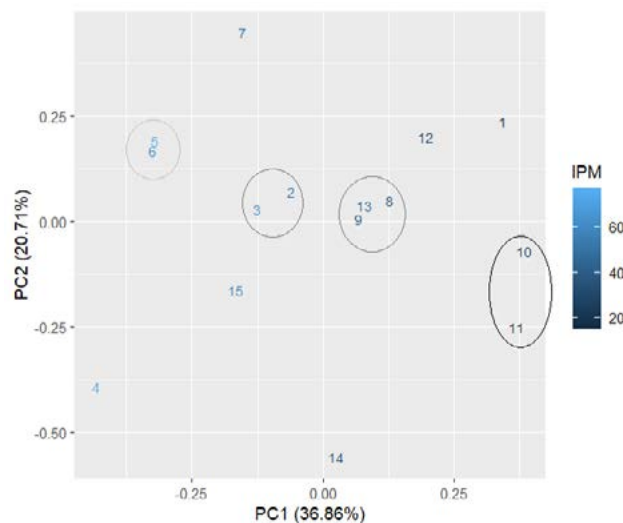


Por otro lado, el modelo matemático planteado con anterioridad [1] se fundamenta en que la actividad de ^{226}Ra es constante. Por tanto, se esperó que todos los individuos estudiados, presentaran relativamente las mismas concentraciones de ^{226}Ra y ^{210}Pb como condiciones iniciales de decaimiento, presentando una actividad del ^{226}Ra constante y con poca varianza dentro del conjunto de individuos, junto con una actividad de ^{210}Pb que decae mientras el IPM aumenta. Contrastado a lo esperado, se encuentra que la actividad de ^{226}Ra no es similar entre los individuos, presentando un coeficiente de correlación lineal positivo ligeramente alto frente al valor de IPM (como la figura 2 lo detalla). Esto puede indicar la heterogeneidad que tienen los individuos, es decir, estos no son individuos que perecieron teniendo las mismas condiciones iniciales de presencia de radionúclidos en su cuerpo.

Esta última suposición se ve reforzada si se tiene en cuenta las otras variables medidas que no corresponden a un decaimiento de un núcleo o cuyos núcleos son mucho más estables que el ^{210}Pb . Esto se evidencia al realizar un análisis estadístico exploratorio de los datos como es el PCA (descrito en la figura 3), donde se puede ver que los individuos rotulados en el estudio original como 14, 11, 4 y 7 se

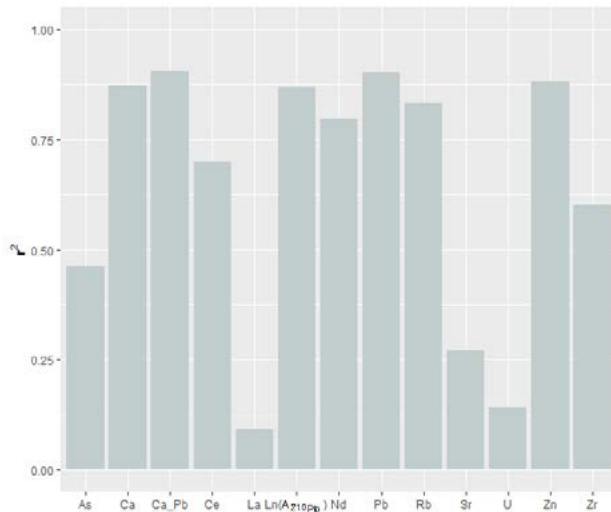
apartan de la tendencia de la varianza general de los datos, comportándose como datos un tanto atípicos. También se señala, que se forman diferentes agrupamientos de datos que poseen a su vez valores de IPM similares, pero no son necesariamente consecutivos. Estos grupos indican teniendo en cuenta todas las variables medidas, que son individuos con condiciones químicas similares.

Figura 3. Análisis por componentes principales (PCA), graficando las dos primeras componentes acumulando un 57,6 % de la varianza de los datos centrados y escalados. También se incluye una nueva columna de datos referente al logaritmo natural de la actividad de ^{210}Pb .



En cuanto a la concentración de elementos como U, Ca, Pb, Sr y actividades de ^{234}U y ^{138}U , se encuentra que poseen una alta correlación lineal frente al IPM, lo cual sugiere que las condiciones ambientales de los individuos evaluados han cambiado progresivamente con el tiempo. Debido a ello, se evidencia la necesidad e importancia de haber contado con más individuos con el mismo valor de IPM para haber obtenido valores de concentración que presentaran una tendencia general entre los individuos pertenecientes a la misma época.

Figura 4. Coeficientes de correlación al cuadrado (r^2 en el eje vertical) graficado para la relación el IPM y el logaritmo de la actividad del ^{210}Pb sin normalizar, etiquetado como $\ln(A^{210}\text{Pb})$ y los r^2 usando la actividad de ^{210}Pb normalizado se etiqueta con el elemento usado para dividir la actividad del isótopo de plomo. El uso simultáneo de plomo y calcio (Ca_Pb) presentan la mejor correlación.



Con el fin de superar la heterogeneidad de los individuos, se plantean dos estrategias. La primera es pensar que la exposición al isótopo de ^{210}Pb está ligada a la presencia de algún elemento responsable de su contaminación o se ve afectado por su presencia. De ser así, se presentaría un coeficiente de correlación relativamente alto con el isótopo de ^{210}Pb . Por tanto, para contrarrestar este efecto se puede recurrir al uso de uno de estos elementos como normalizador de la actividad de ^{210}Pb . Específicamente para este trabajo se identificó una correlación significativa entre las concentraciones de Ca y Pb con la actividad de ^{210}Pb , debido a que estos elementos tienen funciones biológicas similares relacionándose entre ellos. En consecuencia, se emplearon estos dos elementos para normalizar la actividad de ^{210}Pb , dando como resultado una mayor correlación con el IPM usando los dos elementos a la vez (según se observa en la figura 4).

$$A_{\text{Pb}^*} = \frac{(A_{210\text{Pb}})}{\text{Ca}^* \text{Pb}} \quad (2)$$

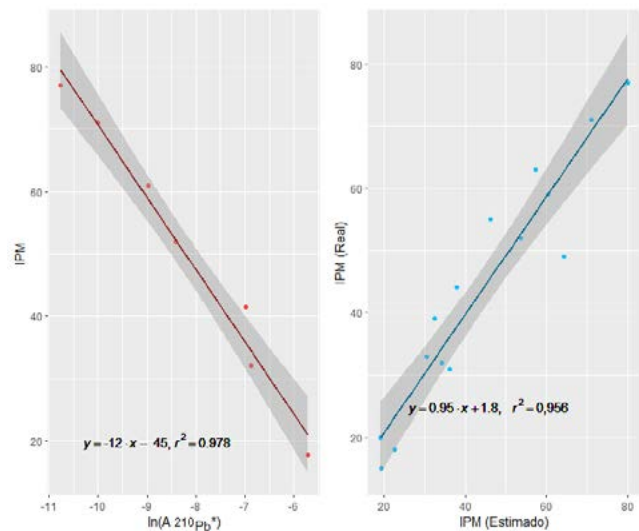
La segunda estrategia fue revisar dentro del conjunto de datos los individuos que presentaban un valor de IPM cercano, con el fin de usarlos como muestras representativas de una misma época, bajo la suposición que estuvieron sujetos a condiciones ambientales similares. De esta manera se pudo tener en cuenta la variación aleatoria que pueden presentar los valores de concentración de un determinado

elemento dentro de los individuos pertenecientes a una población con las mismas condiciones ambientales.

Como resultado se obtuvo un valor de actividad de ^{210}Pb normalizado cuyo logaritmo natural se correlaciona linealmente mejor con el valor de IPM (descrito en la figura 5). El modelo lineal, presentado aquí, es una propuesta de regresión multivariable simple que no solo usa la actividad ^{210}Pb para su cálculo. Aunque cabe resaltar que existe la posibilidad de lograr mejores correlaciones involucrando más variables.

A partir de la ecuación de la recta obtenida, fue posible calcular una datación estimada ($\text{IPM}_{\text{estimado}}$) para los datos originales y de esta forma se determinó el error porcentual respecto al IPM_{real} estando entre 25,5 % y 31,2 % para los individuos rotulados con los números 11, 1 y 7 y para el resto de los individuos debajo del 17 %.

Figura 5. a) Regresión lineal que muestra la mejor correlación lograda entre un factor modificado de la actividad de ^{210}Pb y el IPM, además de agrupar los datos b) Regresión lineal entre los datos de IPM estimado con el modelo lineal anterior con respecto con el IPM real o reportado.



Al revisar el modelo lineal entre el $\text{IPM}_{\text{Estimado}}$ y el IPM_{Real} , la incertidumbre de datación se estimó en 2,5 veces la desviación estándar de los residuales. De esta forma se pudo deducir que cualquier valor de datación, presentaba una alta probabilidad de estar en un intervalo de $\pm 11,4$ años. También fue posible estimar un valor límite de antigüedad, usando el modelo lineal entre el $\ln(A^{210}\text{Pb})$ y el IPM, multiplicando por tres el valor de incertidumbre para valores de concentración de actividad de ^{210}Pb reportado en el artículo original, cuyo valor es 0,01 Bq/kg. Al ser necesario tener valores de las

concentraciones de Ca y Pb, se emplearon los valores correspondientes del individuo más antiguo, con el fin de tener un aproximado de su ambiente químico. De esta manera se determinó este límite como 88,4 años.

Finalmente, con el fin de calcular un límite inferior de datación donde se tiene la confianza de que las dataciones están por encima de la variabilidad de los datos, se usó el intercepto del modelo lineal entre $IPM_{Estimado}$ y el IPM_{Real} sumado con tres veces la desviación estándar de los residuales, obteniendo que este límite puede estimarse 15,4 años.

3. Conclusión

Al analizar los datos, se puede obtener una buena correlación entre el isótopo de ^{210}Pb y el IPM, solo si se tiene en cuenta la presencia de otros elementos e isótopos presentes en los restos óseos, los cuales son indicadores del ambiente químico en que los individuos existieron. Debido a que este ambiente químico no se puede considerar constante es necesario que se considere para este tipo de datación una calibración multivariable. Asimismo, se recomienda que en futuros estudios se utilicen muestras de individuos más representativos de una misma época o intervalo de IPM, dado que según el análisis de PCA, los individuos con valores de IPM similares presentan perfiles elementales comparables, lo que sugiere una posible exposición a condiciones ambientales comunes. Teniendo en cuenta esta consideración, con los datos usados se obtuvo un intervalo de datación confiable que se encuentra entre 15,4 y 88,4 años, donde se puede datar con una incertidumbre de $\pm 11,4$ años.

Referencias

- [1] Knight, B., & Lauder, I.. "Practical Methods of Dating Skeletal Remains; A preliminary study". *Medicine, Science and the Law*, 7, 205–20. 1967
- [2] Taylor, R., Sucher, J., Payen, L., & P.J. Slota Jr.. "The Use of Radiocarbon (C-14) To Identify Skeletal Materials of Forensic Science Interest". *Journal of Forensic Science*, 34, 1196–1205. 1989
- [3] DATA DECAY EVALUATION PROYECT (DDEP). LNE-LNHB-Table de radionucléide.. [en línea] http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm
- [4] Swift, B., Lauder, I., Black, S., & Norris, J.. "An estimation of the post-mortem interval in human skeletal remains: a radionuclide and trace element approach". *Forensic Science International*, 7, 73-87. 2001
- [5] Swift, B.. "Dating human skeletal remains: Investigating the viability of measuring the equilibrium between ^{210}Po and ^{210}Pb as a means of estimating the post-mortem interval ". *Forensic Science International*. 1998
- [6] Appleby, & Oldfield.. "The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment ". *Catena*, 5, 1–8. Abril de 1978
- [7] Sanín LH, G.-C. T.-A.. "Acumulación de plomo en hueso y sus efectos en la salud ". *Salud Publica Mex* , 40:359-368. 1998
- [8] J.B.Cuninghame.. "Introducción al núcleo atómico". Madrid, España: Editorial Alhambra. 1966
- [9] Organismo Internacional de Energía Atómica.. Radiocronología de sedimentos costeros utilizando ^{210}Pb : modelos, validación y aplicaciones. IAEA. (2012)
- [10] Bateman, H. "The Solution of a System of Differential Equations Occurring in the Theory of Radio-active Transformations". *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 15, 423–427. 1910

Tabla 1. Datos de estudio tomados de literatura para la determinación de la curva de datación. Las unidades usadas para la concentración de la actividad fueron Bq/k g en los isótopos ¹³⁷Cs, ²³⁸U, ²³⁴U, ²²⁶Ra, ²¹⁰Po y ²²⁸Ra. Para los demás los elementos se usa µg/g, con excepción del calcio que se reporta en porcentaje peso a peso (% w). El indicativo <LLD denota que el valor se encuentra por debajo del límite de detección de la técnica de medición.

Nº	IPM	¹³⁷ Cs	²³⁸ U	²³⁴ U	²²⁶ Ra	²¹⁰ Po	²²⁸ Ra	⁴⁰ K	Ca	Ce	La	Pb	Rb	Sr	Zn	U	Zr	Nd	As
11	15	1,11	0,90	0,80	0,92	3,48	<LLD	47,20	42,23	7	2	23	3	53	158	0,07	20	7	0,08
1	18	0,75	0,79	0,73	<LLD	2,78	<LLD	59,60	40,96	18	7	25	4	<LLD	210	0,06	21	11	0,19
10	20	0,97	0,77	0,71	0,22	3,86	5,60	58,90	42,55	11	3	25	4	14	165	0,06	21	9	0,30
12	31	<LLD	0,69	0,67	0,74	1,32	<LLD	64,60	40,01	16	7	38	5	5	125	0,06	18	10	0,05
14	32	<LLD	0,29	0,35	0,94	1,54	7,60	9,40	40,56	6	2	37	5	<LLD	202	0,02	21	6	0,03
8	33	<LLD	0,70	0,71	0,83	1,03	<LLD	59,90	38,97	11	3	19	4	36	150	0,06	18	8	0,22
9	39	<LLD	0,53	0,61	<LLD	0,96	2,40	62,80	40,40	10	3	20	5	30	175	0,04	21	8	0,25
13	44	<LLD	0,40	0,94	0,00	0,88	2,70	55,30	42,47	13	5	28	4	38	171	0,03	21	9	0,01
7	49	<LLD	0,21	0,56	0,21	0,21	<LLD	104,9	38,34	15	6	68	3	63	120	0,02	16	10	0,22
2	52	<LLD	0,32	0,63	0,23	0,33	5,50	64,20	39,05	13	5	43	4	10	196	0,03	23	9	0,11
15	55	<LLD	0,08	0,12	0,53	1,03	<LLD	40,10	39,93	10	5	70	4	13	164	0,01	21	7	0,03
6	59	<LLD	0,28	0,52	<LLD	0,20	<LLD	74,80	38,18	9	<LLD	47	1	158	157	0,02	961	8	0,17
3	63	<LLD	0,31	0,63	<LLD	0,24	0,50	37,40	38,97	10	3	43	4	1	150	0,03	23	8	0,13
4	71	<LLD	0,04	0,11	0,21	0,21	1,00	38,90	41,12	4	<LLD	114	4	211	207	<LLD	22	6	0,13
5	77	<LLD	0,07	0,25	<LLD	0,06	<LLD	64,10	40,01	14	5	71	3	85	202	0,01	21	10	0,16