

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
ESCUELA DE FÍSICA



TÍTULO:

**Determinación del nivel de Radiactividad
para Cesio-137 (^{137}Cs) en perfiles
sedimentarios extraídos en la zona costera de
El Salvador**

Tesis presentada para optar al grado de Licenciado en Física

Presenta: Br. Carlos Jonathan Hernández Cruz (HC06004)

Asesor:

Lic. Oscar Armando Amaya Monterrosa

Ciudad Universitaria, Dr. Fabio Castillo Figueroa, 02 julio de 2020.

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS:

RECTOR:

M.Sc. JUAN ROSA QUINTANILLA

VICERRECTORA ACADÉMICA:

DRA. EVELYN BEATRIZ FARFÁN

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO:

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALIO ESCOBAR CASTANEDA

FISCAL GENERAL:

LIC. CARLOS AMÍLCAR SERRANO RIVERA

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y
MATEMÁTICAS:

DECANO:

DR. LUIS ALBERTO PARADA GÓMEZ

VICEDECANO:

DR. JOSÉ NERY FUNES TORRES

DIRECTOR ESCUELA DE FÍSICA:

DR. RAFAEL ANTONIO GÓMEZ ESCOTO

*Dedicado a
mi familia*

Agradecimientos

A Dios en primer lugar, a mi familia por el constante apoyo durante este proceso, a mi asesor por la dedicación y constante supervisión en la conducción y elaboración de este proyecto; al personal del LABTOX - UES, por el apoyo durante los viajes de campo y jornadas de procesamiento de muestras. A mis amigos por la motivación y acompañamiento en esta tesis

Resumen

El presente trabajo establece una metodología para la toma, procesamiento y análisis de muestras de sedimentos, con el fin de medir la actividad de ^{137}Cs , este radioisótopo es de origen antropogénico y se ha depositado al medio a través de accidente o incidentes nucleares, test de armas y vertido de desechos radiactivos. En El Salvador no existe un antecedente de medidas de actividad de ^{137}Cs en sedimentos, a través de esta tesis se establece la línea base para la medida de este tipo de radioisótopos. Midiendo en dos puntos de interés, Barra de Santiago y Estero de Jaltepeque, encontrando actividades máximas de $1,17E + 00 \pm 6,91E - 01$ y $2,02E + 00 \pm 1,57E + 00$, respectivamente.

Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	III
Lista de figuras	VI
Lista de tablas	IX
1. Marco teórico	3
1.1. Radiactividad	3
1.2. ^{137}Cs	4
1.3. Espectrometría Gamma	6
1.4. Interacción de las partículas con la materia	7
1.4.1. Efecto fotoeléctrico	7
1.4.2. Efecto Compton	8
1.4.3. Producción de pares	10
1.5. Detector	11
1.5.1. Detector de estado sólido	11
1.5.2. Pasos para el análisis de un espectro	15
1.5.3. Cálculo de la incerteza	19
1.5.4. Umbral de decisión y límite de detección	20
2. Humedales Costeros y Marinos	21
2.1. Humedales Costeros	21
2.1.1. Humedales marinos	22
3. Sedimentos Marinos	23
3.1. Ciclogénesis de sedimentos marinos	23
3.1.1. Clasificación de los sedimentos	23

4. Diseño Metodológico	25
4.1. Equipo y estrategia de muestreo	26
4.1.1. Selección de sitios de muestreo	26
4.1.2. Equipo para muestreo	28
4.2. Selección de sitios de muestreo	28
4.2.1. Estero de Jaltepeque	29
4.2.2. Barra de Santiago	29
4.3. Muestreo	30
4.3.1. Extracción de muestras	30
4.4. Preparación de geometrías de calibración y de medida	33
4.4.1. Elaboración de geometrías de materiales de referencia	33
4.5. Proceso de medida de la muestra	34
4.6. Análisis de la muestra	35
4.7. Cálculo de la incerteza	35
5. Resultados y Discusión	36
5.1. Contenido de humedad	36
5.2. Actividad másica ^{137}Cs	36
5.3. Actividad de ^{137}Cs	37
6. Conclusiones y Recomendaciones	41
6.1. Conclusiones	41
6.2. Recomendaciones	42
7. Anexos	43
7.1. Contenido de humedad	43
7.2. Tablas de actividad ^{137}Cs	44
7.3. Espectros de las muestras	47
7.3.1. Espectros Barra de Santiago	47
7.3.2. Espectros Estero de Jaltepeque	54

Índice de figuras

1.1. Esquema de decaimiento del ^{137}Cs . [14]	4
1.2. Reconstrucción de la caída en el hemisferio norte de ^{137}Cs , hasta 1970 [1]	5
1.3. Zonas de influencia de los efectos de interacción de la radiación con la materia.	7
1.4. Efecto fotoeléctrico.	8
1.5. Esquema de efecto fotoeléctrico en un espectro gamma.	8
1.6. Esquema de producción de efecto Compton.	9
1.7. Esquema simplificado de la producción de pares.	10
1.8. Espectro gamma mostrando producción de pares producción de pares.	11
1.9. Disposición típica de los componentes en un detector de estado sólido. El cristal es una unión pn polarizada inversamente para conduzca al colector cuando se produzca la ionización la región sensible. La señal se alimenta por lo general a un pre-amplificador de carga sensible para la conversión a un pulso de voltaje. [18]	12
1.10. Esquema interno del detector, ORTEC. (no está a escala) . . .	12
1.11. Espectrómetro Gamma. [LABTOX]	13
1.12. Ejemplo de un espectro gamma, en el cual se resta el background para obtener el área total y determinar de esta forma la actividad de la muestra.	14
1.13. Esquema ilustrativo del proceso de medición gamma. [23] . . .	15
1.14. Autoabsorción o autoatenuación.	17
1.15. Ejemplo de espectro simplificado que presenta suma aleatoria. .	19
1.16. Esquema de decaimiento del ^{60}Co con presencia de efecto cascada.	19
1.17. Esquema que ilustra la diferencia entre límite de detección y límite de decisión en espectrometría gamma [KIT].	20

2.1. Humedales costeros y marinos. Elaboración propia basada en figura 1 Conceptos Fundamentales sobre ecosistemas acuáticos y su estado en México. [4].	22
3.1. Ciclo de sedimentación marina [20].	23
3.2. Escala Udden - Wenworth. [22]	24
3.3. Escala Udden - Wentworth, [8]	24
4.1. Metodología para la medición de ^{137}Cs	25
4.2. Nucleador elaborado de forma artesanal con un tubo de 4 pulgadas de diámetro, afilado en un extremo para facilitar el ingreso al suelo.	28
4.3. Zona de estudio en el Estero de Jaltepeque	30
4.4. Zona de estudio Barrio de Santiago	31
4.5. Proceso de extracción de muestras.	32
4.6. Procesado de muestras.	33
4.7. Elaboración de geometrías de referencia.	34
5.1. Actividad másica de ^{137}Cs en Barra de Santiago.	37
5.2. Actividad másica de ^{137}Cs en Barra de Santiago.	38
5.3. Actividad de ^{137}Cs en Barra de Santiago.	39
5.4. Actividad de ^{137}Cs en Estero de Jaltepeque.	40
7.1. Espectro muestra 0 - 2 cm, Barra de Santiago.	47
7.2. Espectro muestra 2 - 4 cm, Barra de Santiago.	47
7.3. Espectro muestra 4 - 6 cm, Barra de Santiago.	48
7.4. Espectro muestra 6 - 8 cm, Barra de Santiago.	48
7.5. Espectro muestra 8 - 10 cm, Barra de Santiago.	48
7.6. Espectro muestra 10 - 12 cm, Barra de Santiago.	49
7.7. Espectro muestra 12 - 14 cm, Barra de Santiago.	49
7.8. Espectro muestra 14 - 16 cm, Barra de Santiago.	49
7.9. Espectro muestra 16 - 18 cm, Barra de Santiago.	50
7.10. Espectro muestra 18 - 20 cm, Barra de Santiago.	50
7.11. Espectro muestra 20 - 22 cm, Barra de Santiago.	50
7.12. Espectro muestra 24 - 26 cm, Barra de Santiago.	51
7.13. Espectro muestra 26 - 28 cm, Barra de Santiago.	51
7.14. Espectro muestra 28 - 30 cm, Barra de Santiago.	51
7.15. Espectro muestra 30 - 32 cm, Barra de Santiago.	52
7.16. Espectro muestra 32 - 34 cm, Barra de Santiago.	52
7.17. Espectro muestra 34 - 36 cm, Barra de Santiago.	52
7.18. Espectro muestra 36 - 38 cm, Barra de Santiago.	53
7.19. Espectro muestra 38 - 40 cm, Barra de Santiago.	53

7.20. Espectro muestra 2 - 4 cm, Estero de Jaltepeque.	54
7.21. Espectro muestra 4 - 6 cm, Estero de Jaltepeque.	54
7.22. Espectro muestra 6 - 8 cm, Estero de Jaltepeque.	55
7.23. Espectro muestra 8 - 10 cm, Estero de Jaltepeque.	55
7.24. Espectro muestra 10 - 12 cm, Estero de Jaltepeque.	55
7.25. Espectro muestra 12 - 14 cm, Barra de Jaltepeque.	56
7.26. Espectro muestra 14 - 16 cm, Estero de Jaltepeque.	56
7.27. Espectro muestra 16 - 18 cm, Estero de Jaltepeque.	56
7.28. Espectro muestra 16 - 18 cm, Estero de Jaltepeque.	57
7.29. Espectro muestra 20 - 22 cm, Estero de Jaltepeque.	57
7.30. Espectro muestra 22 - 24 cm, Estero de Jaltepeque.	57
7.31. Espectro muestra 24 - 26 cm, Estero de Jaltepeque.	58
7.32. Espectro muestra 26 - 28 cm, Estero de Jaltepeque.	58
7.33. Espectro muestra 28 - 30 cm, Estero de Jaltepeque.	58
7.34. Espectro muestra 30 - 32 cm, Estero de Jaltepeque.	59
7.35. Espectro muestra 38 - 40 cm, Estero de Jaltepeque.	59

Índice de cuadros

7.1. Valores de actividad, actividad másica, MDA e incerteza para núcleo de Barra de Santiago	45
7.2. Valores de actividad, actividad másica, MDA e incerteza para núcleo de Estero de Jaltepeque	46

Objetivos

Objetivo General

- Determinar los perfiles de actividad del ^{137}Cs en núcleos sedimentarios mediante espectrometría gamma en la costa de El Salvador

Objetivos Específicos

- Adquirir conocimiento en técnicas nucleares, específicamente en espectrometría gamma.
- Aplicar la técnica de espectrometría gamma para evaluar la contaminación por ^{137}Cs en ambientes marinos.

Introducción

“La radiactividad es un fenómeno natural por el cuál un núcleo atómico emite uno o varios tipos de partículas, transmutándose o desexcitándose a un estado de menor energía” [17]. Existen 3 tipos de radiactividad o decaimientos: Alfa, Beta y Gamma. En las desintegraciones alfa el núcleo atómico emite dos protones y dos neutrones, es decir un núcleo de Helio, pasando a convertirse en un elemento totalmente diferente. En las emisiones Beta, la partícula emitida es un electrón o positrón, convirtiéndose de esta forma también en otro elemento diferente. En el decaimiento Gamma, se emite un fotón y contrario a las anteriores el elemento es siempre el mismo, cambiado eso sí de estado de energía a uno inferior, usualmente estable. Los elementos radiactivos existen de forma natural, provenientes de las cadenas radiactivas naturales: ^{235}U , ^{238}U y ^{252}Th ; sin embargo también pueden ser producto de la actividad humana (productos de fisión) [9], vertiéndose al medio através de explosiones nucleares, accidentes, desastres, vertidos u otras formas. Usualmente estos se depositan en los alrededores del lugar de acontecimiento del suceso, cuando estos son de gran magnitud pueden arrojar estos elementos a la atmósfera, donde el viento se encarga de dispersarlos y llevarlos a grandes distancias, finalmente caen por precipitación ya sea directamente al océano o a tierra donde pueden almacenarse en el suelo o en cuerpos de agua como lagos y lagunas o ser transportado por corrientes de agua continentales y verterse al océano, depositandose finalmente en los sedimentos marinos, desde donde pueden llegar a incorporarse a la cadena trófica. La determinación de la actividad de determinados elementos que tienen una larga vida media como es el caso del ^{137}Cs , nos permite realizar diversos estudios tales como el fechado de sedimentos, que posteriormente puede emplearse en otro tipo de investigaciones.

Capítulo 1

Marco teórico

1.1. Radiactividad

“La radiactividad es un fenómeno natural por el cual un núcleo atómico emite uno o varios tipos de partículas, transmutándose o desexcitándose a un estado de menor energía” [17]. Es un fenómeno totalmente probabilístico, pues no se sabe en qué momento un núcleo excitado emitirá una partícula para poder llegar a un estado de menor energía. Existen tres tipos de decaimiento en función de la partícula que es emitida para liberar energía: Alfa (núcleo de Helio, Beta (electrón (β^-) o positrón (β^+)), Gamma (γ). De estos tres solamente en el decaimiento Gamma, el elemento se mantiene siendo el mismo, descendiendo solo a un estado de menor energía. Cabe mencionar que no existe ningún emisor Gamma puro en la naturaleza. Podemos denominar actividad de un elemento radiactivo a la cantidad de átomos que se desintegran por unidad de tiempo, es decir:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1.1)$$

Es proporcional al número de átomos existentes, N . La constante λ es la denominada constante radiactiva o constante de desintegración. Da la probabilidad de desintegración de un átomo por unidad de tiempo.

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

Que es la misma ley que cumple la actividad:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

La vida media es otro factor a considerar en la radiactividad y esta viene dada por la expresión 1.4. La semivida o semiperiodo es necesario para

calcular el tiempo necesario para que la cantidad de átomos se reduzca a la mitad 1.5. La unidad de medida para la radiactividad en el SI es el *Bequerel* (*Bq*) [17]

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (1.4)$$

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1.5)$$

1.2. ^{137}Cs

El Cesio es un elemento que puede encontrarse en el ambiente en muy pequeñas cantidades (1ppm en el granito y 4 ppm en sedimentos de origen rocoso; [2]), en forma de compuestos, a través de su isótopo ^{133}Cs ; que es el único isótopo estable de los 22 que posee el *Cs*, el Cesio metálico puro es altamente explosivo al reaccionar con el agua o el aire. Los compuestos formados con el ^{133}Cs son estables en el medio. En la tabla 1 se detallan algunas propiedades de este elemento. El ^{134}Cs y el ^{137}Cs son los isótopos de origen antropogénico (originados por la reacción de fisión del Uranio) más importantes, debido a su vida media y cantidad en el ambiente. El ^{137}Cs es medible de forma indirecta a través de la espectrometría Gamma, un 5.6 % de este decae a un isótopo estable de ^{134}Ba por emisión beta negativa y un 94.4 % a través de un isómero de ^{134}Ba que emite energía en el nivel de los 661 KeV cuya vida media es de 2.55 min. La vida media del ^{137}Cs es de $30,05 \pm 1,00$ años [14].

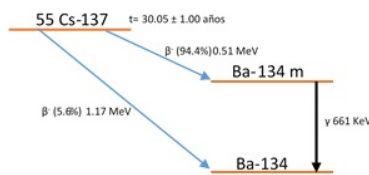


Figura 1.1: Esquema de decaimiento del ^{137}Cs . [14]

Como se mencionó anteriormente el ^{137}Cs es producto de las reacciones de fisión del Uranio tanto en centrales nucleares como bombas atómicas, este se libera al medio, mediante explosiones nucleares, accidentes como el de Windscale en 1957 y Chernobyl en 1986, vertido de desechos radiactivos entre otros. Cabe recordar que la radiactividad del ^{137}Cs es una pequeña fracción de la radiactividad total liberada durante estos eventos. Las características

químicas del ^{137}Cs le permiten fijarse al sedimento fuertemente, por tanto la su movilidad (diagénesis) depende fuertemente de factores físicos [24], y tiene así mismo dependencia de la constitución del suelo. Si la zona no presenta mayores alteraciones a lo largo del tiempo, la actividad del ^{137}Cs debe decrecer con la profundidad de manera exponencial [3]; [15]; [16]. El ^{137}Cs puede viajar grandes distancias a través del aire hasta depositarse en el suelo (principalmente vía húmeda), su distribución en la corteza no es uniforme, las mayores concentraciones se encuentran en el hemisferio norte (lugar de la mayor concentración de ensayos nucleares) especialmente para latitudes medias y altas, en el hemisferio sur el lugar de mayor concentración es la zona central de Australia [10] and [21]. Según datos de UNSCEAR, [13]. Estudios más recientes proveen una reconstrucción para la caída de ^{137}Cs hasta 1970 [1], cuya principal entrada proviene de los test de armas nucleares.

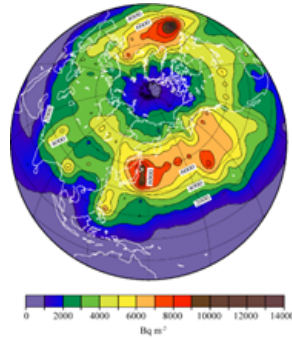


Figura 1.2: Reconstrucción de la caída en el hemisferio norte de ^{137}Cs , hasta 1970 [1]

El método más extendido para la medición de ^{137}Cs es la espectrometría Gamma; siendo el ^{137}Cs un emisor β - puro, su medición se hace de forma indirecta mediante la detección de la línea energética de 661 KeV, proveniente del decaimiento del isómero de ^{134}Ba que tiene una vida media de 2.55 min. La literatura provee un límite de hasta 5 vidas medias para la detección de un radioisótopo, es decir unos 150 años aproximadamente en el caso del ^{137}Cs , aunado al conocimiento de las fechas con pico de deposición (actividades altas) lo hace ideal como trazador en diversas matrices y como apoyo a otras técnicas de fechado.

1.3. Espectrometría Gamma

La espectrometría Gamma consiste en el registro de los espectros de energías emitidos por radionúclidos ya sean de origen natural o artificial. Inicialmente se basó en los detectores de centelleo (NaI, principalmente), en el cual un material receptor de rayos X o Gamma, colecta estos desprendiendo en el proceso fotones en el rango UV o visibles, que son recogidos por un cátodo, en el cual se liberan electrones que se registran como pulsos en el equipo, debido a que estos electrones son pocos, se aumenta su cantidad a través de un tubo conocido como “Tubo fotomultiplicado” en este tubo se disponen estructuras denominadas dinodos. En la actualidad los detectores de estado sólido se han popularizado en los laboratorios gracias a su buena resolución en el campo de las energías, entre los más utilizados están los detectores de Germanio Hiperpuro (HPGe, por siglas en inglés), estos detectores funcionan como transistores contando con una capa deflectora, una emisora y una base, los fotones liberan electrones en el material deflector, estos son colectados por un cátodo, posteriormente el pulso recogido es filtrado y amplificado para ser clasificado acorde a su amplitud y asociado a una energía determinada mediante un analizador multicanal, finalmente a través de software especializado muestra un espectro y genera un documento, usualmente en formato txt. Estos software disponen de diversos programas para analizar la señal que el detector le provee, en función de los radioisótopos que se hayan definido como de interés. Además estos tipos de detectores permiten realizar calibraciones matemáticas empleando el método de Montecarlo, calibraciones empíricas y calibraciones mixtas en las cuales se emplea un software de apoyo capaz de trasladar las curvas de eficiencia de un material a otro. [18]

La espectrometría gamma provee varias ventajas con respecto a sus pares:

- No precisa de procedimientos radioquímicos
- Técnica no destructiva
- Capacidad de medir múltiples radioisótopos.
- Trabaja con muestras grandes o pequeñas (dependiendo del tipo de detector)

Entre las desventajas de la técnica se pueden mencionar.

- Factor de forma menor que las otras técnicas.
- Mayor costo de equipo

- Calibraciones complejas

Al estar basada esta técnica en la interacción de las partículas con la materia habrá ciertos efectos que se deberán tomar en cuenta.

1.4. Interacción de las partículas con la materia

Los fotones al atravesar la materia pueden interactuar de diferentes formas con esta, dependiendo de su energía. En el presente trabajo se da una breve revisión de las tres formas principales de interacción, ya que la profundización en estos no es tema principal de este trabajo.

- Efecto fotoeléctrico
- Efecto Compton
- Aniquilación de pares

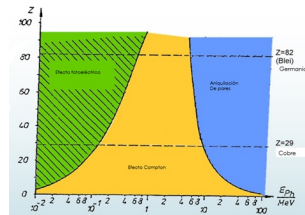


Figura 1.3: Zonas de influencia de los efectos de interacción de la radiación con la materia.

1.4.1. Efecto fotoeléctrico

Se puede definir el efecto fotoeléctrico como “La emisión de electrones desde una superficie sobre la cual incide un haz de luz de frecuencia adecuada” [18]. La energía cinética de los fotoelectrones depende únicamente de la frecuencia del haz incidente, la cual es determinada por la función de trabajo que es la energía requerida para arrancar un electrón de las capas más superficiales. Expresándose lo anterior mediante la fórmula 1.6 y 1.7.

$$k_{max} = eV_0 \quad (1.6)$$

$$E_{foton} = KE_{electron} + \phi \quad (1.7)$$

Es el efecto fotoeléctrico el que se busca principalmente en la espectrometría gamma ya que son los electrones producidos por este los que el equipo detecta. El efecto fotoeléctrico es el dominante en el área de las bajas energías y con los elementos cuyo Z sea superior a 5; para aquellos que se encuentra debajo de 5 predomina el efecto Compton.

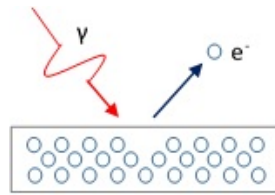


Figura 1.4: Efecto fotoeléctrico.

En este caso puede presentarse un fotopico ubicado en los 28KeV , que es un fotopico de rayo X, este puede generar nuevos efectos fotoeléctricos que cederían toda su energía al cristal o escapa de este y aparecerá un fotopico de rayos X a 28keV menos que el fotopico del elemento puntual que se mide.

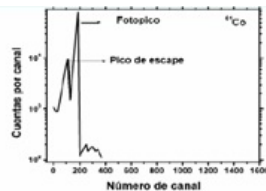


Figura 1.5: Esquema de efecto fotoeléctrico en un espectro gamma.

1.4.2. Efecto Compton

“La radiación incidente sobre un material está formada por cuantos de energía discretos que se mueven en una dirección determinada. Este choca con un blanco y es dispersado por un único electrón del átomo que compone el material del blanco con un ángulo θ , como efecto de esta interacción, el electrón del blanco puede considerarse en reposo; como consecuencia de la interacción el electrón retrocede en una dirección bien definida. El retroceso es proporcional a la energía y el momento del cuanto incidente, que cede

una parte de su energía y momento al electrón. Por conservación de energía y momento sabemos que el cuanto dispersado deberá tener la energía del cuanto incidente menos la energía cinética del retroceso total del electrón. Esto representa para el cuanto incidente una disminución en su frecuencia y un aumento en su longitud de onda” [18]. La frecuencia desde el punto de observación situado en el electrón vendrá dada por la ecuación 1.8, si está en un punto diferente vendrá dado por 1.9:

$$v_e = \left(1 - \frac{v}{c}\right)v \quad (1.8)$$

$$v' = \frac{v_e}{1 - \frac{v}{c}\cos\alpha} = \frac{1 - v/c}{1 - (v/c)\cos\alpha} \quad (1.9)$$

La longitud de onda incidente y dispersada viene dada por 1.10:

$$\lambda' - \lambda = \lambda \frac{v}{c}(1 - \cos\alpha) \quad (1.10)$$

El efecto Compton tiene predominancia en las energías medias. El ^{137}Cs tiene un Z de 55 y emite alrededor de los 661 KeV por tanto se encuentra en la zona de predominancia del efecto Compton, debe tomarse en cuenta que los espectros obtenidos de las muestras poseerán una fuerte componente de este efecto, especialmente aquellos que se denominan radioisótopos largos.

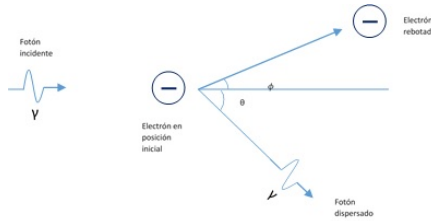


Figura 1.6: Esquema de producción de efecto Compton.

La longitud de onda del fotón dispersado viene dado por 1.11:

$$\lambda_f - \lambda_i = \Delta\lambda = \frac{h}{m_0}(1 - \cos\theta) \quad (1.11)$$

El fotón dispersado puede dar lugar a nuevos efectos Compton y ceder de esta forma toda su energía o escapar del cristal habiendo cedido solo una parte de su energía.

1.4.3. Producción de pares

Este proceso se da únicamente con fotones de alta energía, un fotón incidente atraviesa el núcleo y al hacerlo desaparece y en su lugar se emiten dos partículas, un par electrón positrón en 1022 KeV, por encima de esta energía predominará la producción de pares encontrando también en porcentajes menores los efectos anteriores [18].

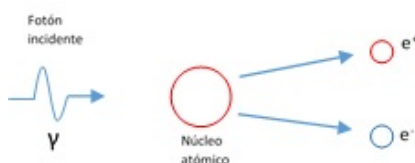


Figura 1.7: Esquema simplificado de la producción de pares.

Por principio de conservación de energía:

$$E_c = (E_\gamma - 1,022)MeV \quad (1.12)$$

La producción de pares incide de varias formas en el espectro gamma:

- El electrón producido cederá su energía a los electrones del cristal y se sumará al efecto Compton.
- El positrón colisiona con un electrón produciendo un efecto de aniquilación y da lugar a dos fotones gamma de 0.51 MeV que se desplazan en direcciones opuestas, sucediendo cuales quiera de las siguientes situaciones:
 1. Si ambos fotones se absorben en el cristal su efecto se suma al fotopico.
 2. Uno de los fotones se escapa del cristal, se produce en el espectro lo que se denomina como pico de escape simple, en 0.51 MeV menos que el fotopico.
 3. Si ambos se escapan del cristal se produce lo que se conoce como pico de escape doble en 1.02 MeV menos que el fotopico.

La ocurrencia de los fenómenos anteriormente descritos depende en gran medida del volumen (tamaño) del cristal y el lugar de este donde ocurra la interacción inicial fotón núcleo.

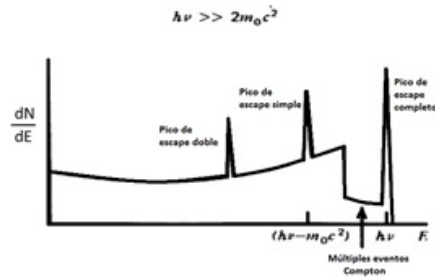


Figura 1.8: Espectro gamma mostrando producción de pares producción de pares.

Cabe mencionar que el fotopico disminuye a medida aumenta la energía del fotón incidente, y desaparece en los 160 KeV. Estos fenómenos a pesar de no ser vistos pueden ser registrados como se menciona anteriormente, a través del uso de un detector.

1.5. Detector

El detector es la pieza central del sistema de espectrometría gamma. Los fotones interactúan con el material del detector y transfieren su energía a electrones o positrones en caso de aniquilación. Esto produce que las partículas pierdan su energía al interior del detector, creando de este modo átomos ionizados y pares de iones. Son estos segundos quienes forman la base de la detección.

Existen diversos tipos de detectores en función de los elementos que los componen, algunos tienen la capacidad de asignar una energía a la radiación que reciben en base a una calibración (Gamma), otros solo se encargan de detectar la presencia de radiación en el ambiente (Geiger). En el presente estudio utiliza un detector de estado sólido.

1.5.1. Detector de estado sólido

Se puede considerar un detector de estado sólido, como un transistor, con una región dopada positivamente, una región empobrecida y una región dopada negativamente. Estos detectores deben trabajar a muy bajas temperaturas, el nitrógeno o un enfriador mecánico son las opciones para lograr estas bajas temperaturas.

Dentro de los detectores de estado sólido uno de los más utilizados es el detector de Germanio Hiperpuro (HPGe, por sus siglas en inglés) de Ortec.

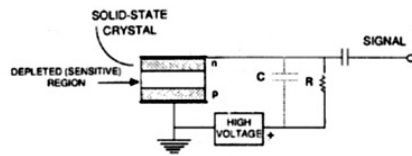


Figura 1.9: Disposición típica de los componentes en un detector de estado sólido. El cristal es una unión pn polarizada inversamente para conduzca al colectar cuando se produzca la ionización la región sensible. La señal se alimenta por lo general a un preamplificador de carga sensible para la conversión a un pulso de voltaje. [18]

Siendo este tipo de detector el empleado en el presente trabajo, un HPGe GEM50P4-83-RB, enfriado vía mecánica con un CFG-X-COOL-III-115.

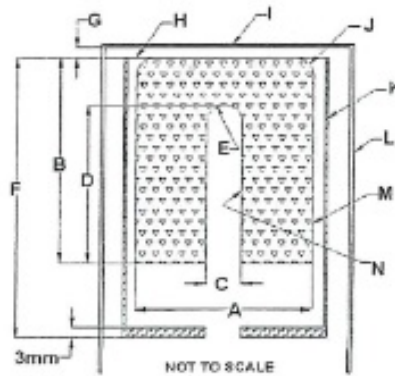


Figura 1.10: Esquema interno del detector, ORTEC. (no está a escala)

La calibración de los sistemas de espectrometría gamma es uno de los pasos fundamentales para la obtención de resultados satisfactorios a la hora de realizar este tipo de estudios. Existen tres métodos de calibración de un espectrómetro gamma: Numérica (método de Montecarlo), empírica (utilizando patrones de calibración) y una semiempírica que emplea una combinación de las anteriores. Los patrones de calibración deben escogerse en función de la matriz y los elementos a medir, para optimizar de esta forma la calibración. Una calibración se puede dividir en tres pasos:

- Calibración de energía: asignación canal vs energía.
- Calibración de resolución: Determinación de la resolución del sistema.



Figura 1.11: Espectrómetro Gamma. [LABTOX]

- Calibración de eficiencia: Relación cuentas vs actividad.

En base a la forma de calibración seleccionada el equipo puede desarrollar todo el proceso de forma automática o semiautomática. Cualquiera de los métodos empleados requerirá de la creación y carga de una librería con los radioisótopos de interés, esta librería debe cargarse con los datos más actualizados disponibles. La fórmula empleada para la calibración en eficiencia 1.13 utilizada por el equipo emplea la cantidad de cuentas, la actividad del radionúclido respecto al tiempo de conteo, la probabilidad de emisión del radionúclido y el tiempo de conteo o live time.

$$\epsilon(E) = \frac{\text{cuentas}}{AP(E)t} \quad (1.13)$$

Donde:

- $\epsilon(E)$ = Eficiencia en energía, absoluta.
- A = Actividad del radionúclido de calibración con respecto al tiempo de conteo.
- $P(E)$ = Probabilidad de emisión del radionúclido en la energía E .
- t = Tiempo de conteo (Live time).

A su vez para la realización de la calibración y medidas en muestras será necesario medir el fondo (ruido ambiente) presente en el lugar donde se encuentra el equipo, estos fondos o background pueden actualizarse cada vez que se introduzca una modificación al lugar de estancia del equipo o cuando

el técnico responsable considere conveniente, entre mayor sea el live time de una medida de fondo será mejor el proceso de determinación de radioisótopos.

La existencia de este fondo radiactivo puede deberse a:

- Radionúclidos naturales (^{210}Pb , ^{226}Ra)
- Propagación de radionúclidos amplios (^{137}Cs)
- La muestra en sí misma
- El espectrómetro en sí mismo
- El ambiente del instrumento
- Radiación cósmica (muones (generación (in)directa de radiación de frenado y de neutrones))
- Decaimiento del radón

En la figura 15 puede apreciarse la forma en que el software del equipo emplea el fondo al momento de determinar la actividad correspondiente a n en la figura 15, de un radionúclido específico. Este localiza el área o grupo de canales de mayor que corresponden a la región B y ancho t_g en la figura 15, luego restando de este las cuentas del fondo z_0 , posteriormente en base a los preset seleccionados toma 1, 3 o 5 canales a cada lado de esta área (región A_1 y A_2 de ancho t_1 y t_2 correspondientemente). Se recomienda en la literatura la utilización de 3 canales ya que con 1 canal estará muy restringido y con 5 canales puede llegar a solaparse con otros fotopicos existentes en los alrededores y que puedan tener energías muy similares.

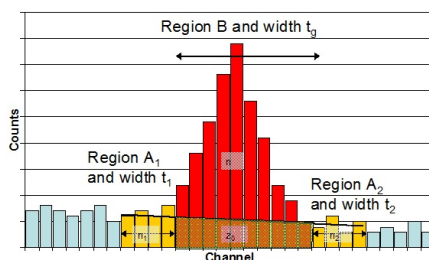


Figura 1.12: Ejemplo de un espectro gamma, en el cual se resta el background para obtener el área total y determinar de esta forma la actividad de la muestra.

1.5.2. Pasos para el análisis de un espectro

Existen un conjunto diferenciado de pasos a realizar a la hora de analizar el espectro generado por el espectrómetro que pueden resumirse en los siguientes:

- Medida
- Búsqueda de picos
- Análisis de picos
- Identificación de nucleídos
- Cálculo de actividad e incerteza
- Determinación de los límites de detección
- Reporte

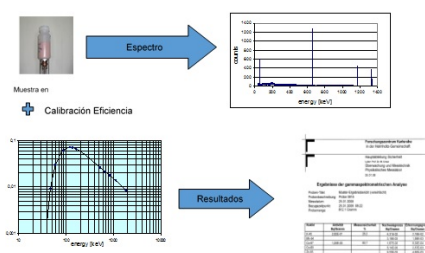


Figura 1.13: Esquema ilustrativo del proceso de medición gamma. [23]

Para la medida del espectro debe antes definirse en base a la matriz y cantidad de muestra un tiempo de medida, que será el mismo para todas las muestras, este se denomina live time, será necesario también el establecimiento del dead time o tiempo muerto, que es el tiempo durante el cual el equipo después de un evento no está disponible para registrar otro evento, usualmente se toma este dead time como el 5 % del live time.

Como se menciona anteriormente el software se encarga de realizar un búsqueda de picos en base a la librería establecida por el usuario, se recomienda establecer una librería solo con los radioisótopos de interés ya que librerías demasiado amplias harán engorrosos la lectura de los reportes, sumado a eso sabemos que habrán muchos radioisótopos que no estarán presentes en la muestra o radioisótopos que posean fotopicos que se solapen y esto pueda dar origen a un problema al obtener la actividad el cual se verá más adelante. Existen dos parámetros utilizados para la búsqueda de fotopicos:

1. Al acercarse al máximo de la curva está es convexa y por tanto la segunda derivada es negativa, teniendo un valor mínimo alrededor del valor máximo del fotopico.
2. Mientras pasa por el fotopico la primera derivada cambia de signo.

El uso de la segunda derivada para localizar automáticamente los fotopicos fue propuesto por Mariscotti [5]. Una vez finalizada la búsqueda de fotopicos el software realiza una comparación de la energía asignada por el multicanal con las energías existentes en la librería que se definió inicialmente, para asignar así el radionúclido correspondiente. Posterior a esto y empleando el background se procede a determinar la actividad del radionúclido mediante la fórmula 1.14, en este caso se emplea el método de determinación tradicional de ORTEC (existen diversos métodos de cálculo de la actividad que se detallan en el manual del software GammaVision de ORTEC).

$$A = \frac{N_c}{p(E) \cdot t_s \cdot \epsilon(E) \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot c_5} \quad (1.14)$$

Donde:

- A: Actividad
- N_c : Número de cuentas
- $p(E)$: Probabilidad de emisión del núcleo
- t_s : Live time
- $\epsilon(E)$: Eficiencia para la energía E
- c_1 y c_2 : corrección por decaimiento
- c_3 : corrección por atenuación
- c_4 : corrección por suma aleatoria
- c_5 : corrección por suma de radionúclidos naturales

Corrección por decaimiento c_1 y c_2

Esta corrección se divide en dos partes C_1 que es la corrección por decaimiento desde la fecha de colecta de la muestra hasta la fecha de inicio de la medición y C_2 que es la corrección por decaimiento durante la medición, fórmulas 1.15 y 1.16. Cabe decir que estas correcciones tiene sentido para

aquellos radionúclidos con vidas medias cortas, usualmente comprendidas de minutos a días.

$$c_1 = \exp\left(\frac{\ln(2t_{diff})}{T_{1/2}}\right) \quad (1.15)$$

Donde:

- c_1 : corrección por decaimiento desde fecha de muestreo hasta fecha de medición.
- t_{diff} : Tiempo de diferencia entre decaimiento desde fecha de muestreo hasta fecha de medición.
- $T_{1/2}$: Vida media del radionúclido.

$$c_2 = \frac{T_{1/2}}{\ln(2t_r)} \left(1 - \exp\left(\frac{\ln(2t_r)}{t_{1/2}}\right)\right) \quad (1.16)$$

Donde:

- c_2 : corrección por decaimiento durante la medición.
- t_r : Tiempo de medición.
- $T_{1/2}$: Vida media del radionúclido.

$$N = N_0 e^{\mu t} = N_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho t} = N_0 \frac{1 - e^{-x\mu}}{x\mu} \quad (1.17)$$

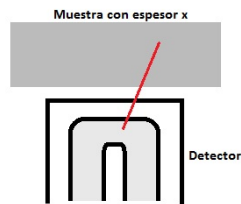


Figura 1.14: Autoabsorción o autoatenuación.

Donde:

- μ : Coeficiente de atenuación lineal.

- ρ : Densidad.
- $\frac{\mu}{\rho}$: coeficiente de atenuación másica.
- x : Espesor de la muestra.

La corrección por tanto viene dada por 1.18 que no es más que el cociente de las probabilidades de detección para la muestra en la matriz x y la probabilidad de detección para la calibración de la geometría.

$$c_3 = \frac{\epsilon_x(E)}{\epsilon_0(E)} \quad (1.18)$$

Donde:

- ϵ_x : Probabilidad de detección para la muestra en la matriz x .
- ϵ_0 : Probabilidad de detección para la calibración de la geometría.

Corrección por suma aleatoria

La suma aleatoria es dependiente del rango de conteo. Esta tendrá lugar cuando los pulsos recibidos en el detector no puedan ser diferenciados por la electrónica del equipo, así un fotopico se registra cuando dos o más gammas entregan su energía al detector en un rango de tiempo que los procesos electrónicos no pueden diferenciar. Paralelo a la suma aleatoria la eficiencia de conteo en el fotopico se verá reducida.

$$C_4 = \exp(-2r\tau) \quad (1.19)$$

Donde:

- R : Rango total de conteo en el espectro de la muestra.
- τ : Tiempo de resolución del sistema de detección.

Corrección por suma de radionúclidos naturales (efecto cascada), c_5

La presencia de este efecto depende del esquema de decaimiento del radionúclido y la eficiencia, pero no de la actividad de la muestra. Tiene lugar cuando un radionúclido emite dos o mas rayos gamma en coincidencia, dentro de un intervalo de tiempo que es extremadamente corto comparado con el tiempo de carga del colector, cuando estos rayos interactúan al mismo tiempo con el detector aparecerá un fotopico de suma en la energía correspondiente

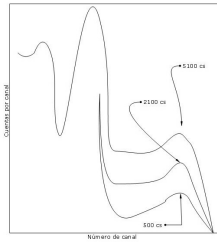


Figura 1.15: Ejemplo de espectro simplificado que presenta suma aleatoria.

a la suma de las energías de los rayos gamma individuales, incrementando también el background en caso de interacción con la dispersión Compton. Un ejemplo habitual es el ^{60}Co , donde dos rayos gamma de 1173.2 y 1335 KeV, son emitidos en secuencia y dan como resultado un fotopico en los 2505.7 KeV. El efecto cascada es directamente proporcional a la eficiencia del detector, es decir a mayor eficiencia, mayor efecto cascada, usualmente en la literatura se menciona que puede cambiar en un 10% la eficiencia del detector.

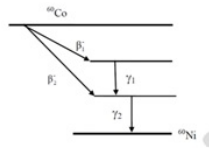


Figura 1.16: Esquema de decaimiento del ^{60}Co con presencia de efecto cascada.

$$C_5 = \frac{\epsilon(E, N)}{\epsilon_x(E)} \quad (1.20)$$

Donde:

- $\epsilon_x(E)$: Probabilidad de detección para la muestra en la matriz x.
- $\epsilon_0(E)$: Probabilidad de detección para el radionúclido N con energía E.

1.5.3. Cálculo de la incerteza

Para el cálculo de la incerteza el software emplea la desviación estándar, considerando la desviación para cada uno de los parámetros que se emplean

en la formula 1.14 para la cuantificación de la actividad del radionúclido. Por tanto se obtiene 1.21 y si no consideramos factores de corrección se llega a (16):

$$\sigma(A) = \sqrt{(\sigma(N_c))^2 + \sigma(p(E))^2 + \sigma(t_s)^2 + \sigma(\epsilon(E))^2 + \sum_{n=1}^5 (\sigma(C_n))^2} \quad (1.21)$$

$$\sigma(A) = \sqrt{(\sigma(N_c))^2 + \sigma(p(E))^2 + \sigma(\epsilon(E))^2} \quad (1.22)$$

1.5.4. Umbral de decisión y límite de detección

Se define el umbral de decisión como el valor para el cual podemos afirmar que el efecto físico medido en un proceso se encuentra presente. A menudo se le denomina también como nivel crítico o nivel de detección, la pregunta básica que se busca responder con este umbral es “¿la actividad es cero o diferente de cero?”. El límite de detección indica el valor verdadero del parámetro más pequeño todavía medible con el procedimiento aplicado. Esto da una decisión sobre si o no el procedimiento es capaz de cumplir los requisitos y por lo tanto es adecuado para el propósito de medición previsto. También se le denomina como actividad mínima detectable (MDA). Este límite busca responder a la pregunta “¿Es posible cuantificar la actividad con una incertidumbre aceptable?”

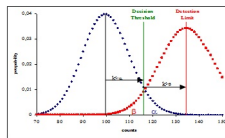


Figura 1.17: Esquema que ilustra la diferencia entre límite de detección y límite de decisión en espectrometría gamma [KIT].

Capítulo 2

Humedales Costeros y Marinos

Se definen como sistemas acuáticos epicontinentales a todos los cuerpos de agua que se encuentran en superficie y se distribuyen por todo el continente. Estos se subdividen en los sistemas lóticos y los lénticos; siendo los primeros aquellos cuyas aguas fluyen como por ejemplo: ríos, arroyos, etc., y los segundos aquellos que presentan aguas estancadas como por ejemplo pantanos, estanques y lagos. Se denominan ecosistemas acuáticos costeros a todos aquellos cuerpos de agua que se encuentran en la zona litoral, manteniendo una comunicación permanente o temporal con el mar y que pueden o no estar conectados a sistemas dulceacuícolas. Esto hace que el tipo de salinidad presente en las aguas de estos sistemas vaya desde salobre hasta típicamente marina [6].

2.1. Humedales Costeros

Marisma

Es un terreno bajo y anegado, localizado a orillas del mar o de los esteros. Se encuentra inundado por las aguas del mar, ya sea por las mareas y sus sobrantes o por el encuentro de las aguas marinas con la desembocadura de los ríos. Presenta vegetación de juncos, hierbas y cañas además de pequeñas lagunas y canales intercalados [4].

Laguna Costera

Es una depresión de la zona costera, ubicada por debajo del promedio mayor de las mareas más altas, que tiene una comunicación permanente o efímera pero protegida de las fuerzas del mar por algún tipo de barrera, la cual puede ser arenosa o formada por islas de origen marino que, en general,

son paralelas a la línea de costa. Son cuerpos de aguas someras y de salinidad variable [4].

Estero

Es un cuerpo de agua formado en un canal natural o en antiguos brazos de un delta de río actualmente cerrado. En sus aguas se alternan períodos de estancamiento y de circulación, determinados por el ciclo diario o estacional de las mareas y por la magnitud y penetración de las corrientes de mareas, lo que origina que sus aguas presenten salinidad variable [4].

Estuario

Es un cuerpo de agua costero semicerrado, con una conexión libre con el mar, dentro del cual el agua de mar se diluye significativamente con el agua dulce que proviene del drenaje terrestre. Se encuentran bordeados y parcialmente cortados desde el océano por masas de tierra, las cuales son perpendiculares a la línea de costa [4].

2.1.1. Humedales marinos

Arrecifes

Se entiende como la gran masa de organismos calcáreos sedentarios, como algas, corales u otras madréporas, que permanecen sumergidas durante la pleamar y sobresale ligeramente en la bajamar. [19].

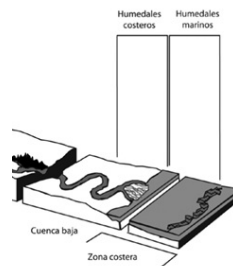


Figura 2.1: Humedales costeros y marinos. Elaboración propia basada en figura 1 Conceptos Fundamentales sobre ecosistemas acuáticos y su estado en México. [4].

Capítulo 3

Sedimentos Marinos

3.1. Ciclogénesis de sedimentos marinos

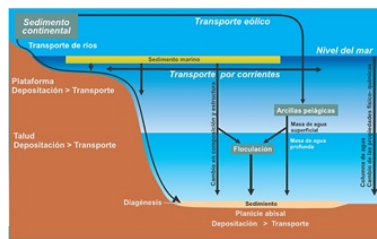


Figura 3.1: Ciclo de sedimentación marina [20].

Los sedimentos que se depositan en el mar pueden tener diversas naturalezas: inorgánicos (minerales, etc), orgánicos (desechos o restos de organismos), estos sufren diversas transformaciones dependiendo del ambiente que atraviesan antes de llegar al océano, por tanto son muy dependientes de las condiciones reinantes de los lugares donde se forman, atraviesan y finalmente se depositan.

3.1.1. Clasificación de los sedimentos

Los sedimentos marinos pueden clasificarse de varias maneras, una de las más aceptadas es la escala Udden - Wenworth [22], mejor conocida como escala Wenworth, la cual se basa en la escala propuesta por Udden. Estas escalas son construidas con dos razones de base: simplificar los análisis estadísticos y estandarizar términos en sedimentología. La escala en cuestión es de tipo geométrico, es decir que para tamaños pequeños proporcionará va-

lores pequeños de la escala y para valores grandes proveerá valores grandes, así mismo es una escala de tipo regular, no cíclica y no decimal.

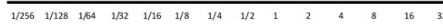


Figura 3.2: Escala Udden - Wenworth. [22]

Otra de las escalas de clasificación es la propuesta en la norma DIN 4022 de 1987, ver 3.3 (sustituída en la actualidad por la ISO 14688), esta norma se divide en secciones para: tamaño de partícula, fracciones de partícula, límites de consistencia y fuentes organógenas.

[μm]	Φ	①	DIN 4022			[mm]
63.000	-6		Cobble	Steine		63
32.000	-5				grob	
16.000	-4		Gravel	Kies	mittel	20
8000	-3	fein			6,3	
4000	-2					
2000	-1				grob	2
1000	0		Sand	Sand	mittel	0,63
500	1				fein	0,2
250	2					
125	3				grob	0,063
63	4		Silt	Schluff (Silt)	mittel	0,02
32	5				fein	0,0063
16	6					
8	7					
4	8					
2	9		Clay	Ton		0,002

① Udden & Wentworth mod. nach Doeglas
 $\Phi = \text{Phi-Grad} = -\log_2(d/d_0)$; $d = \text{Durchmesser}$, $d_0 = 1 \text{ mm Einheitsdurchmesser}$

Figura 3.3: Escala Udden - Wentworth, [8]

Los sedimentos son uno de los registros ambientales más ampliamente utilizados a nivel mundial, junto con los núcleos de hielo y roca para estudiar cambios ambientales y antropogénicos, dependiendo de la metodología a usar pueden inferirse desde unas decenas de años de cambio (^{210}Pb) hasta miles de años (^{238}U , ^{239}U). En el presenta caso se hace uso de la espectrometría gamma para estudiar los niveles de ^{137}Cs acumulado en columnas sedimentarias de la costa de El Salvador.

Capítulo 4

Diseño Metodológico

Dentro de las etapas del diseño metodológico mostradas en la figura 4.1.

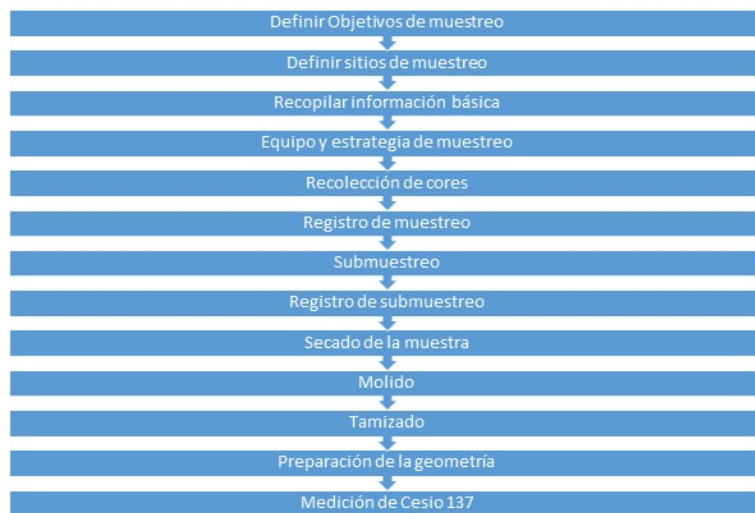


Figura 4.1: Metodología para la medición de ^{137}Cs .

Es importante determinar cuales son los fines del muestreo a realizar, pues de estos dependerán los detalles o pasos siguientes a seguir en el desarrollo metodológico.

4.1. Equipo y estrategia de muestreo

4.1.1. Selección de sitios de muestreo

Como se menciona dentro de la metodología, es necesario estudiar previamente el lugar a muestrear con el fin de verificar que este cumpla con los requisitos necesarios, entre la información con la que se recomienda contar es la siguiente:

- Fotos aéreas o satelitales: Un primer vistazo a la zona de interés, puede ser dado mediante las fotografías satelitales, cabe mencionar que es de importancia contar con fotografías en buena calidad y con un buen margen de tiempo, para estudiar la evolución del sitio seleccionado, con el fin de verificar la ausencia de actividad humana o eventos de modificación severa del sitio.
- Mapa batimétrico: si la extracción de los sedimentos se hará bajo agua, utilizando cualquiera de los nucleadores existentes, es recomendable conocer en que zonas tenderán a depositarse estos, que zonas pueden tener corrientes fuertes o un material no apto para el muestreo.
- Registro de dragados: de utilidad si el estudio se realizará en inmediaciones de estructuras antropogénicas que requieran este tipo de maniobras.
- Hidrodinámica de la zona: esencial para establecer las zonas de mayor calma en el agua y el nivel que alcanza durante la carrera de marea.
- Inventario de focos de contaminación: posible contaminación de las muestras con materiales que afecten los resultados no son deseados, por tanto es necesario conocer estos focos.
- Cuencas hidrográficas: que zonas aportan material a el sitio de muestreo también es de gran importancia, permite conocer que tipo de material se podría encontrar en una inspección.
- Mapa de distribución granulométrica de sedimentos: algunos materiales se fijan mejor a determinados sedimentos, esto dependiendo de su tamaño.
- Mapas de contaminación superficial: un alto índice de contaminación indicaría alta actividad antropogénica.

- Datos de calidad del agua: si el estudio es en cuerpo de agua dulce, este es un buen estudio complementario.

Es preferente que los sitios de muestre cumplan algunas de las siguientes características:

- Depósito preferencial de sedimentos finos (fangosos).
- Una tasa de sedimentación entre 0.25 y 1.0 *cm/y*.
- Una profundidad mínima de 15 m.
- Cierta grado de compactación (evitar el sedimento demasiado poroso, susceptible de resuspensión)
- Condiciones de hipoxia anoxia (contenido de oxígeno disuelto $< 0,1\text{mg/L}$), en las cuales la actividad biológica sea mínima.
- Con el objetivo de evitar los problemas de mezcla, se recomienda evitar los sitios con actividad de dragado conocida; pesca de arrastre, fondeadero de embarcaciones o tránsito de embarcaciones impulsadas con varas en el fondo, así como hacer muestreos en época seca.

Es necesario tomar ciertas recomendaciones generales para un buen muestreo:

- Verificación de objetivos
- No fumar durante el muestreo
- Muestreo en estado estacionario
- Limpieza adecuada del equipo de muestreo. Incluyendo un lavado con agua del sitio de muestreo.
- Parámetros meteorológicos.
- Manejo de núcleos en el campo.
- Superficie horizontal.
- Ausencia de vestigios de mezclado, burbujas de aire o grietas entre otro.

4.1.2. Equipo para muestreo

Dentro del LABTOX-UES, se cuenta con el siguiente equipo para realizar el muestreo:

- Nucleador tipo pushcorer.
- Maza.
- Tapones para nucleador.
- GPS.
- Multiparametros.
- Pala.



Figura 4.2: Nucleador elaborado de forma artesanal con un tubo de 4 pulgadas de diámetro, afilado en un extremo para facilitar el ingreso al suelo.

4.2. Selección de sitios de muestreo

Después de realizar un análisis de varios sitios en la costa, basado en los criterios antes mencionados, se escogieron dos puntos específicos, para la realización de esta investigación, los cuales se detallan a continuación:

4.2.1. Estero de Jaltepeque

El territorio del humedal Complejo de Jaltepeque pertenece a los departamentos de La Paz y San Vicente, se adscribe a la política y administrativamente a los municipios de San Pedro Masahuat, Santiago Nonualco, San Juan Nonualco, Zacatecoluca, Tecoluca y la Herradura principalmente. Recibe también los impactos directos de la población de los municipios inmediatos de San Rafael Obrajuelo, y El Rosario. Los municipios a la vez se dividen en cantones y caseríos.

Su nombre oficial es Complejo de Jaltepeque, se encuentra ubicado a 1.2 km de la desembocadura del río Jiboa, en las coordenadas, $13^{\circ}21'19''N$ y $89^{\circ}2'10''W$, hasta la desembocadura del río Lempa, en las coordenadas $13^{\circ}14'57''N$ y $88^{\circ}49'8''W$. El área total del humedal Ramsar se estima en 49,454 ha [11].

Según el inventario Nacional de Cuerpos de Agua continentales [5], el Estero y el humedal es un cuerpo de agua clasificado como laguna costera con una longitud de 17 m y 1500 m de ancho, que posee un sistema de cañones y brazos angostos de 15 km de longitud, los cuales dan origen a una serie de islas de manglar.

Por otra parte, corresponde con el paisaje de la Planicie Costera, subunidad La Paz y San Vicente, con el gran paisaje de la Cadena Costera, la cordillera El Bálsamo, contenida en la Zona de Vida Bosque Húmedo Subtropical (caliente) [7].

Esta formación está carectizada por la presencia de lodos y arenas finas, partículas que comprenden tamaños entre los $2\mu m$ y los $250\mu m$. Estos parámetros son importantes, ya que el ^{137}Cs es más susceptible de adherirse a partículas finas.

4.2.2. Barra de Santiago

El sistema de humedales Complejo Barra de Santiago recibe su nombre de las dos porciones extremas (este y oeste, respectivamente), de un conjunto de formaciones naturales costeras, localizadas en la región oeste del territorio de El Salvador, fronterizo con la República de Guatemala. Incluye en una zona marino - costera de mar abierto, de 26 km de frente de costa, hasta una profundidad promedio de 5.5 m; en la zona continental se encuentran ecosistemas de manglar, sucesiones de vegetación pantanosa, bosques inundados, arroyos estacionales y permanentes y lagunas de inundación. Incluye dos unidades del Sistema Nacional de Áreas Protegidas: Barra de Santiago, Santa Rita - Zanjón del Chino; así como tres sitios arqueológicos de origen maya - pipil: Isla El Cajete, Isla El Cajetillo y Cara Sucia.

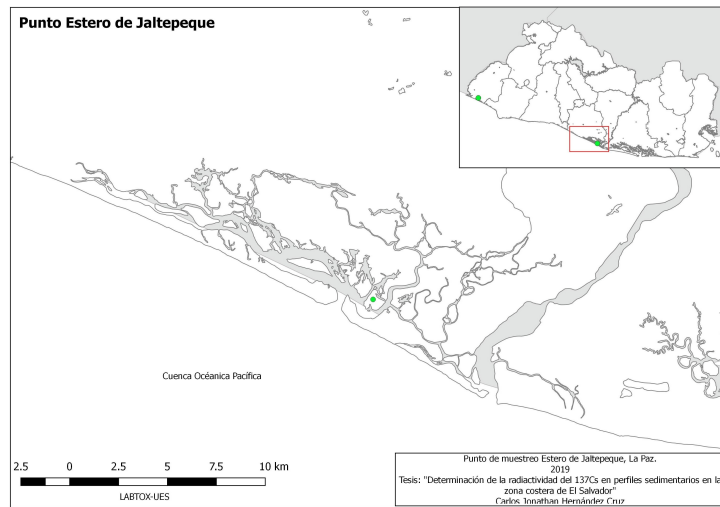


Figura 4.3: Zona de estudio en el Estero de Jaltepeque

Esta conformado por una zona de planicie costera que se extiende desde el pie de la montaña de la cordillera Tacuba - Ataco, coincidente con la carretera Litoral, (CA -2) hasta la costa; y la zona de esteros, formada específicamente por los zanjones El Chino, El Castillo y El Rosario, así como por las islas El Muerto y El Cajete. En general la estructura morfológica de la zona está conformada por una serie de sedimentos finos, intercalados con sedimentos de grosor medio, entre $2\mu m$ y $250\mu m$, con un bajo índice de drenaje, debido al tipo de material y a la proximidad del nivel freático [12].

4.3. Muestreo

Como parte del muestreo se extrajeron dos núcleos de la zona de Barra de Santiago y un núcleo de la zona del estero Jaltepeque, mediante el método de push corer. Estos viajes se realizan en coordinación con los guardarrecursos y la PNC, que estos núcleos fueron transportaos al LABTOX-UES, de forma que no se diera movimientos repentinos, que permitiesen la resuspensión de material.

4.3.1. Extracción de muestras

En ambos sitios de extracción, se contó con el apoyo de personal del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Marn), así como de la

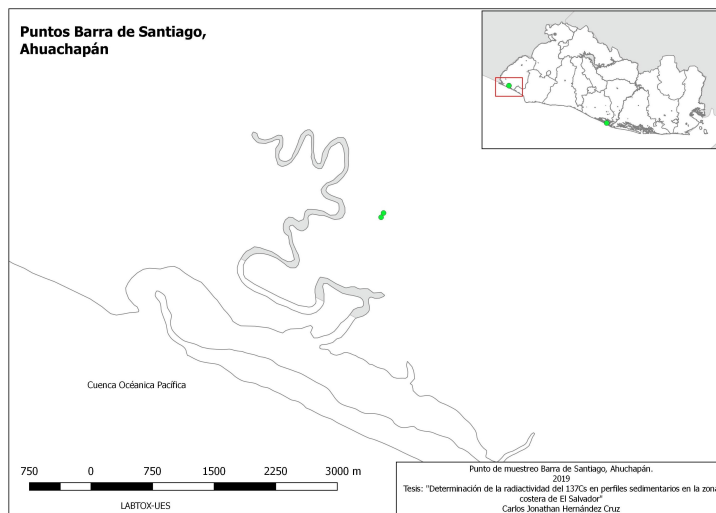


Figura 4.4: Zona de estudio Barrio de Santiago

Policia Nacional Civil, con el fin de tener conocimiento de puntos de muestreo de interés, y no tener dificultades con la visita a estos puntos. Para extraer las muestras se utilizó un corer de presión elaborado de forma artesanal, el cual consistió en un tubo de PVC de 4 pulgadas de diámetro, partido a la mitad de forma transversal, y sellado con cinta para tuberías, este tubo posee un extremo afilado. Se coloca el tubo en posición vertical, colocando un madero en la parte superior, y ejerciendo presión y de ser necesario dando golpes suaves con una almágana, procurando no alterar las capas del material. Una vez alcanzada la profundidad deseada, colocar un tapón en la parte superior, este servirá para evitar que caiga material nuevo en la parte superior del núcleo. Excavar alrededor manteniendo el núcleo de forma vertical, se extrae el núcleo sellando rápidamente el tramo inferior con un tapón para evitar la pérdida de material o la destrucción del núcleo.

Los núcleos se transportaron de forma vertical para asegurar la integridad del núcleo. Contrario al método de ^{210}Pb , el ^{137}Cs no requiere alcanzar el equilibrio radiactivo, es decir que la actividad del núcleo padre, sea igual a la del núcleo hijo. Con esto, el núcleo puede ser procesado inmediatamente al llegar al laboratorio, tomando en cuenta que una vez iniciado el corte, este no puede ser suspendido.

Los pasos para el procesado de la muestra y elaboración de geometrías de medidas que se siguieron son los siguientes:

- Se cortó longitudinalmente un núcleo de sedimento, a la mitad, usando



Figura 4.5: Proceso de extracción de muestras.

hilo nylon, verificando que el hilo pase libremente, de esta forma se comprueba la presencia de cuerpos ajenos al núcleo, como raíces y rocas. Si estos están presentes el núcleo puede no ser idóneo para la realización del estudio.

- Una vez dividido a la mitad, se colocó marcas cada centímetro en el borde del tubo.
- Debido a que el detector requiere cantidades considerables de material, se cortó cada dos centímetros empleando una semiluna de material plástico, colocando ambas submuestras (ambas mitades) en recipientes debidamente etiquetados, con el número de núcleo y de muestras.
- Se pesó la muestra en una balanza de 3 brazos, la cual se calibró previamente para cada muestra, tomando nota de los pesos de cada muestra.
- Se colocó las muestras en un horno desecador (estufa binder), durante 24 horas a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Se escogió una de las muestras como muestra de control, pesando esta muestra, cada hora, pasadas las 24 horas, cuando esta alcanza un peso estable, se termina el proceso de secado, tomando nota de los nuevos pesos
- Se molió 75 g de cada submuestra, con pistilo y mortero, con el fin de obtener un material fino, para la construcción de la geometría.



Figura 4.6: Procesado de muestras.

4.4. Preparación de geometrías de calibración y de medida

4.4.1. Elaboración de geometrías de materiales de referencia

Se realizaron 3 fuentes de basados en los siguientes materiales de referencia: Cloruro de Potasio, IAEA 384 (sedimento de Fangataufa) y DL1a (Patrón de Calibración) del buro Canadiense.

- El Cloruro de Potasio (KCl), contiene ^{40}K un radioisótopo de origen natural. El cual por su abundancia es utilizado como radionuclido de calibración. Es material no tóxico y de fácil acceso.
- IAEA 384, es un material de referencia colectado en la Bahía de Fangataufa, de la Polinesia Francesa, Las muestras fueron colectadas entre 1997 y 1998 para la intercomparación de los radionuclidos de origen natural y antropogénico. Debido a que este material fue colectado cerca de lugares de prueba de armas nucleares, es rico en contenido de radionuclidos antropogénicos, contando con de 1 a 10 bq/kg de emisores gamma, menos de 1 bq/kg de emisores beta y de 1 a 150 bq/kg de transuránicos.
- DL1a, es una roca residual típica de la región de Denison Mines Limited en Elliot Lake, Ontario, y es una arenisca arcosa de color amarillo pálido que contiene uraninita y brannerita y posiblemente trazas de monazita y uranotorita. El material a granel esta molido en seco a menos $74\mu m$, se mezcló, se muestreó sistemáticamente para su análisis por métodos ópticos fluorimétricos y químicos para demostrar la

homogeneidad adecuada para su uso como material de referencia, y se embotelló en unidades de 200 g. Los elementos que constituyen este material de referencia tienen una larga vida media. Hay evidencia disponible de que DL-1a está en equilibrio secular.



(a) Preparación de Geometría (b) Materiales de Referencia (c) Geometrías de referencia

Figura 4.7: Elaboración de geometrías de referencia.

Para la elaboración de las geometrías de medidas, y calibración se marcaron los frascos con la altura debida 5 mm, y con el material molido, se aseguro tener una superficie plana, del mismo espesor en todo el recipiente, ya que una mala distribución puede causar perdida de eficiencia por autoabsorción en la muestra, se selló con una lámina plástica sobre el material y se fijó con cinta adhesiva, rellenando el resto del recipiente con papel, para evitar la acumulación de aire, que puede contener ^{226}Ra que afectaría la medida. Luego se selló el recipiente con cinta teflón y aislante. Etiquetando con su código respectivo.

4.5. Proceso de medida de la muestra

Para la medida de la actividad de ^{137}Cs se empleó el detector de Germanio Hiperpuro HPGe GEM50P4-83-RB, enfriado vía mecánica con un CFG-X-COOL-III-115, cada muestra se midió durante 84600 segundos, con un tiempo muerto del 5%. Este tiempo de medida, fue estimado a partir de la toma de actividad de una muestra o blanco, que fue medida 5 veces, pasado este tiempo, la eficiencia del detector, ya no permitía contabilizar mayor actividad en la muestra. Utilizando 4800 canales del espectro. El fondo o background

empleado en la medida se tomó durante 7 días, con el blindaje cerrado. La programación de estos parámetros se realizó empleando el software GammaVision 7.0, el sistema contó con un respaldo de energía de 30 minutos, en caso de una falla de suministro eléctrico. Al reiniciarse el suministro, el equipo es capaz de retomar la medida en el punto que se detuvo.

4.6. Análisis de la muestra

Para llevar a cabo el análisis del espectro obtenido de cada muestra se utilizó el software GammaVision 7.0, mediante su motor wan32, este motor de análisis realiza una búsqueda de picos basada en la librería cargada previamente en el programa, este motor de análisis busca ubicar un pico en cada energía declarada en la librería, dentro del espectro. Este motor de búsqueda no discrimina entre elementos multipico, por lo que elaborar una buena librería para el análisis.

Se fijaron los siguientes parámetros de configuración para el análisis. Usando 1 sigma en incerteza, ganancia de 1.25, 4800 canales, tiempo de medida o livetime, 84600 segundos; 3 canales a cada lado del pico, para análisis; ROI deshabilitado.

4.7. Cálculo de la incerteza

Para el cálculo de la incerteza el software emplea la desviación estándar, considerando la desviación para cada uno de los parámetros que se emplean en la fórmula para la cuantificación de la actividad del radionúclido. Se obtiene si no consideramos factores de corrección se llega a 4.1.

$$\sigma(A) = \sqrt{(\sigma(N_c))^2 + \sigma(p(E))^2 + \sigma(t_s)^2 + \sigma(\epsilon(E))^2} \quad (4.1)$$

Capítulo 5

Resultados y Discusión

Se analizaron 40 muestras, correspondientes a 20 para el núcleo BS02-TJ y 20 más para el EJ01-TJ, colectados en marzo y noviembre de 2018.

5.1. Contenido de humedad

El método tradicional de determinación de humedad es mediante el horno desecador, donde la humedad de un suelo es expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo y el peso de las partículas sólidas, expresada en la fórmula:

$$w = (Ww - Ws/Ws) * 100 \% \quad (5.1)$$

Donde:

- w =: contenido de humedad expresado en %.
- Ww =: peso humedo de la muestra.
- Ws =: peso seco de la muestra.

5.2. Actividad másica ^{137}Cs

Los valores de actividad de ^{137}Cs rondaron los valores entre $0bq/kg$ y los $2bq/kg$, registrado en el Estero de Jaltepeque, entre los dos puntos de medición, no se observa mayor variación de los valores de actividad másica. Sin embargo los valores de actividad son relativamente bajos, comparables a algunos encontrados en regiones de México (artículo México).

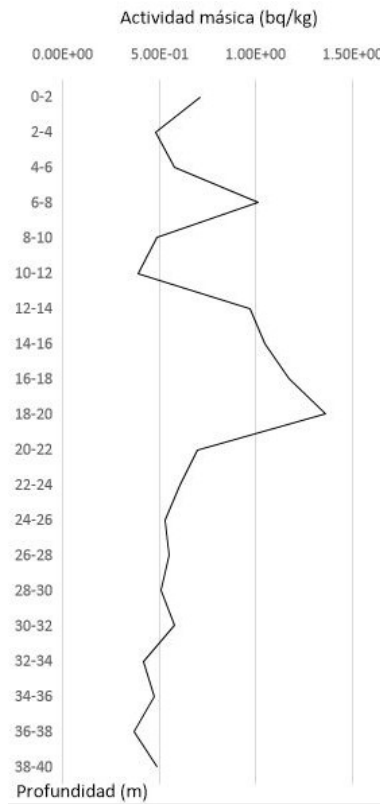


Figura 5.1: Actividad másica de ^{137}Cs en Barra de Santiago.

5.3. Actividad de ^{137}Cs

En cuanto a los niveles de actividad en las muestras, los valores, son usualmente pequeños, entre $2,91e^{-02}$ y $1,01e^{-01}$, recordamos que la principal vía de deposición de este material es la atmosférica. Debido a que no existe una línea base de actividad para este tipo de radioisótopos, no podemos comparar los valores resultados de este estudio, con otros en la región Centroamericana.

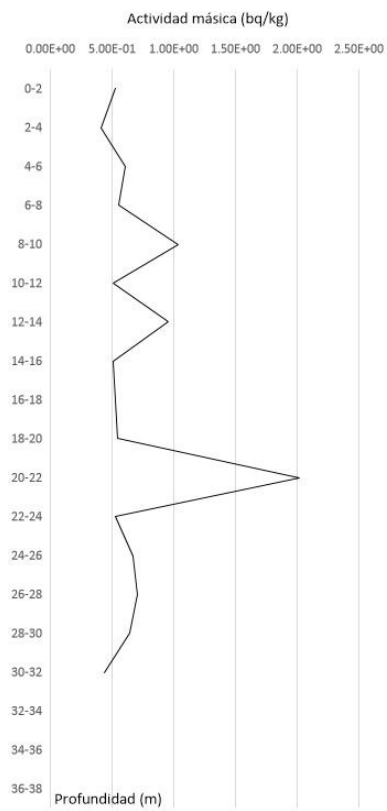


Figura 5.2: Actividad másica de ^{137}Cs en Barra de Santiago.

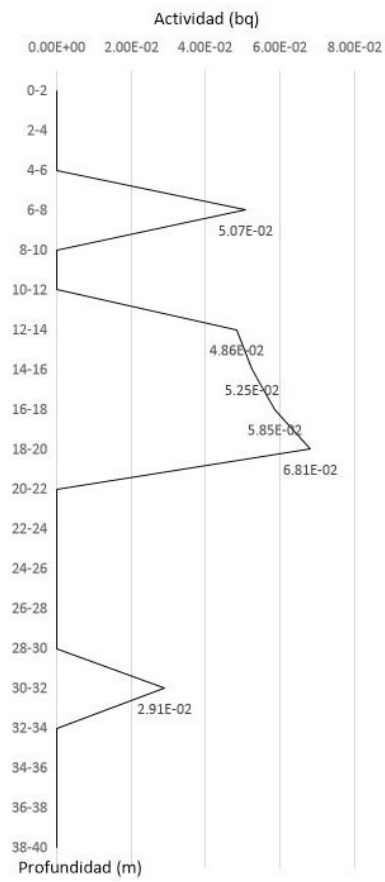


Figura 5.3: Actividad de ^{137}Cs en Barra de Santiago.

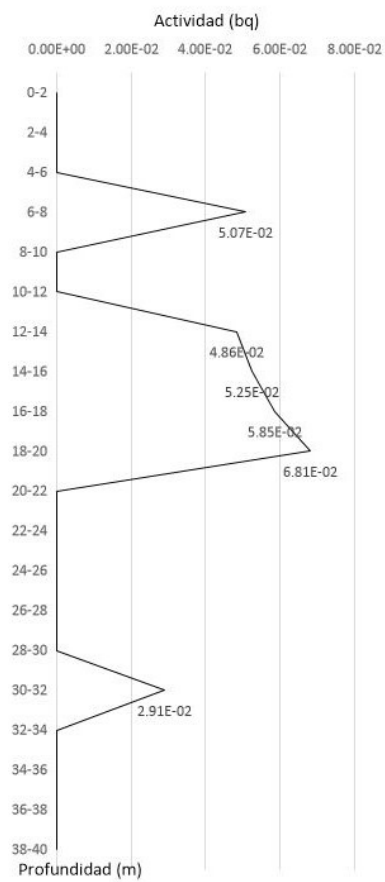


Figura 5.4: Actividad de ^{137}Cs en Estero de Jaltepeque.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Se ha determinado la existencia de ^{137}Cs , pero los valores de incerteza relacionados, son muy elevados, para dar como fiables los datos de actividad. En la mayoría de muestras, el valor medido por el equipo se quedó abajo del límite de decisión.
- Los valores de actividad másica encontrados varían de $5,81E^{-01} \pm 5,60E^{-01} \text{ bq/kg}$ como valor mínimo a $1,17E^{00} \pm 6,91E^{-01} \text{ bq/kg}$ como valor máximo, en el núcleo de Barra de Santiago; y de $6,43E^{-01} \pm 5,78E^{-01} \text{ bq/kg}$ como valor mínimo detectable por el equipo a $2,02E^{00} \pm 1,57E^{00} \text{ bq/kg}$ como valor máximo detectado en el núcleo de Estero de Jaltepeque.
- Para ambos núcleos, Jaltepeque y Barra de Santiago, las actividades máximas se encuentran alrededor de los 20 a 26 cm de profundidad. Siendo el accidente de Chérbobil en el año de 1986, tomando en cuenta el tiempo estimado de desplazamiento hasta América de esta nube, que puede haber tardado alrededor de 1 año podríamos asignar para el núcleo de Jaltepeque el segmento de 22 a 24 cm y el tramo 20 a 22 cm Barra de Santiago, como el año 1987.
- Se tiene la capacidad para la elaboración de este tipo de investigaciones, tanto a nivel de conocimiento, como de equipo.

6.2. Recomendaciones

- Utilizar un detector de pozo, que mejora la eficiencia de detección.
- Calibrar utilizando métodos matemáticos, esto es posible mediante el software Angle 3.0, el cual permite construir geometrías de calibración modeladas, en base a la composición de suelo del lugar de muestreo.
- Realizar fluorescencia de Rayos X a los perfiles sedimentarios, con el fin de obtener la composición exacta de estos.
- Extracción de núcleos en otros puntos de muestreo que cumplan con los requisitos mencionados, con el fin de recrear mejor la distribución en la costa salvadoreña.
- Repetir el muestreo realizado en las zonas delimitadas en esta investigación, con el fin de corroborar los datos obtenidos.

Capítulo 7

Anexos

7.1. Contenido de humedad

Contenido de humedad en núcleo Barra de Santiago.

Profundidad <i>cm</i>	Humedad %
0 – 2	20,42
2 – 4	18,45
4 – 6	20,37
6 – 8	21,47
8 – 10	22,61
10 – 12	25,13
12 – 14	23,66
14 – 16	23,78
16 – 18	23,65
18 – 20	24,18
20 – 22	26,57
22 – 24	24,20
24 – 26	25,26
26 – 28	20,59
28 – 30	25,34
30 – 32	26,16
32 – 34	26,43
34 – 36	26,39
36 – 38	26,48
38 – 40	27,16

Humedad relativa de núcleo Estero de Jaltepeque.

Profundidad cm	Humedad %
0 – 2	56,3
2 – 4	58,2
4 – 6	61,4
6 – 8	59,7
8 – 10	58,5
10 – 12	65,0
12 – 14	56,9
14 – 16	59,0
16 – 18	60,0
18 – 20	58,6
20 – 22	58,6
22 – 24	51,4
24 – 26	50,5
26 – 28	32,6
28 – 30	49,3
30 – 32	56,1
32 – 34	57,6
34 – 36	55,3
36 – 38	51,4
38 – 40	49,1
40 – 42	46,8
42 – 44	44,0

7.2. Tablas de actividad ^{137}Cs

Los valores ND expresados en las tablas, representan muestras donde el límite de detección no fue alcanzado, los valores registrados por el equipo, no son tomados como valores de actividad confiables para el motor de análisis WAN32. Los valores restantes expresados en la tabla, aquellos que cuentan con valor de incerteza y valor de 1 sigma, son valores que alcanzaron el MDA, y queda a discreción del usuario su utilización, es decir deben pasar aún el límite de decisión.

Profundidad (cm)	Radioisótopo	Actividad	E(Kev)	Actividad Pico (bq)	MDA	Actividad Máfica (bq/kg)	Incerteza (bq/kg)	1 sigma (bq/kg) %
0 - 2	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	3,56E ⁻⁰²	7,11E ⁻⁰¹	ND	ND
2 - 4	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,39E ⁻⁰²	4,79E ⁻⁰¹	ND	ND
4 - 6	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,89E ⁻⁰²	5,78E ⁻⁰¹	ND	ND
6 - 8	¹³⁷ Cs	5,07E ⁻⁰²	661,6	5,07E ⁻⁰²	2,98E ⁻⁰²	1,01E ⁰⁰	6,71E ⁻⁰¹	6,73E ⁻⁰¹
8 - 10	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,43E ⁻⁰²	4,86E ⁻⁰¹	ND	ND
10 - 12	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	1,94E ⁻⁰²	3,88E ⁻⁰¹	ND	ND
12 - 14	¹³⁷ Cs	4,86E ⁻⁰²	661,6	4,86E ⁻⁰²	2,89E ⁻⁰²	9,71E ⁻⁰¹	6,31E ⁻⁰¹	6,32E ⁻⁰¹
14 - 16	¹³⁷ Cs	5,25E ⁻⁰²	661,6	5,25E ⁻⁰²	3,76E ⁻⁰²	1,05E ⁻⁰¹	9,45E ⁻⁰¹	9,47E ⁻⁰¹
16 - 18	¹³⁷ Cs	5,82E ⁻⁰²	661,6	5,82E ⁻⁰²	3,56E ⁻⁰²	1,17E ⁻⁰¹	6,91E ⁻⁰¹	6,93E ⁻⁰¹
18 - 20	¹³⁷ Cs	6,81E ⁻⁰²	661,6	6,81E ⁻⁰²	3,15E ⁻⁰²	9,36E ⁻⁰¹	7,36E ⁻⁰¹	7,40E ⁻⁰¹
20 - 22	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	3,50E ⁻⁰²	7,01E ⁻⁰¹	ND	ND
22 - 24	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,64E ⁻⁰²	5,29E ⁻⁰¹	ND	ND
24 - 26	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,75E ⁻⁰²	5,50E ⁻⁰¹	ND	ND
26 - 28	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,54E ⁻⁰²	5,08E ⁻⁰¹	ND	ND
28 - 30	¹³⁷ Cs	2,91E ⁻⁰²	661,6	2,91E ⁻⁰²	2,69E ⁻⁰²	5,81E ⁻⁰¹	5,60E ⁻⁰¹	5,61E ⁻⁰¹
30 - 32	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,08E ⁻⁰²	4,16E ⁻⁰¹	ND	ND
32 - 34	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,36E ⁻⁰²	4,73E ⁻⁰¹	ND	ND
34 - 36	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	1,85E ⁻⁰²	3,70E ⁻⁰¹	ND	ND
36 - 38	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,43E ⁻⁰²	4,86E ⁻⁰¹	ND	ND

Cuadro 7.1: Valores de actividad, actividad máfica, MDA e incerteza para núcleo de Barra de Santiago

Profundidad (cm)	Radioisótopo	Actividad	E(Kev)	Actividad Pico (bq)	MDA	Actividad Másica (bq/kg)	Incerteza (bq/kg)	1 sigma (bq/kg) %
0 - 2	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,03E ⁻⁰²	3,50E ⁻⁰¹	ND	ND
2 - 4	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,67E ⁻⁰²	5,33E ⁻⁰¹	ND	ND
4 - 6	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,06E ⁻⁰²	4,11E ⁻⁰¹	ND	ND
6 - 8	¹³⁷ Cs	00,00E ⁻⁰²	661,6	00,00E ⁻⁰²	3,03E ⁻⁰²	6,07E ⁻⁰¹	ND	ND
8 - 10	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,77E ⁻⁰²	5,55E ⁻⁰¹	ND	ND
10 - 12	¹³⁷ Cs	5,17E ⁻⁰²	661,6	5,17E ⁻⁰²	3,75E ⁻⁰²	1,03E ⁰⁰	8,92E ⁻⁰¹	8,93E ⁻⁰¹
12 - 14	¹³⁷ Cs	00,00E ⁻⁰²	661,6	00,00E ⁻⁰²	2,54E ⁻⁰²	5,07E ⁻⁰¹	ND	ND
14 - 16	¹³⁷ Cs	4,78E ⁻⁰²	661,6	4,78E ⁻⁰²	3,36E ⁻⁰²	9,55E ⁻⁰¹	7,52E ⁻⁰¹	7,54E ⁻⁰¹
16 - 18	¹³⁷ Cs	00,00E ⁻⁰²	661,6	00,00E ⁰⁰	2,57E ⁻⁰²	5,14E ⁻⁰¹	ND	ND
18 - 20	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,65E ⁻⁰²	5,31E ⁻⁰¹	ND	ND
20 - 22	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,72E ⁻⁰²	5,44E ⁻⁰¹	ND	ND
22 - 24	¹³⁷ Cs	1,01E ⁻⁰¹	661,6	1,01E ⁻⁰¹	7,58E ⁻⁰²	2,02E ⁰⁰	1,57E ⁰⁰	1,58E ⁰⁰
24 - 26	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,65E ⁻⁰²	5,31E ⁻⁰¹	ND	ND
26 - 28	¹³⁷ Cs	00,00E ⁻⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	3,36E ⁻⁰²	6,72E ⁻⁰¹	ND	ND
28 - 30	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	3,52E ⁻⁰²	7,04E ⁻⁰¹	ND	ND
30 - 32	¹³⁷ Cs	3,22E ⁻⁰²	661,6	3,22E ⁻⁰²	2,77E ⁻⁰²	6,42E ⁻⁰¹	5,78E ⁻⁰¹	5,79E ⁻⁰¹
32 - 34	¹³⁷ Cs	00,00E ⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,20E ⁻⁰²	4,40E ⁻⁰¹	ND	ND
34 - 36	¹³⁷ Cs	00,00E ⁻⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,30E ⁻⁰²	5,40E ⁻⁰¹	ND	ND
36 - 38	¹³⁷ Cs	00,00E ⁻⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,40E ⁻⁰²	5,52E ⁻⁰¹	ND	ND
38 - 40	¹³⁷ Cs	00,00E ⁻⁰⁰	661,6	00,00E ⁰⁰	2,80E ⁻⁰²	5,60E ⁻⁰¹	ND	ND

Cuadro 7.2: Valores de actividad, actividad másica, MDA e incerteza para núcleo de Estero de Jaltepeque

7.3. Espectros de las muestras

7.3.1. Espectros Barra de Santiago

Espectros del núcleo tomado en Barra de Santiago.

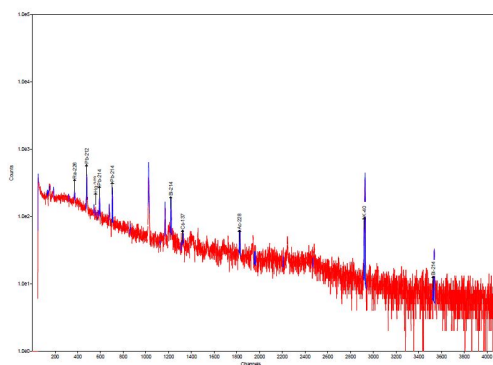


Figura 7.1: Espectro muestra 0 - 2 cm, Barra de Santiago.

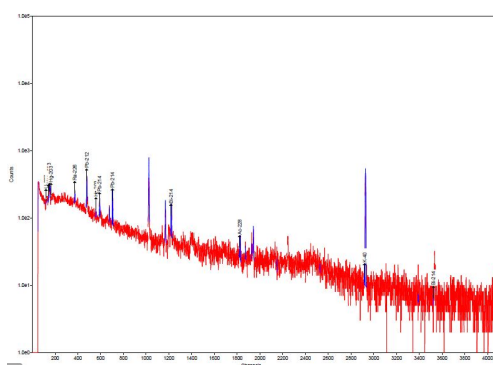


Figura 7.2: Espectro muestra 2 - 4 cm, Barra de Santiago.

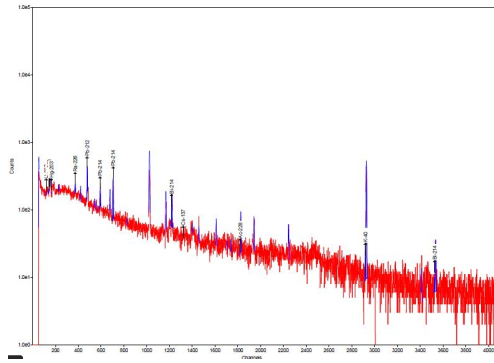


Figura 7.6: Espectro muestra 10 - 12 cm, Barra de Santiago.

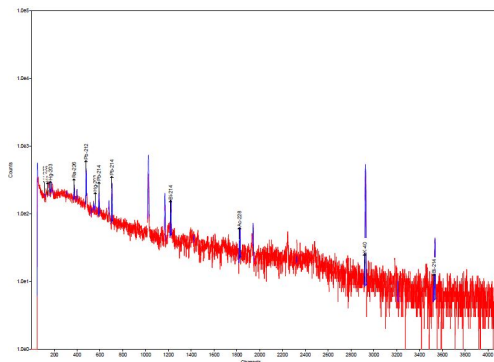


Figura 7.7: Espectro muestra 12 - 14 cm, Barra de Santiago.

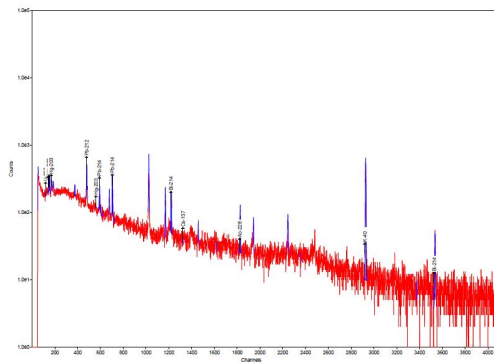


Figura 7.8: Espectro muestra 14 - 16 cm, Barra de Santiago.

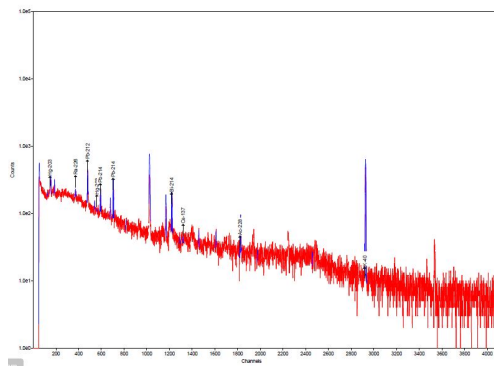
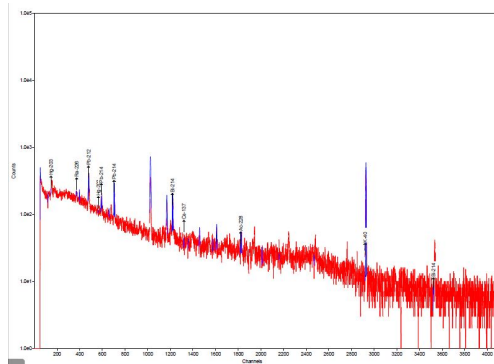


Figura 7.9: Espectro muestra 16 - 18 cm, Barra de Santiago.



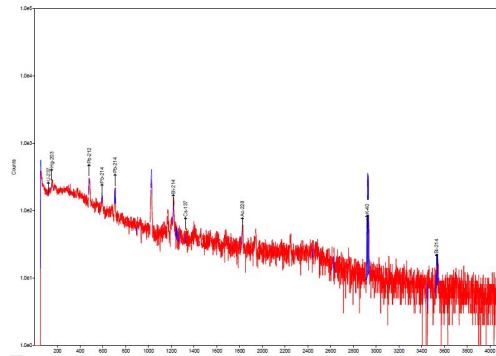


Figura 7.12: Espectro muestra 24 - 26 cm, Barra de Santiago.

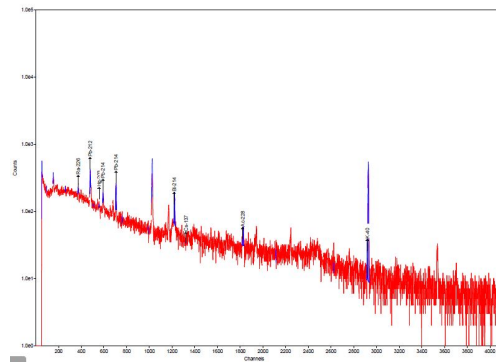


Figura 7.13: Espectro muestra 26 - 28 cm, Barra de Santiago.

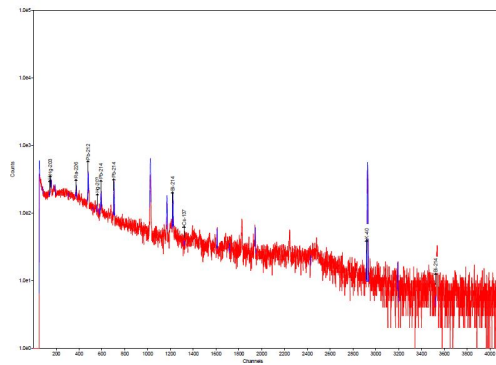


Figura 7.14: Espectro muestra 28 - 30 cm, Barra de Santiago.

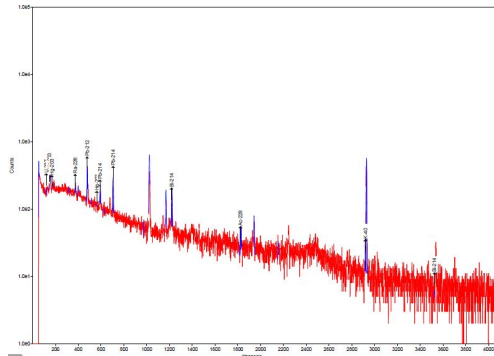


Figura 7.15: Espectro muestra 30 - 32 cm, Barra de Santiago.

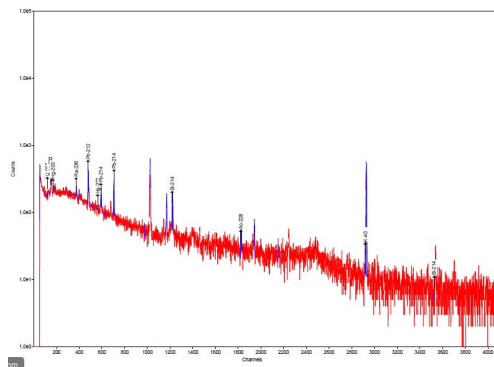


Figura 7.16: Espectro muestra 32 - 34 cm, Barra de Santiago.

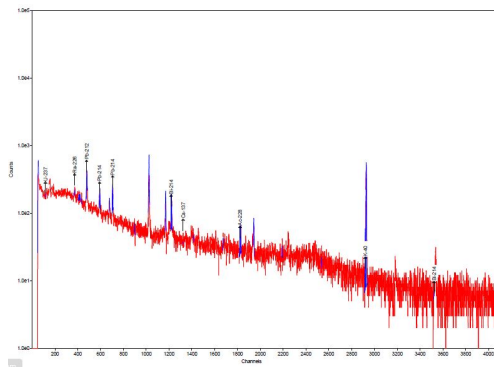


Figura 7.17: Espectro muestra 34 - 36 cm, Barra de Santiago.

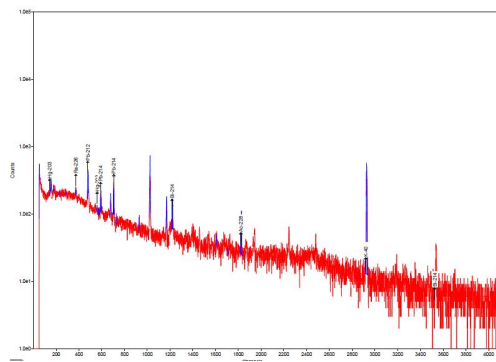


Figura 7.18: Espectro muestra 36 - 38 cm, Barra de Santiago.

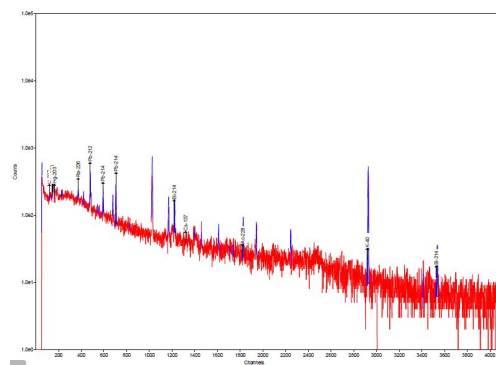
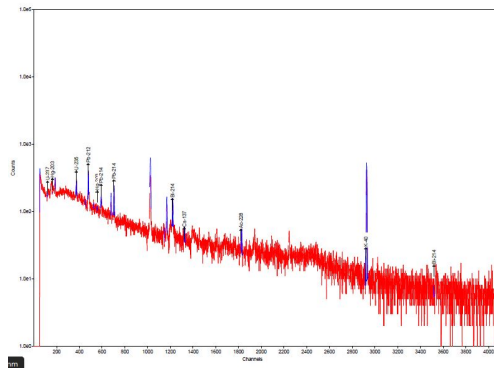


Figura 7.19: Espectro muestra 38 - 40 cm, Barra de Santiago.



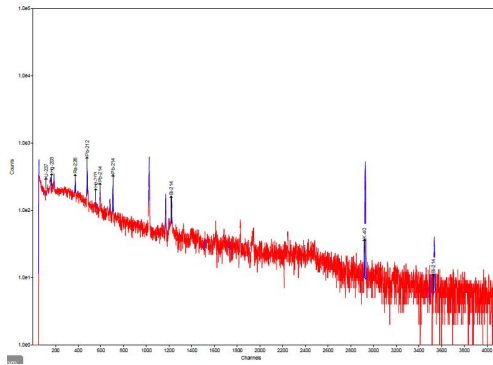


Figura 7.25: Espectro muestra 12 - 14 cm, Barra de Jaltepeque.

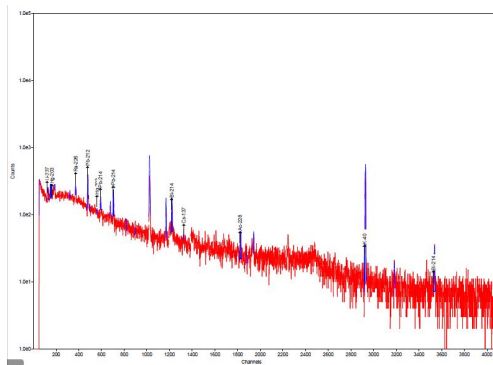
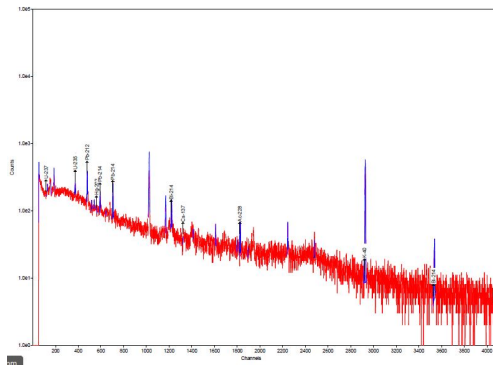


Figura 7.26: Espectro muestra 14 - 16 cm, Estero de Jaltepeque.



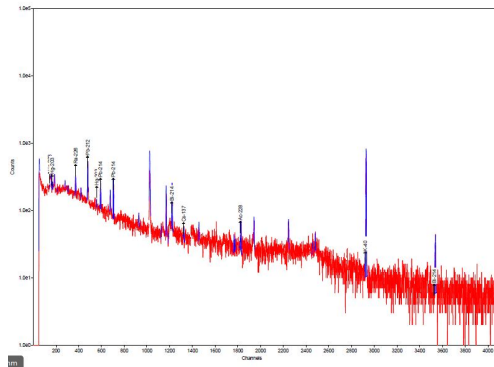


Figura 7.31: Espectro muestra 24 - 26 cm, Estero de Jaltepeque.

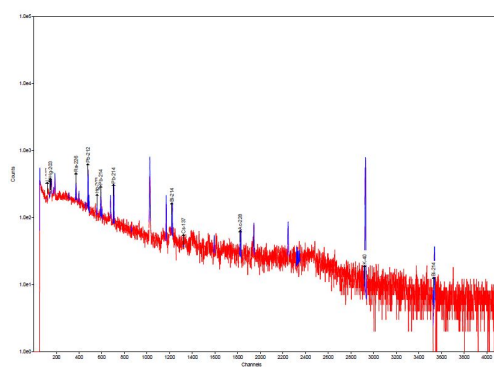


Figura 7.32: Espectro muestra 26 - 28 cm, Estero de Jaltepeque.

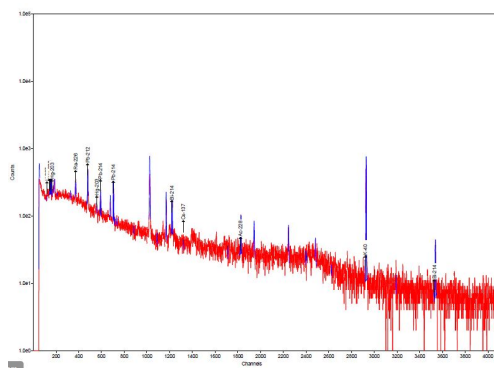
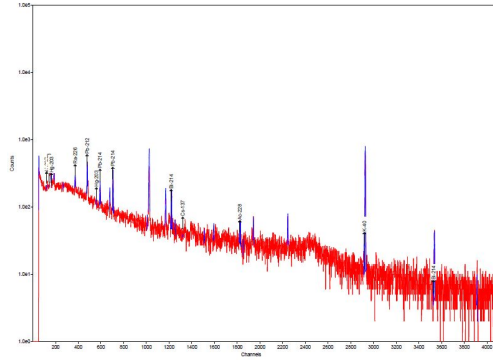


Figura 7.33: Espectro muestra 28 - 30 cm, Estero de Jaltepeque.



Bibliografía

- [1] AOYAMA, M., HIROSE, K., AND IGARASHI, Y. Reconstruction and updating our understanding on the global weapons tests ^{137}Cs fallout. *Journal Environmental Monitoring* (2006).
- [2] ATSDR. Resumen de salud pública. Tech. Rep. 7440-46-2, ATSDR, 2004.
- [3] BECK, H. L. Environmental gamma radiation from deposited fission products 1960 - 1964. *Health Physics* 1, 12 (1966), 313.
- [4] CERVANTES, M. Conceptos fundamentales sobre ecosistemas acuáticos y su estado en México. *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México* (1994).
- [5] DE DIRECCIÓN DE PREPAC, C. *Inventario Regional de los Cuerpos de Agua Continentales del Istmo Centroamericano*, 2005.
- [6] G. BURKE, D. J. M., AND E. GROMAN, H. Protecting Nontidal Wetlands. *American Planning Association (APA), Planning Advisory Service (PAS)*, 412/413 (1988), 76.
- [7] HOLDRIEGE, L. Sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge. *Science*, 365 (1975).
- [8] INSTITUTS FÜR NORMUNG E. V., D. Din 4022. Documento Normas DIN.
- [9] JEFFREY W. RUNGEA, B. R. B. Explosiones y material radiactivo: una introducción dirigida a los profesionales de primera respuesta. *EL-SEVIER* 3, 2 (2010), 63–80.
- [10] J.M. GODOY, L. A., SCHUCHA, D. J. R., NORDEMANN V. R., G., REISA M. RAMALHOA J., C., RECIOA R. R., A., BRITOA, AND OLECHA, M. A. ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb and ^{40}K Concentrations in

- antarctic soil, sediment and selected moss and lichen samples. *Journal of Environmental Radioactivity* 41, 1 (Oct. 1998), 13.
- [11] MARN. Plan de Manejo Humedal Complejo Jaltepeque. Tech. rep., Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2011.
- [12] MARN. Ficha Informativa de los Humedales RAMSAR. Tech. rep., Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013.
- [13] ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION, U. N. S. C. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Tech. rep., UNSCEAR, 2008.
- [14] ORGANIZATION, N. Table de radionucléides. Tech. rep., Nucleid Organization, 2007.
- [15] RITCHIE, J. C., MCHENRY, J. R., AND GILL, A. C. Distribution of fallout Cesium-137 in the upper 4-inches of soil in relation to vegetation type. *ASB Bulletin* (1970).
- [16] RITCHIE, J.C., J. R. M., AND GILL., A. C. Dating recent reservoir sediment using radioactive fallout. *ASB Bulletin* 2, 19 (1972), 95.
- [17] SORIA, A. F. *Física Nuclear y de Partículas*, 2 ed. Universitat de València: Materiales. Universitat de València, 2006.
- [18] TSOULFANIDIS, N. *Measurment and Detection of the Radiation*. CRC Press, 2005.
- [19] UNIVERSITY, O. *Dictionary of English*. Oxford University Press, 2010.
- [20] VÁLDES, J. Composición elemental y contenido de metales en sedimentos marinos de la bahía Mejillones de Sur, Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research* (2009).
- [21] WALLING, D. E., AND HE, Q. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *Journal Environmental Quality* 28, 2 (1999), 11.
- [22] WENWORTH, C. K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *State University of Iowa* (1922).
- [23] WILHEM, C. Gamma Spectrometry and Uncertainties. Karlsruhe Institute of Technology.
- [24] ZAPATA, F. *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides*, 2002.