



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA



***ESPECTROMETRÍA GAMMA IN SITU DE ALTA RESOLUCIÓN
SOBRE ZONAS PETROLERAS DEL ESTADO MONAGAS.***

**Trabajo Especial de Grado presentado
ante la ilustre Universidad Central de
Venezuela por el Br. Juan Enrique Sojo
Farfan para optar al título de Licenciado
en Física.**

Caracas, Abril de 2009

Quienes suscriben, miembros del jurado que examinó el trabajo presentado por el Br. Juan Enrique Sojo Farfán, titulado: “Espectrometría gamma in situ de alta resolución sobre zonas petroleras del estado Monagas” para optar al título de Licenciado en Física, consideramos que dicho trabajo cumple con los requisitos exigidos por los reglamentos respectivos y por lo tanto lo declaramos Aprobado en nombre de la Universidad Central de Venezuela.

Tutor
Dr. Daniel Palacios

Jurado
Dra. Laura Piñero

Jurado
Dr. Hector Constan

**RESUMEN**

Br. Juan Sojo

**ESPECTROMETRÍA GAMMA IN SITU DE ALTA RESOLUCIÓN
SOBRE ZONAS PETROLERAS DEL ESTADO MONAGAS.**

Tutor Académico: Dr. Daniel Palacios. Trabajo Especial de Grado., U.C.V. Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Caracas, 2009, n° pag. (114).

El siguiente trabajo presenta los resultados de una investigación espectrométrica orientada a la posibilidad de verificar la existencia de anomalías en las concentraciones (actividad por unidad de masa) de radionúclidos naturales pertenecientes a las series del U-238, Th-232 y el radionúclido K-40 sobre zonas petroleras del estado Monagas, empleando para ello espectrometría gamma “in situ” con un detector de GeHp (Germanio hiperpuro). En primer lugar se verificó la posibilidad de llevar a cabo la calibración en eficiencia siguiendo la metodología convencional desarrollada por Beck y cols. (Laboratorio de mediciones ambientales, Departamento de energía de los Estados Unidos), luego se verificó la exactitud de las concentraciones determinadas con el programa ISOTOPIC en un campo de prueba comparándolas con las obtenidas mediante la calibración en eficiencia (siguiendo la metodología convencional) y el análisis de muestras de suelo en laboratorio.

Los sitios de medición (estaciones) se ubicaron sobre una transecta de 40 puntos (separados por 250 m) que pasaba por dos pozos petroleros, uno productivo y el otro seco. Ambos pertenecientes al campo petrolero Amarilis. El tiempo de medición en cada punto de la transecta fue de 1800 s.

Se determinó la variación diurna en las tasas de conteo de los radionúclidos de distintos radionúclidos de las series del U-238, del Th-232 y el radionúclido K-40, encontrando una tendencia a disminuir con la hora del día (variación diurna en la tasa de conteo), no obstante dicha disminución fue independiente de la energía del radionúclido.



Se determinaron las concentraciones de los radionúclidos Pb-214 (línea de 352 keV) y Bi-214 (líneas de 609 y 1765 keV) correspondientes a la serie del U-238, los radionúclidos Pb-212 (línea de 239 keV), Tl-208 (línea de 2615 keV) y Ac-228 (líneas de 338 y 911 keV) correspondientes a la serie del Th-232 y el radionúclido K-40 (1461 keV), para todos los puntos de la transecta. Se encontró que, de los radionúclidos estudiados para la serie del U-238, sólo la energía de 609 keV del Bi-214 presentó los menores valores de concentración en las estaciones cercanas al pozo productivo, no obstante este resultado no necesariamente ha de ser atribuible a la presencia de hidrocarburos en el subsuelo.

Se realizó un procedimiento denominado normalización al torio, con el fin de determinar la presencia o no de anomalías producidas por hidrocarburos en el subsuelo y suprimir cualquier efecto producido por la litología de la superficie, la humedad del suelo, la presencia de vegetación y la geometría de conteo. Los resultados obtenidos no mostraron el comportamiento esperado de acuerdo a la teoría sobre la zona del pozo productivo (estación 15), este resultado puede ser debido a las bajas concentraciones del radionúclido K-40 observadas a lo largo de la transecta.

A Dios y a mis Padres: María y Luis



Agradecimientos

En primer lugar le doy gracias a Dios por iluminar mi camino durante mi transcurso en la universidad.

A mi madre, María Farfán, a mis tíos Nelly Farfán y Francisco Farfán, a Luis A. Heredia (padre), a mi hermanos Luis Enrique y Luis A. Heredia (hijo) y Luis A. Sojo por todo el apoyo y confianza que me han brindado a lo largo de la carrera y de la vida.

A la Universidad Central de Venezuela por brindarme la oportunidad de recibir un tesoro de incalculable valor como lo es la educación. A los profesores de la Escuela de Física, en particular a aquellos de los cuales tuve el privilegio de recibir no sólo conocimientos académicos, sino experiencias que me han ayudado a comprender mejor las cosas y que me han mostrado que siempre hay mucho que aprender, entre ellos, la Dra. Yolanda Ng Lee.

A mi tutor académico, Dr. Daniel Palacios, por darme la oportunidad de realizar este trabajo, enseñarme, brindarme ayuda y consejo. Gracias por su apoyo y confianza.

A todos los investigadores, estudiantes y personal del Departamento de Oceanología y Ciencias Costeras del I.V.I.C., especialmente el Dr. Juan Alfonzo, muchas gracias por todos los conocimientos, ayuda y consejos.

Al Laboratorio de Física Nuclear de la U.S.B., por su colaboración y por todo el apoyo brindado.

A la Dra. Lisseta D'Onofrio por su ayuda, colaboración y correcciones.

A los Licenciados Yininber Ávila y Emidio Fusella, gracias por toda su ayuda y colaboración en campo.



Por último y no menos importante, a todos mis amigos, entre ellos: Verónica De Souza, Ernesto Contreras, Luis Dávila, Abner Medina, Dayana Pacheco, Rosmery Gonzáles, Néstor Loyo, Javier Lugo, Marco Carrasquero, Orlando Contreras, Esther Gutiérrez, Ruth Santoyo, Yenny Cerveleón, Jorge Cadavid, Mónica Mancera, Dámaso Gonzáles. Infinitas gracias por su amistad!.



TABLA DE CONTENIDO

Constancia de Aprobación	
Resumen	
Dedicatoria	
Agradecimientos	
	p.p.
<hr/>	
Lista de figuras.....	xi
Lista de tablas.....	xv
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	
1.1.Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	3
CAPÍTULO II	
MARCO GEOLÓGICO Y ÁREA DE ESTUDIO	
2.1. Localización del área de estudio.....	4
2.2. Geología Regional.....	6
2.3. Geología Local.....	10
CAPÍTULO III	
MARCO TEÓRICO	
3.1. Generalidades sobre la radiometría gamma.....	12
3.1.1. Desintegración radiactiva.....	12
3.1.2. Modos de decaimiento.....	12
3.1.3. Tasas de decaimiento	14
3.1.4 Constantes de Decaimiento Total y Parcial	15
3.1.5. Probabilidades de emisión.....	16
3.1.6. Unidades	16
3.1.7. Series de decaimiento	17
3.1.8. Desequilibrio	17
3.1.9. Fuentes Naturales de Radiación	18
	viii



3.1.10. Interacción de los rayos gamma con la materia	21
3.1.11. Atenuación de la radiación.....	24
3.2. Espectrometría Gamma	26
3.2.1. Espectrómetro Gamma	26
3.2.2. Espectro de altura de pulsos	27
3.2.3. Resolución Energética	28
3.2.4. Eficiencia de detección.....	29
3.3. Calibración de sistemas de espectrometría gamma	30
3.3.1. Calibración para espectrometría gamma de suelos “in situ”.....	31
3.3.2. Factores que afectan las mediciones realizadas mediante espectrometría gamma “in situ”.....	31
3.4. Anomalías de la radiación asociadas a la presencia de hidrocarburos.....	34
3.5. Normalización al Torio.....	37

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

4.1. Materiales y Equipos	39
4.2. Metodología	40
4.2.1. Calibración en eficiencia para la determinación de radionúclidos mediante espectrometría gamma “in situ”.....	40
4.2.2. Estudio de anomalías de radiación sobre pozos petroleros.....	47
4.2.3 Determinación de concentraciones de radionúclidos naturales mediante el programa ISOTOPIC (espectrometría gamma in situ).....	50

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. Calibración en eficiencia para la determinación de radionúclidos mediante espectrometría gamma “in situ”.....	56
5.1.1. Determinación de los factores necesarios a fin de llevar a cabo la calibración en eficiencia para mediciones espectrométricas “in situ”.....	56
5.1.1.1. Método convencional desarrollado por Beck.....	56



5.1.1.2. Método semi-empírico (Helfer & Miller).....	64
5.1.1.3. Comparación de las constantes de calibración.....	65
5.1.2. Adquisición en campo de prueba.....	67
5.1.2.1. Verificación de variación temporal.....	67
5.1.2.2. Determinación de la concentración de radionúclidos mediante espectrometría gamma en laboratorio de muestras de suelo.....	71
5.1.2.3. Comparaciones.....	77
5.2. Estudio de anomalías de radiación mediante espectrometría gamma in situ sobre pozos petroleros del campo Amarilis, Edo. Monagas	83
5.2.1. Determinación de líneas energéticas para la cuantificación de las concentraciones.....	83
5.2.2. Determinación de la concentración de radionúclidos en la transecta.....	89
5.2.3. Normalización al Torio.....	92
CAPÍTULO VI	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1 Conclusiones.....	95
6.2 Recomendaciones.....	96
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	97
APENDICES.....	100



LISTA DE FIGURAS

Figura	p.p.
2.1	Ubicación del área de estudio. 5
2.2	Mapa geográfico-geológico de Venezuela que muestra la ubicación de los campos petrolíferos respecto a las cuencas sedimentarias 7
2.3	Mapa estructural de las “Arenas de Naricual”, campo El Furrial 8
2.4	Columna estratigráfica del campo El Furrial 9
3.1	Esquema de desintegración para el ^{226}Ac que decae a ^{226}Ra 16
3.2	Esquema de desintegración del ^{238}U 19
3.3	Esquema de desintegración del ^{232}Th 20
3.4	Esquema de desintegración del ^{40}K 21
3.5	Representación esquemática del mecanismo de la absorción fotoeléctrica 22
3.6	Representación esquemática del mecanismo de la emisión de rayos X característicos..... 22
3.7	Representación ilustrativa del mecanismo de la emisión de dispersión Compton 23
3.8	Representación ilustrativa de los mecanismos de producción y aniquilación del par electrón-positrón..... 24
3.9	Representación esquemática de un sistema de espectroscopia de rayos gamma con detector de GeHp 27
3.10	Ejemplos de espectros de altura de pulsos(a) Espectro diferencial. (b) Espectro integral 28
3.11	Definición de resolución del detector..... 29
3.12	Modelo para alteraciones por microfiltración de hidrocarburos..... 36
4.1	Campo de prueba 43
4.2	Recolección de muestras 44
4.3	Sitios de muestreo en el campo de prueba..... 44
4.4	Materiales de referencia certificados en envases de polietileno de alta densidad de 1L de capacidad y altura de muestra de 7,2 cm..... 45
4.5	Disposición del detector gamma para la medición de muestras en laboratorio .. 46



4.6	Ubicación de la Transecta.....	48
4.7	Nivelación del trípode	49
4.8	Adquisición gamma espectrométrica	49
4.9	Programa ISOTOPIC (supervisor). Selección de la determinación a realizar (concentración de radionúclidos en suelos, soil mode).....	51
4.10	Programa ISOTOPIC (operador). Especificación de las características del detector necesarias para el cálculo de eficiencias.....	52
4.11	Programa ISOTOPIC (operador). Especificación de distribución de radionúclidos en el suelo ($\alpha/\rho = 0$) y biblioteca de radionúclidos a utilizar (1 Meter)	53
4.12	Programa ISOTOPIC (operador). Descarga de espectro de campo en la memoria (Buffer) del programa.....	54
4.13	Programa ISOTOPIC (operador). Reporte de radionúclidos presentes y su concentración.	55
5.1	Ajuste de los valores experimentales de N_0/ϕ a una recta	58
5.2	N_0/ϕ vs Energía para distintos detectores	60
5.3	N_0/ϕ vs Energía para detectores de Ge, tipo p y tipo n	61
5.4	N_p/N_0 vs Energía obtenida por Helfer y Miller	62
5.5	Ajuste de los valores de flujo no dispersado obtenidos por Beck & cols	63
5.6	Comparación entre error relativo porcentual de las constantes de calibración (Metodología Beck) y diferencia relativa porcentual	66
5.7	Ilustración de la determinación de las tasas de conteo de los picos de absorción total, empleando el programa MAESTRO-32.....	68
5.8	Conteos netos para los radionúclidos de la serie del U-238 en función de la hora del día	69
5.9	Conteos netos para los radionúclidos de la serie del Th-232 en función de la hora del día.....	69
5.10	Conteos netos para K-40 en función de la hora del día.....	70
5.11	Concentraciones para las energías de los radionúclidos de la serie del U-238, para varios espesores de suelo.....	72
5.12	Concentraciones para las energías de los radionúclidos de la serie del Th-232,	75



	para varios espesores de suelo.....	
5.13	Concentración del K-40, para varios espesores de suelo	71
5.14	Comparación entre error relativo porcentual de los valores de concentración de radionúclidos determinados mediante el Programa ISOTOPIC respecto a los determinados usando las constantes de calibración	79
5.15	Comparación entre error relativo porcentual de los valores de concentración de radionúclidos determinados mediante el Programa ISOTOPIC respecto a los determinados mediante el análisis de muestras de suelos en laboratorio	79
5.16	Concentración de radionúclidos en función de la energía para los radionúclidos de la serie del U-238.....	80
5.17	Concentración de radionúclidos en función de la energía para los radionúclidos de la serie del Th-232.....	81
5.18	Conteo neto vs. Estación de medición para los radionúclidos de interés pertenecientes a la serie del U-238.....	83
5.19	Conteo neto vs. Estación de medición para los radionúclidos de interés pertenecientes a la serie del Th-232.....	84
5.20	Dependencia de las áreas netas en los picos de absorción total con la hora de medición de los espectros para diferentes energías gamma de radionúclidos de la serie del U-238.....	86
5.21	Dependencia de las áreas netas en los picos de absorción total con la hora de medición de los espectros para diferentes energías gamma de radionúclidos de la serie del Th-232.....	87
5.22	Dependencia de las áreas netas relativas con la hora de medición de los espectros para diferentes energías gamma de radionúclidos de la serie del ^{238}U ...	87
5.23	Dependencia de las áreas netas relativas con la hora de medición de los espectros para diferentes energías gamma de radionúclidos de la serie del ^{232}Th .	88
5.24	Concentración vs. Estación de medición para radionúclidos de la serie del U-238.....	89
5.25	Concentración vs. Estación de medición para radionúclidos de la serie del Th-232.....	90
5.26	Concentración vs. Estación de medición para K-40.....	90



5.27	Normalización al Torio empleando los radionúclidos Pb-212 (239 keV) y Pb-214(352 keV).....	92
5.28	Normalización al Torio empleando los radionúclidos Pb-212 (239 keV) y Bi-214(609 keV).....	93
5.29	Normalización al Torio empleando los radionúclidos Ac-228 (911 keV) y Bi-214(609 keV).....	93
A-1	Ilustración de la emisión isotropita de rayos gamma provenientes de una fuente radiactiva ubicada en P	101
A-2	Comparación entre los valores de eficiencias geométricas obtenidas mediante simulación Monte Carlo y la ecuación A-1 para una fuente puntual colocada a diferentes distancias fuente detector	102
A-3	Eficiencias geométricas para fuentes con forma de disco con radio entre 0.5 y 2.5, a diferentes distancias fuente- detector.....	103
A-4	Ilustración de los parámetros involucrados en el cálculo de las eficiencias geométricas. Caso donde las coordenadas de P satisfacen la condición $x > r_d$ y $\leq l_d/2$	107
A-5	Ilustración de los parámetros involucrados en el cálculo de las eficiencias geométricas. Caso donde las coordenadas de P satisfacen la condición $x > r_d$ y $> l_d/2$	108
A-6	Ilustración de los parámetros involucrados en el cálculo de las eficiencias geométricas. Caso donde las coordenadas de P satisfacen la condición $x \leq r_d$ y $> l_d/2$	109
A-7	Dependencia angular de la eficiencia geométrica para diferentes distancias fuente detector	110
A-8	Coefficientes de atenuación másico vs. Energía de la radiación gamma para el aire	111
A-9	Configuración del detector para las mediciones.....	112
A-10	Espectro de rayos gamma para la fuente ^{60}Co ubicada a dos distancias fuente-detector	113



LISTA DE TABLAS

p.p.

Tabla

I	Fuentes gamma disponibles	56
II	Radionúclidos de interés	57
III	Valores calculados de N_o/ϕ para las energías de las fuentes disponibles.....	57
IV	Valores calculados de N_o/ϕ para las energías de los radionúclidos de interés.....	59
V	Valores calculados de N_f/N_o para las energías de las fuentes disponibles.....	62
VI	Valores de ϕ/A para las energías de los radionúclidos de interés	63
VII	Valores de N_f/A para las energías de los radionúclidos de interés	64
VIII	Valores de N_f/A para las energías de los radionúclidos de interés, obtenidos mediante la metodología desarrollada por Helfer & Miller	65
IX	Probabilidades de emisión para las energías de los radionúclidos de interés	70
X	Comparación entre las concentraciones obtenidas mediante el programa ISOTOPIC y el análisis espectrométrico de muestras de suelos en laboratorio	78
XI	Contraste de significación entre las concentraciones de radionúclidos obtenidas mediante el programa ISOTOPIC, mediante la metodología convencional (Beck y cols.) y mediante la medición de muestras de suelos en laboratorio.....	82
XII	Parámetros de regresión lineal del ajuste de los datos de áreas netas en los picos de absorción total versus hora de medición del espectro	85
A-1	Comparación entre las tasas de conteo de los picos de absorción total (Para las fuente ^{60}Co y ^{137}Cs) a 1 metro de distancia fuente- detector, bajo la condición de incidencia normal.....	114



CAPÍTULO I

Introducción y Objetivos

1.1.- Introducción

La radiactividad, que está presente de forma natural en todos los lugares de nuestro planeta y del universo, y forma parte esencial de nuestro entorno, fue descubierta a finales del siglo XIX por **Henri Becquerel** quien descubrió, en marzo de 1896, unas radiaciones invisibles y penetrantes, espontáneamente emitidas por el uranio. Demostró que esos "rayos uránicos" impresionaban las placas fotográficas y hacían que el aire condujera la electricidad. En tanto que Ernest Rutherford observó que el comportamiento anómalo de elementos radiactivos era debido al hecho de que se transformaban en otros elementos y que producían radiaciones alfa, beta y gamma.

Dentro del amplio espectro de radiaciones electromagnéticas, los rayos gamma son de origen nuclear, es decir se producen al ocurrir la desexcitación de niveles energéticos nucleares. La radiación gamma emitida por un núcleo atómico presenta una energía muy bien definida que es característica de cada elemento radioactivo. Con el fin de caracterizar esta radiación gamma y, por tanto, el radionúclido que está presente en una muestra ambiental, se utiliza un material semiconductor como detector. La interacción de la radiación gamma con el semiconductor produce todo un conjunto de procesos físicos, que son transformados en señal eléctrica por un espectrómetro gamma.

Debido a su alto número atómico, el Ge es el detector más utilizado, ya que permite la detección de radiaciones gamma con alta resolución energética. El vocablo *in situ* es tomado del latín y se traduce como "en el lugar de origen". De esta manera, dado un sitio en donde se estudian los niveles de radiactividad el término "espectrometría gamma *in situ*" implica que el espectro de rayos gamma ambiental será tomado en ese lugar, para luego ser analizado a fin de identificar y cuantificar los radionúclidos presentes [1].



El fenómeno de la radiactividad ha dado lugar a múltiples estudios científicos y aplicaciones en diversas áreas científicas como por ejemplo la medicina, la ingeniería de materiales, la geofísica, etc.

En el campo de la geofísica la radiactividad ha sido utilizada como una herramienta de reconocimiento y método auxiliar en la exploración petrolera. Ello debido a que las unidades sedimentarias típicamente asociadas con las zonas que producen petróleo pueden ser identificadas observando la variación en la actividad de los radionúclidos con respecto a la de los alrededores [2]. Los patrones radiactivos sobre depósitos de petróleo, causados por los cambios geoquímicos debido a la presencia de hidrocarburos, se han estudiado con interés desde la primera mitad del siglo XX.

En cuanto a su aplicación en la exploración petrolera se tienen como antecedentes: 1) Saunders y cols. ([3], [4]) realizaron radiometría aérea y terrestre sobre campos petroleros en Texas (E.E.U.U.) y Derby (Australia) encontrando disminuciones en las concentraciones de Uranio y Potasio. 2) Yanaki y Ashery [5], realizaron estudios radiométricos en los campos petroleros Helez y Kochav (Israel) hallando anomalías radiactivas negativas debido a la disminución de ^{238}U , ^{40}K y ^{232}Th . 3) Matolín y Stranik [2], realizaron estudios de radiactividad en el suelo del campo petrolero Zdanice (Rep. Checa) utilizando espectrometría gamma *in situ* con un detector de NaI(Tl) encontrando anomalías radiactivas negativas en las zonas donde existían depósitos de hidrocarburos.

La principal ventaja de usar Germanio como detector de rayos gamma es su alta resolución energética (mayor que 20 veces la correspondiente a la de detectores de yoduro de sodio que son los que comúnmente se han utilizado hasta la actualidad). La mejora en la resolución energética al utilizar detectores de Ge hiperpuro permite obtener las relaciones entre los isótopos gamma emisores dentro de una serie o entre las series naturales, las cuales caracterizarán las reservas y constituyen sus potenciales indicadores.

En cuanto a la aplicación de la espectrometría gamma *in situ* de alta resolución como técnica de exploración petrolera en Venezuela no se conoce antecedente alguno.



1.2.- Objetivos:

Objetivo General

Verificar la existencia de anomalías de concentración de radionúclidos sobre pozos petroleros productivos mediante la aplicación de espectrometría gamma *in situ*.

Objetivos Específicos

- Evaluar la posibilidad de llevar a cabo la calibración en eficiencia para mediciones gamma espectrométricas *in situ* mediante el método convencional (Beck y cols.)[6].
- Verificar la exactitud de las concentraciones de radionúclidos determinadas con el programa ISOTOPIC comparándolas con los valores de concentración de radionúclidos en un campo de prueba mediante la calibración en eficiencia por el método convencional y el análisis de muestras de suelo en laboratorio.
- Evaluar la influencia de la hora del día sobre las mediciones gamma espectrométricas *in situ*.
- Participar en la organización de la logística y en la adquisición de los datos radiométricos.
- Analizar e interpretar los espectros gamma obtenidos en el experimento de campo.



CAPÍTULO II

Marco Geológico y Área de estudio

2.1.- Localización del área de estudio:

Los sitios de medición (estaciones) se ubicaron sobre una transecta de 40 puntos (separados por 250 m) que pasaba por dos pozos petroleros, uno de ellos PRODUCTIVO y el otro SECO, en las inmediaciones del caserío Amarilis, El Gomero, Pepe y San Pedro; específicamente en las fincas La Soledad, Carinagua, Queremere y Agro Brasil, todas perteneciente al estado Monagas (Figura 2.1). Estos pozos exploratorios se realizaron tomando como base los estudios geológicos y geofísicos que apuntaban a una gran probabilidad de éxito como fuentes económicamente rentables de petróleo.

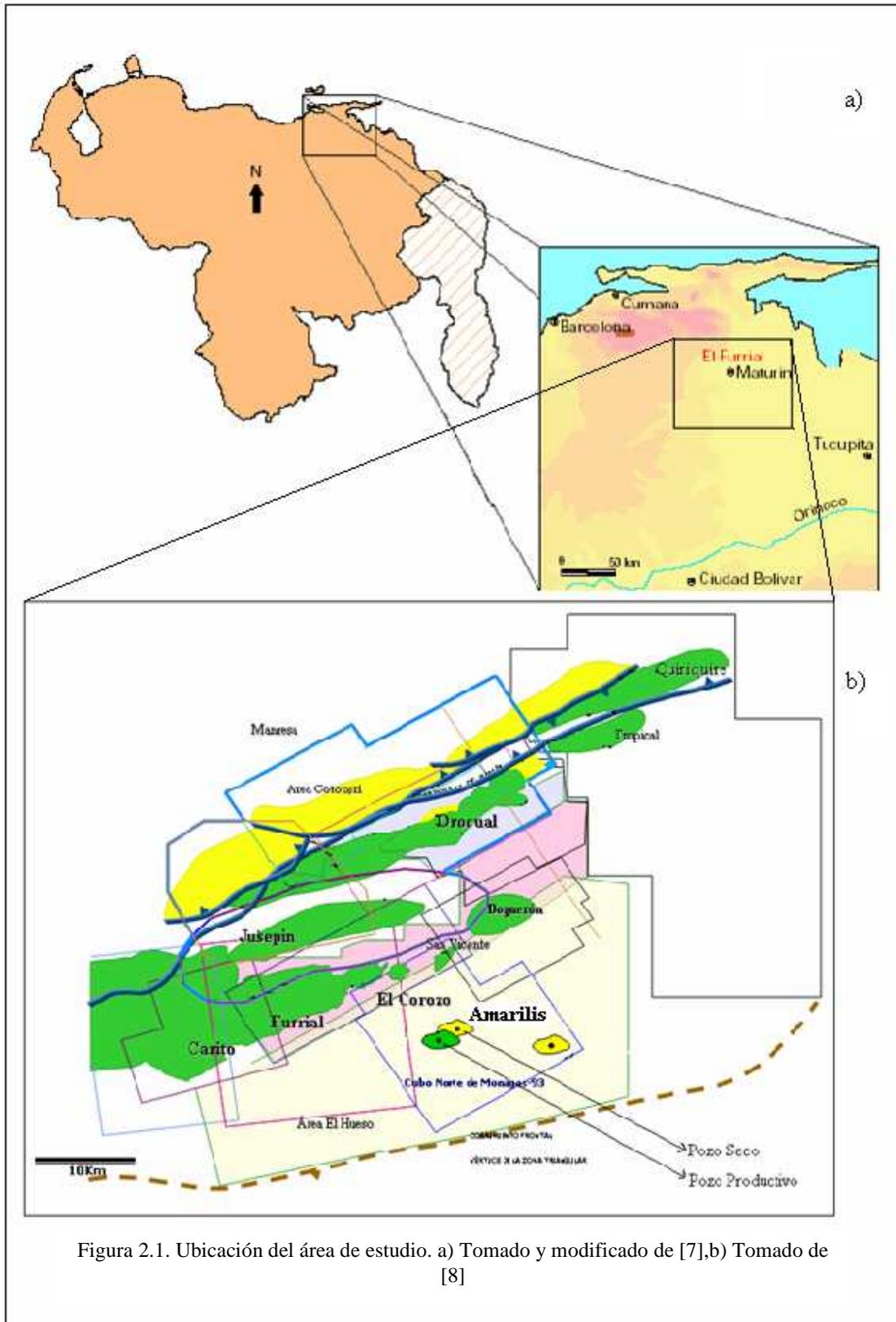
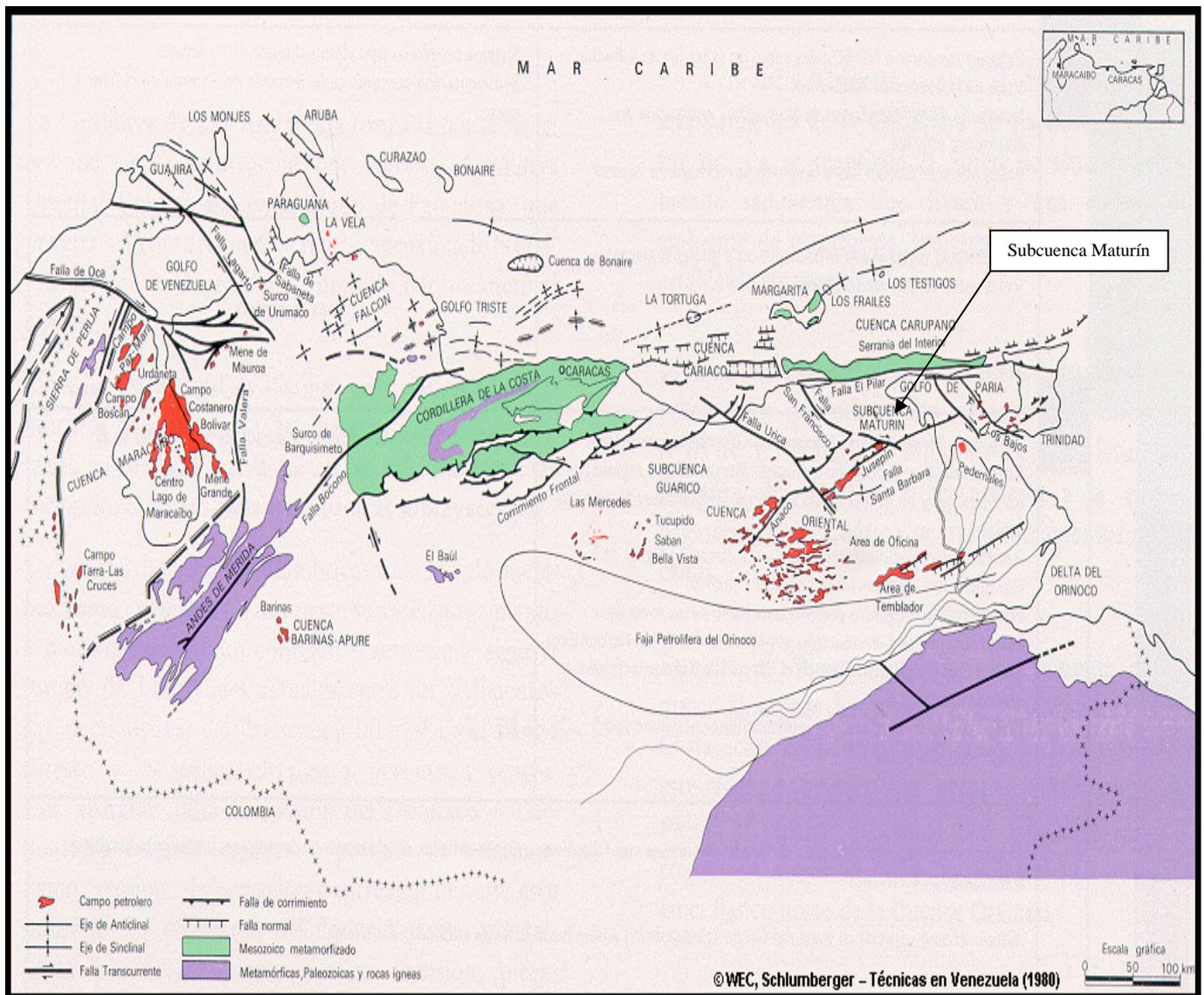


Figura 2.1. Ubicación del área de estudio. a) Tomado y modificado de [7], b) Tomado de [8]



2.2.- Geología Regional:

Como puede observarse en la Figura 2.2 el área de estudio se encuentra dentro de la subcuenca de Maturín, hacia el área norte de Monagas, cuyos principales campos petroleros son: Jusepín, Santa Bárbara, Mulata/Carito y El Furrrial, todos estos productores de crudos livianos; en tanto que Orocuál y Manresa figuran como productores de crudos medianos a pesados (Formación Las Piedras) y, hacia el Delta Amacuro, el campo de Pedernales (pesado/ mediano, Formación La Pica).



MAPA GEOGRÁFICO - GEOLÓGICO DE VENEZUELA QUE MUESTRA LA UBICACIÓN DE LOS CAMPOS PETROLÍFEROS RESPECTO A LAS CUENCAS SEDIMENTARIAS

Figura 2.2. Mapa geográfico-geológico de Venezuela que muestra la ubicación de los campos petrolíferos respecto a las cuencas sedimentarias. Tomado de [7].

El área de estudio (Amarilis) pertenece al grupo de campos de El Furrial, el cual desde el punto de vista geológico presenta las siguientes características:

a) Estructuralmente:

La estructura en el tope de las areniscas oligocenas, es decir, el tope de la acumulación, es la de un anticlinal asimétrico de 10 km de ancho por 8 de largo y de rumbo N 70° E. El buzamiento del flanco norte varía entre 18 y 24° y el del flanco sur entre 16 y 21° (Figura 2.3).. Este anticlinal está cortado en sus flancos por fallas inversas aproximadamente paralelas al eje de la estructura: las del flanco norte con el lado descendido al norte y las del flanco sur con el lado descendido hacia el sur. Un sistema de fallas normales de lados descendidos al este cortan transversalmente la estructura [7].

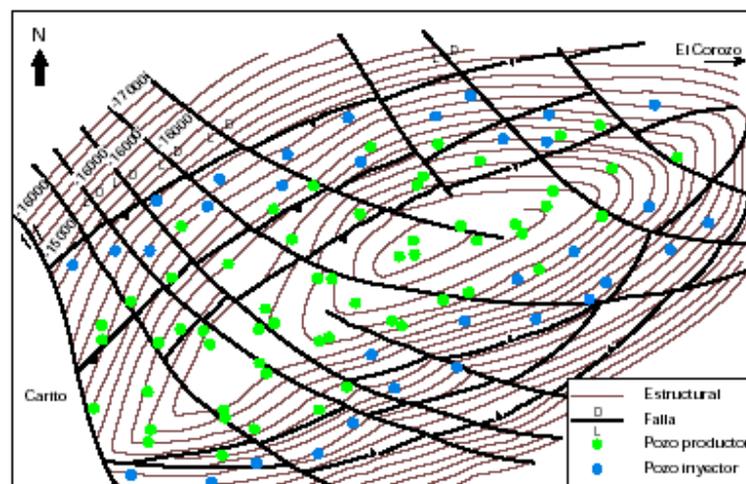


Figura 2.3. Mapa estructural de las “Arenas de Naricual”, campo El Furrial. Tomado de [7]

b) Estratigráficamente:

La columna estratigráfica penetrada en El Furrial comprende más de 16.000 pies de sedimentos, cuyas edades van desde el Cretácico Superior hasta el Reciente. Toda la sección es fundamentalmente siliciclástica [7].

La columna estratigráfica alcanzada por los pozos perforados abarca desde el Pleistoceno hasta el Cretáceo (Figura 2.4).



Las formaciones cretácicas contienen sedimentos terrígenos provenientes del Escudo de Guayana depositados en un ambiente fluvial a marino somero. Están constituídas básicamente por areniscas de grano fino a medio, intercaladas con areniscas cuarzosas y arcillas. Algunas de estas formaciones se caracterizan por una secuencia de lutitas oscuras con una base de calizas masivas, areniscas y lutitas, delgadas[9].

Desde finales del Cretáceo comienza un depósito de ambiente más marino, areniscas y lutitas. Se presenta luego un hiato estratigráfico seguido por sedimentos estuarinos.

EL FURRIAL
COLUMNA ESTRATIGRAFICA

EDAD		FORMACION	ESPES.	DESCRIPCION LITOLOGICA
RECIENTE PLEISTOCENO		MESA	900'	ARCILLAS CON CAPAS DE ARENISCA Y CARBON
PLIOCENO		LAS PIEDRAS	3.400'	LIMOLITAS Y ARENISCAS CON ARCILLAS Y CAPAS DE CARBON
		M I O C E N O	LA PICA	3.300'
MEDIO	A		6.000'	ARENISCAS CON LUTITAS LIMOLITAS Y CARBON
	B			LUTITAS CON LIMOLITAS Y ARCILLAS
	C			
INFERIOR	D E	LUTITAS CON LENTES DE ARENISCA		
OLIGOCENO		NARICUAL	1.550'	ARENISCAS CON LUTITAS Y LIGNITOS
		AREO	70'	LUTITAS Y LIMOLITAS
		LOS JABILLOS	540'	ARENISCAS CON LUTITAS
EOCENO		CARATAS	630'	LIMOLITAS Y ARENISCAS
PALEOCENO		VIDOÑO	220'	LUTITAS, LIMOLITAS Y ARENISCAS

Figura 2.4. Columna estratigráfica del campo El Furrial. Tomado de [9]



La mayor parte del petróleo del campo El Furrial, lo mismo que la de los yacimientos del campo Carito, se encuentra en unas areniscas conocidas localmente como “Formación Naricual”, y consideradas hasta el momento de edad Oligoceno. Estas arenas se dividen en tres paquetes estratigraficos diferentes, separados por capas lutíticas de gran extensión. Naricual Inferior, con espesores de alrededor de 400 pies, Naricual Medio, también de unos 400 pies y Naricual Superior, con un promedio de 700 pies.

2.3.- Geología Local:

La **Formación Naricual** (Oligoceno medio a superior) se depositaba inicialmente en un ambiente fluvial gradualmente inundado por sucesivas incursiones marinas. Esta formada por una secuencia de areniscas de grano fino a grueso con matriz arcillosa, bien consolidadas, intercaladas con lentes de lutita ligeramente calcárea, limolitas arcillosas, y delgadas capas de carbón hacia la base. El ambiente sedimentario varió al final hasta deltáico o marino somero. El espesor promedio es de aproximadamente 1.600' [9].

Conforme a las características litológicas de la formación y a la presencia de dos cuerpos lutíticos de 30 a 50 pies de espesor ha sido dividida en tres sectores, Naricual inferior, medio y superior [9].

Las formaciones petrolíferas Caratas, Los Jabillos y Naricual infrayacen una gruesa sección lutítica, fuertemente compactada, con espesor de 7.000 a 10.000 pies, que representa la sedimentación marina de Carapita y La Pica inferior [9].

La **Formación Carapita** (Mioceno inferior a medio) es discordante sobre formaciones más antiguas, y está constituida principalmente por lutitas, con capas arenosas y limosas. El ambiente de sedimentación va de marino somero en la zona basal hasta marino profundo. El espesor promedio es de 6.000'; en algunos pozos de El Carito llega hasta 11.400' [9].

La sección inferior de Carapita tiene las lutitas con mayor compactación. La zona intermedia comprende lutitas generalmente calcáreas. Las lutitas superiores son piríticas o glauconíticas, de poca compactación, intercaladas con limolitas.

La **Formación La Pica** (Mioceno superior-Plioceno inferior) es discordante sobre Carapita. Consiste en una serie de lutitas y areniscas consolidadas de grano fino a muy fino,



laminadas, localmente limosas o ligníticas. La sección arenosa se divide en dos unidades operacionales: Arenas Textularia la inferior y Arenas Sigmoidina la superior [9].



CAPÍTULO III

Marco Teórico

3.1 Generalidades sobre la radiometría gamma

Un átomo consiste de un núcleo rodeado por electrones. El núcleo está compuesto por protones cargados positivamente y neutrones sin carga. El número de protones en un núcleo de un elemento X es definido como número atómico Z. La suma de protones y neutrones (nucleones) se define como el número de masa A de un átomo. Átomos de un elemento que tienen el mismo número atómico pero diferente número de neutrones y por tanto, diferente número de masa se denominan isótopos. Los isótopos tienen idénticas propiedades químicas, pero diferentes propiedades físicas [10].

3.1.1 Desintegración radiactiva:

La radiactividad nuclear es definida como “cualquier cambio en el estado del núcleo atómico, acompañado por liberación de energía” [11].

3.1.2 Modos de decaimiento:

A causa de su inestabilidad los núcleos decaen por medio de emisiones α , β , γ , captura electrónica (CE), o fisión espontánea, a fin de hacerse estables. La partícula α emitida por el núcleo inestable es en sí un núcleo de helio doblemente ionizado y la reacción por la cual se produce se representa por medio de la ecuación (3-1):



donde X representa el símbolo químico del núcleo padre y Y el del hijo. En algunos casos no hay emisión γ [12].



En la emisión de partículas β^- , un neutrón (en el núcleo) se convierte en un protón, un electrón y un anti – neutrino, véase la ecuación (3-2).



y la transformación para un elemento X es:



El término γ permite la posibilidad de que el núcleo hijo a formarse se encuentre en un estado excitado, en tanto que otras transiciones se dan directamente al estado base. La emisión de partículas β^- es un ejemplo de decaimiento radiactivo de un núclido con exceso de neutrones [12].

Un núcleo con déficit de neutrones emitirá un positrón a fin de ganar estabilidad por medio de la expresión (3-4):



y la transformación es para un elemento X es:



La energía de las radiaciones α y γ es discreta y bien definida, en tanto que la energía de las emisiones β conforma un espectro continuo debido a la cantidad de energía tomada por el neutrino.

En el caso de la captura electrónica (CE) el núcleo con déficit de neutrones debe decaer por una conversión protón – neutrón, pero las hijas producidas poseen una masa mucho más grande que la aceptable para la emisión de positrones. Por lo tanto dicho núcleo sólo puede decaer capturando uno de los electrones orbitales. El número atómico queda entonces reducido



por uno debido a la carga negativa adquirida por el núcleo obteniendo este último la misma hija que si hubiese producido la emisión del positrón [12].

La captura electrónica se representa por la ecuación (3-6):



La fisión espontánea ocurre a través del fraccionamiento de un átomo pesado en dos fragmentos y la subsecuente pérdida de neutrones y energía.

3.1.3 Tasas de decaimiento:

La tasa de decaimiento de los núcleos se mide en función de la constante de decaimiento λ , la cual es la probabilidad por unidad de tiempo de que un núcleo decaiga. La constante de decaimiento λ está a su vez relacionada con la vida media del núcleo (tiempo necesario para que una cantidad dada de núcleos decaiga a la mitad) [13].

Cada núcleo radiactivo tiene su vida media característica. Si hay una cantidad N de núcleos radiactivos en una muestra, la tasa de decaimiento estará dada por la ecuación (3-7):

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (3-7)$$

donde el signo menos indica que N decrece con el tiempo. La solución a esta ecuación es:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3-8)$$

donde N_0 es el número de núcleos presentes a $t = 0$. La vida media, $t_{1/2}$, puede ser expresada en función de λ como:



$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (3-9)$$

3.1.4 Constantes de Decaimiento Total y Parcial:

Es importante tener en cuenta que la ley de decaimiento exponencial se aplica solo bajo una circunstancia en particular, donde una cantidad inicial dada de núcleos que decaen (emitiendo radiación) a un producto final estable. Bajo tal circunstancia, cuando una cantidad de núcleos tipo 1 decaen con constante de desintegración λ_1 en núcleos estables del tipo 2, el número de núcleos presentes es:

$$N_1 = N_0 e^{-\lambda_1 t} \quad (3-10 a)$$

$$N_1 = N_0 (1 - e^{-\lambda_1 t}) \quad (3-10 b)$$

No obstante si los núcleos del tipo 2 son a su vez radiactivos, o si los núcleos del tipo 1 están siendo producidos (como resultado de una reacción nuclear, por ejemplo) entonces las ecuaciones no son válidas. Así, frecuentemente se observará que una cantidad inicial de núcleos pueden decaer de dos o más maneras, finalizando en dos o más productos finales estables. Por ejemplo si se tienen dos modos de decaimiento a y b, la tasa de decaimiento en el modo a $(dN/dt)_a$ es determinada por la *constante de decaimiento parcial* λ_a , y la tasa de decaimiento en el modo de decaimiento b $(dN/dt)_b$, por λ_b [13].

En tanto que la tasa total de decaimiento $(dN/dt)_t$ es:

$$-\left(\frac{dN}{dt}\right)_t = -\left(\frac{dN}{dt}\right)_a - \left(\frac{dN}{dt}\right)_b = N(\lambda_a + \lambda_b) = N\lambda_t \quad (3-11)$$

Donde $\lambda_t = \lambda_a + \lambda_b$ es la *constante de decaimiento total*.

3.1.5 Probabilidades de emisión:

Algunos núcleos pueden decaer mediante un solo proceso, en tanto que otros (la mayoría) decaen siguiendo esquemas de desintegración complicados que involucran los modos de emisión α , β y γ compitiendo entre sí. A fin de especificar la intensidad relativa en que estos modos compiten se especifican sus probabilidades de emisión. Así, el ^{226}Ra decae mediante emisión α al estado base del ^{222}Rn con una probabilidad de emisión de 94% y al primer estado excitado con una probabilidad de emisión de 6% (Figura 3.1) [13].

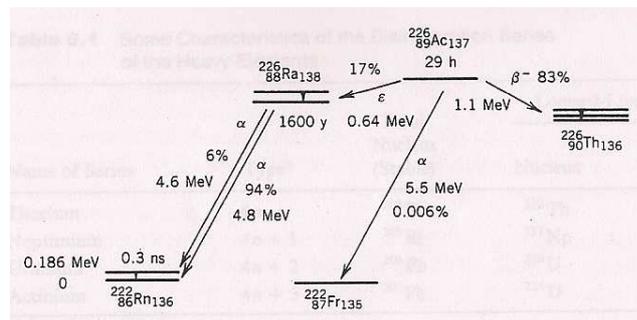


Figura 3.1. Esquema de desintegración para el ^{226}Ac que decae a ^{226}Ra
(Tomado de [13])

3.1.6 Unidades:

La actividad A es definida como el número de núcleos que decaen por unidad de tiempo y esta puede ser representada por:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (3-12)$$

La unidad adoptada por el SI es el Becquerelio (Bq), donde 1 Bq equivale a una desintegración nuclear por segundo. $1 \text{ Ci (Curie)} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$. 1 g de ^{226}Ra tiene una actividad de $3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ [13].

Por otra parte, la actividad específica o **concentración de actividad**, (actividad por unidad de masa), becquerelio por kilogramo, Bq/kg, es el número de desintegraciones nucleares por unidad de tiempo por unidad de masa.

3.1.7 Series de decaimiento:



El decaimiento radiactivo ocurre también en serie o cadenas con un número de productos hijos, los cuales son de igual forma radiactivos, terminado en la formación de un isótopo estable. En un sistema cerrado, comenzando con una cantidad específica del radionúclido padre, el número de radionúclidos hijos y su actividad crece hasta alcanzar el equilibrio radiactivo de la serie de desintegración. En este punto, las actividades de todos los radionúclidos de la serie son idénticas. Entonces, la medición de la concentración de cualquier radionúclido hijo puede ser usado para estimar la concentración de cualquier otro radionúclido presente en la serie de decaimiento. Bajo condición de equilibrio, esta relación puede ser expresada como:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots \lambda_n N_n \quad (3-13)$$

En condiciones donde el hijo de vida corta resulta del decaimiento de un padre de vida muy larga ($\lambda_p \ll \lambda_h$) y donde la actividad del padre no disminuye de forma apreciable durante el tiempo de decaimiento de los hijos de menor vida, se establece la condición de equilibrio secular [11].

3.1.8 Desequilibrio:

El desequilibrio ocurre cuando uno o más productos de decaimiento en una serie se encuentran total o parcialmente removidos o añadidos al sistema. Así, la serie del torio raramente se encuentra fuera del equilibrio en la naturaleza. Sin embargo, es común el desequilibrio en la serie de decaimiento del uranio, y esto puede constituir una fuente de error en la espectrometría gamma. Los estimados de las concentraciones de uranio se basan en la medición de las abundancias de los isótopos ^{214}Bi y ^{214}Pb . Estos isótopos se encuentran casi al final de la cadena de desintegración y pueden no estar en equilibrio con el uranio. Los estimados de las concentraciones de uranio son reportados usualmente como “equivalentes de uranio” (eU) y estos se realizan asumiendo condiciones de equilibrio secular. De igual manera los estimados de las concentraciones de torio son reportados como “equivalentes de torio” (eTh), aunque la serie de decaimiento del torio se encuentra casi siempre en equilibrio [14].

3.1.9 Fuentes Naturales de Radiación:

En tanto que muchos elementos que decaen espontáneamente poseen isótopos radioactivos, sólo el potasio y las series del uranio y del torio tienen radioisótopos que producen rayos gamma con la energía e intensidad suficiente para ser medidos por un espectrómetro de rayos gamma (Figuras 3.2 y 3.3), esto se debe a que dichos elementos están presentes en el ambiente de manera relativamente abundante. De hecho, las abundancias de estos elementos en la corteza terrestre están en el rango de 2 – 2,5 % K, 2 – 3 ppm U y 8 – 12 ppm Th.

^{40}K es el radioisótopo del potasio (Figura 3.4) y esta presente como 0,012 por ciento del potasio natural. Este isótopo decae a ^{40}Ar con la emisión de rayos gamma con energía de 1,46 MeV. Ya que el ^{40}K esta presente en una proporción fija del K en el ambiente natural estos rayos gamma pueden ser utilizados para estimar la cantidad total de K presente. La vida media del ^{40}K es de $1,3 \times 10^9$ años (Figura 3.4).

El uranio se encuentra presente en el ambiente de forma natural como los radisótopos ^{238}U y ^{235}U a partir de los cuales se originan series de decaimiento que culminan en los isótopos estables ^{206}Pb y ^{207}Pb respectivamente. Las vidas medias del ^{238}U y del ^{235}U son $4,46 \times 10^9$ y $7,13 \times 10^8$ años respectivamente (Figura 3.2).

El torio se encuentra presente en el ambiente de forma natural como el radioisótopo ^{232}Th el cual origina una serie de decaimiento que termina en el isótopo estable ^{208}Pb . La vida media del ^{232}Th es de $1,39 \times 10^{10}$ años (Figura 3.3).

Otra fuente natural de radiación ambiental la representan los radionúclidos cosmogénicos, los cuales vienen simbolizados por los radionúclidos ^3H , ^7Be , ^{14}C y ^{22}Na , entre otros; los cuales no estuvieron presentes en la configuración primordial de la Tierra y su origen es debido a la interacción de la radiación cósmica con las capas altas de la atmósfera [14].

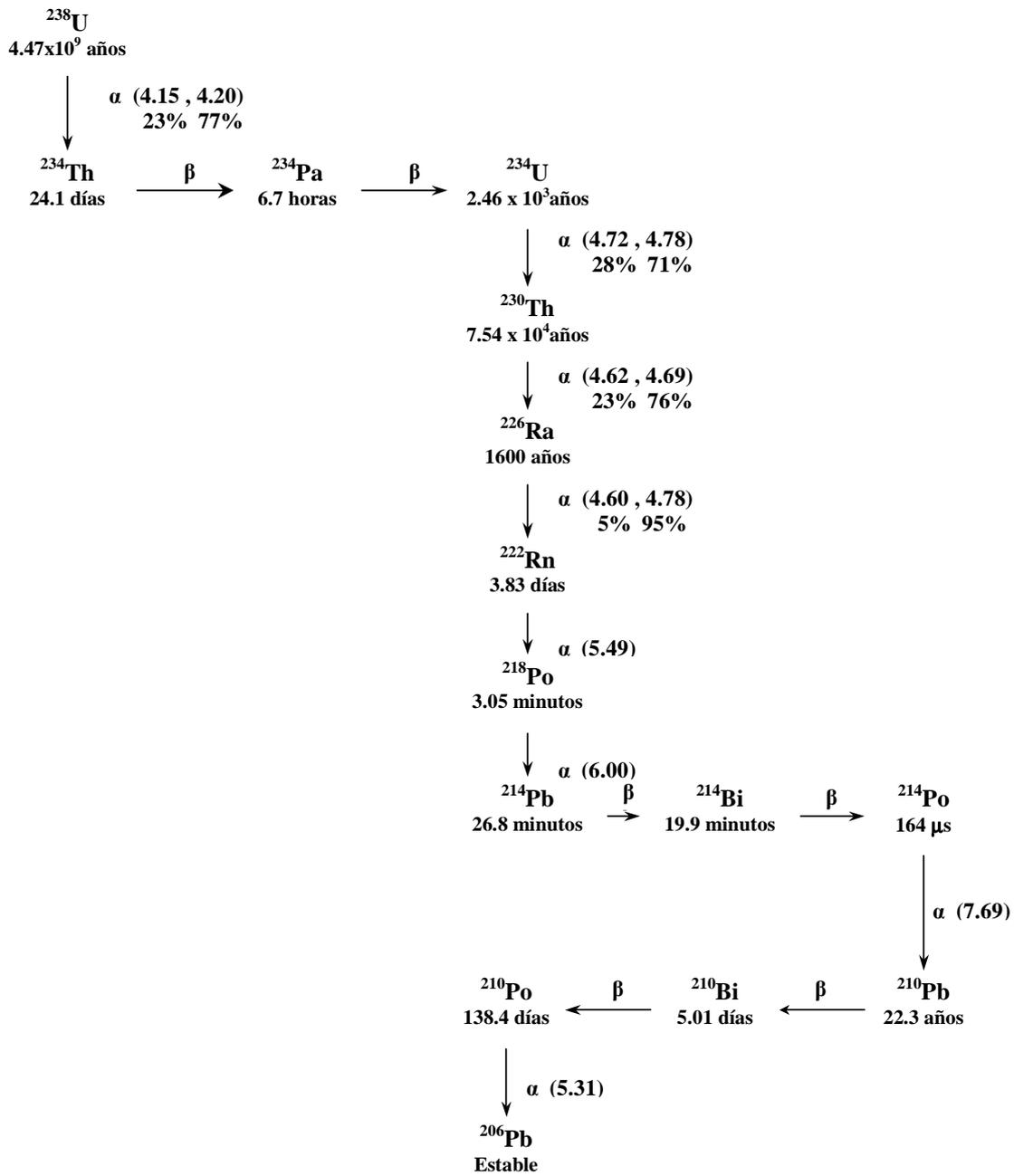


Figura 3.2. Esquema de desintegración del ^{238}U .
Tomado de [15]

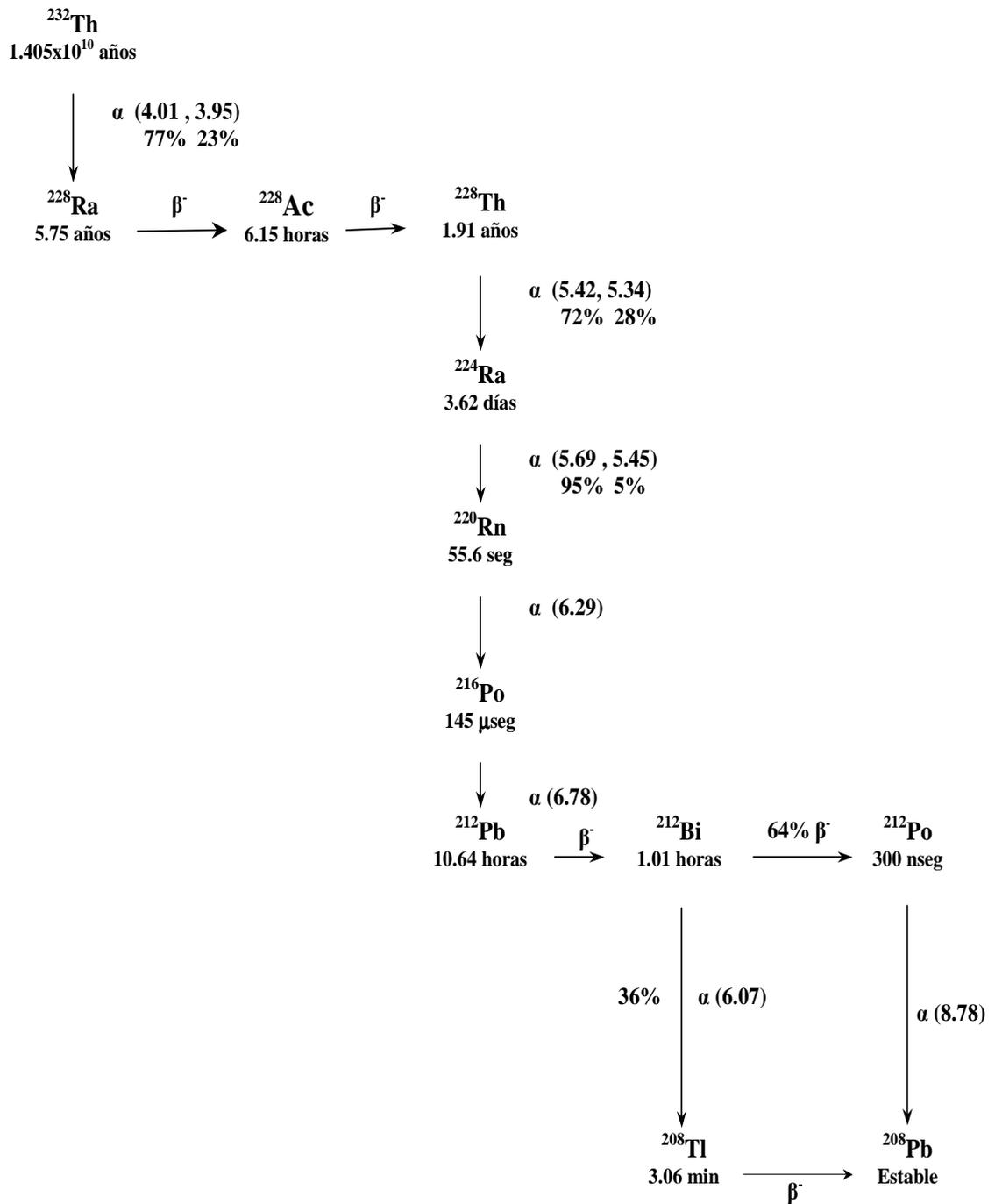


Figura 3.3. Esquema de desintegración del ^{232}Th .
Tomado de [15]

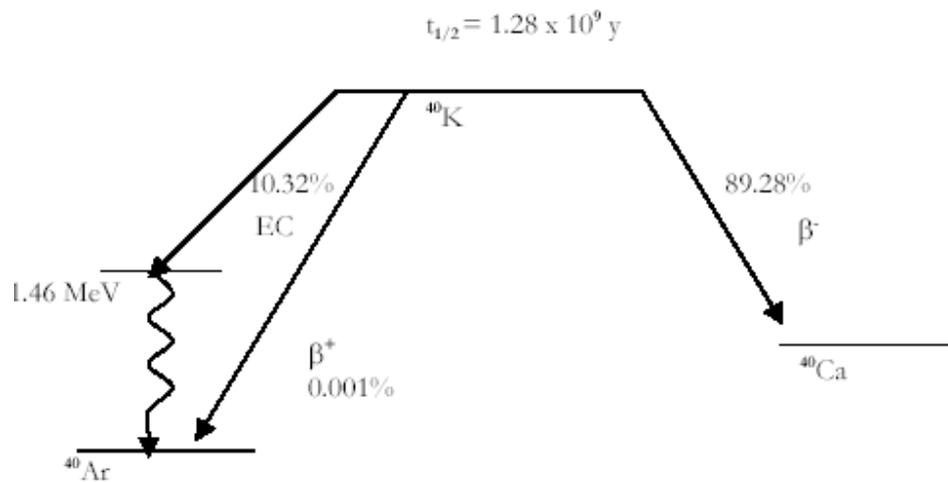


Figura 3.4. Esquema de desintegración del ^{40}K .
Tomado de [12]

El desarrollo de energía nuclear ha resultado en la creación de radionúclidos artificiales. Estos son generados durante pruebas de explosión de armas nucleares y en reactores con usos en investigación científica y aplicaciones industriales. El ^{137}Cs es el principal producto “fall-out” emisor gamma generado en pruebas nucleares realizadas entre 1945 – 1964 y en el accidente en Chernobyl, Ucrania, en el año 1984 como producto de fisión del ^{235}U empleado como combustible en las bombas utilizadas [14].

3.1.9 Interacción de los rayos gamma con la materia:

Existen principalmente tres procesos mediante los cuales los rayos gamma interactúan con la materia, a saber:

- Absorción fotoeléctrica:

Este proceso ocurre cuando un fotón de rayos gamma interactúa con uno de los electrones ligados en el átomo, como se muestra en la Figura 3.5 toda la energía es transferida al electrón, este último es eyectado de su orbital con una energía cinética E_e , dada por:

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (3-14)$$

donde E_γ es la energía de los rayos gamma y E_b la energía de ligadura del electrón en el orbital. La vacancia que ocurre por el electrón eyectado puede ser llenada por electrones de niveles energéticos superiores con las consiguiente emisión de rayos X característicos (Figura 3.6) [12].

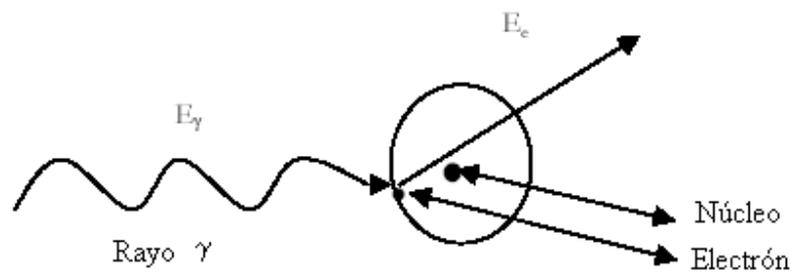


Figura 3.5. Representación esquemática del mecanismo de la absorción fotoeléctrica.
Tomado modificado de [12]

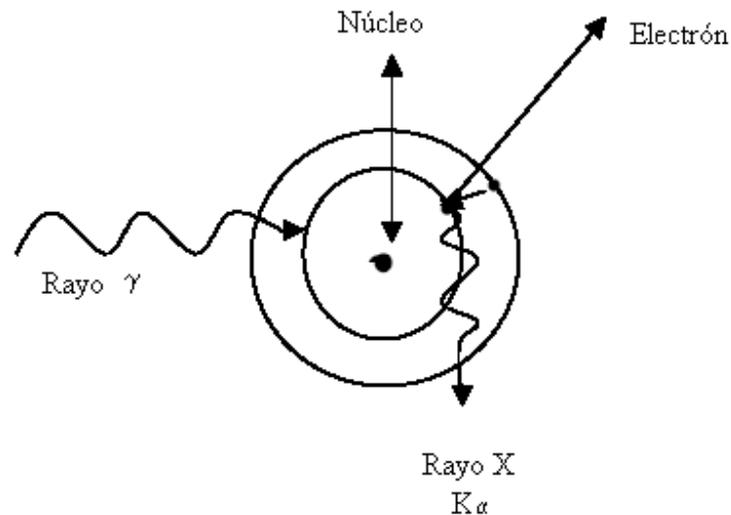


Figura 3.6. Representación esquemática del mecanismo de la emisión de rayos X característicos.
Tomado y modificado de [12]

La sección eficaz para la absorción fotoeléctrica depende del número atómico Z , así como de la energía del fotón, en tanto más baja sea la energía del fotón y mayor la Z del material en el cual el fotón interactúa, mayor será la probabilidad de absorción [12].

- **Dispersión Compton:**

En este proceso un fotón de rayos gamma incide sobre un electrón libre del material y parte de su energía es transferida al mismo, como energía cinética (Figura 3.7). Esta energía cinética viene dada por:

$$E_e = E_\gamma - E'_\gamma \quad (3-15)$$

donde E_γ es la energía del fotón incidente y E'_γ es la energía del fotón reflejado.

La energía del fotoelectrón en función de la energía del fotón incidente y el ángulo de reflexión θ esta dada por:

$$E_e = E_\gamma \left\{ 1 - \frac{1}{(1 + E_\gamma [1 - \cos \theta] / m_0 c^2)} \right\} \quad (3-16)$$

donde m_0 es la masa en reposo del electrón y c es la velocidad de la luz.

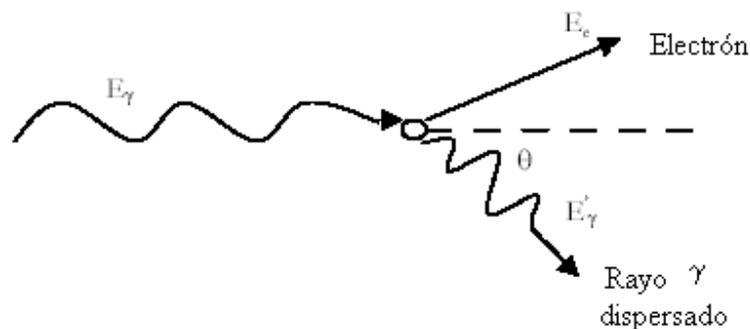


Figura 3.7. Representación ilustrativa del mecanismo de la emisión de dispersión Compton.
Tomado y modificado de [12]

- Producción/Aniquilación del par:

Este proceso es posible si la energía de los rayos gamma excede al doble de la energía de la masa en reposo del electrón, esto es 1,02 MeV. Toda la energía es convertida en un par electrón – positrón. La aniquilación ocurre cuando las masas en reposo del electrón y el positrón son convertidas en dos fotones de rayos gamma con energías de 0,511 MeV. En esta aniquilación los rayos gamma son emitidos en direcciones opuestas para conservar la cantidad de movimiento y pueden interactuar con el medio en el que se encuentran mediante absorción fotoeléctrica o dispersión Compton (Figura 3.8) [12].

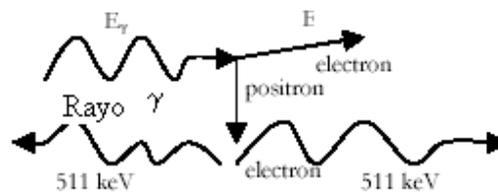


Figura 3.8. Representación ilustrativa de los mecanismos de producción y aniquilación del par electrón-positrón. Tomado y modificado de [12]

3.2 Atenuación de la radiación:

La radiación electromagnética difiere notablemente en su interacción con la materia, respecto a la de las partículas cargadas: esta diferencia radica en que la absorción de la radiación electromagnética es de carácter exponencial, por lo que carece de alcance definido, a diferencia de las partículas cargadas, las cuales-sobre todo las pesadas-pierden su energía en el curso de un gran número de colisiones con los electrones atómicos: en cada choque la energía de la partícula disminuye una pequeña cantidad, de modo que pierde energía progresivamente, hasta que resulta frenada y absorbida. Sin embargo, cuando un haz de radiación electromagnética incide sobre absorbente delgado, cada fotón perdido por el haz resulta de un proceso único (de absorción o de dispersión) llamado *atenuación de la radiación*.

La carencia de un alcance definido en la absorción de la radiación electromagnética con la materia, se deriva del hecho de que un fotón al cruzar la materia, tiene una cierta probabilidad de atenuación por unidad de longitud μ , que es independiente del camino recorrido. Se ha comprobado experimentalmente que la disminución de intensidad, o atenuación de un haz



colimado de radiación, sigue una ley exponencial, que guarda muchas semejanzas con la de desintegración radiactiva.

Para deducir la expresión analítica de la ley de atenuación, se considera una lámina de caras paralelas, de espesor “l” sobre la que incide perpendicularmente un haz colimado de radiación, de modo que alcanzan el absorbente N_0 fotones por unidad de tiempo. Al cruzar una longitud x , subsisten N fotones primarios en el haz: de ellos, dN serán absorbidos en el espesor comprendido entre x y $(x + dx)$, y la ecuación (3-17) al ser integrada conduce a la ecuación (3-18), la cual es válida cuando:

- a) La radiación incidente es monoenergética
- b) El haz incidente es colimado, o sea que las trayectorias de los fotones son paralelas y normales a la superficie del absorbente.

$$dN = -\mu N dx \quad (3-17)$$

$$N = N_0 * e^{-\mu * l} \quad (3-18)$$

Como se puede apreciar de las ecuaciones anteriores, la atenuación depende del valor de μ y del espesor del absorbente, así, el coeficiente de atenuación definido, depende funcionalmente de la energía de los fotones y del número atómico del absorbente. Como por la forma de las ecuaciones (3-17) y (3-18) el producto μl ha de ser adimensional, μ ha de tener dimensiones de inverso de longitud y se expresa en cm^{-1} . Por esa razón μ se denomina *coeficiente de atenuación lineal*.

No obstante, el valor de μ varía con el estado de físico o de agregación del absorbente. Para evitar esta dificultad, se multiplica y divide el exponente de la ecuación por la densidad del absorbente ρ , con lo que resulta la ecuación (3-19).

$$N = N_0 * e^{-(\rho * l)(\mu / \rho)} \quad (3-19)$$



El producto ρl que tiene dimensiones de ML^{-2} es el espesor másico, independiente del estado físico o de agregación del absorbente. Por ello es frecuente el uso del coeficiente de atenuación másico μ/ρ , cuyas unidades son cm^2g^{-1} .

Otra magnitud muy usada para expresar la atenuación de la radiación gamma, es la llamada *longitud de relajación* o recorrido libre medio de los fotones, λ :

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad (3-20)$$

3.2 Espectrometría Gamma:

La espectrometría gamma es una técnica analítica que permite estudiar cualitativa y cuantitativamente los radionúclidos presentes en una muestra mediante la radiación gamma que esta emite. Es decir, dicha técnica permite por una parte determinar que radionúclidos están presentes en una muestra determinada, y por otro lado permite cuantificar la actividad o la concentración de esos radionúclidos.

3.2.1 Espectrómetro Gamma:

Un diagrama esquemático del equipo que es utilizado a fin de realizar espectrometría gamma se muestra en la Figura 3.9. La señal eléctrica proveniente del detector debe ir directamente a un preamplificador, el cual convierte el pulso de carga proveniente del detector en un pulso de voltaje, luego conduce el pulso al siguiente elemento del circuito. El amplificador incrementa el valor del pulso de voltaje del preamplificador llevándolo del orden de milivoltios a unos cuantos voltios. Es importante resaltar en este punto que el amplificador debe ser lineal, de tal manera que se preserve la proporcionalidad entre la energía de la radiación y la amplitud del pulso. La gran cantidad de pulsos que pueden ser producidas por una compleja cadena de desintegración puede ser observada en un analizador multicanal (MCA, por sus siglas en ingles) en forma de histograma. Los pulsos entrantes son entonces digitalizados y el resultado es almacenado en un espacio de memoria denominado canal. El resultado del espectro de altura de

pulsos puede ser entonces utilizado para determinar las energías de las radiaciones emitidas por la fuente (a partir de su posición en la escala horizontal) y sus intensidades relativas (a partir de las áreas de varios picos en el espectro) [15].

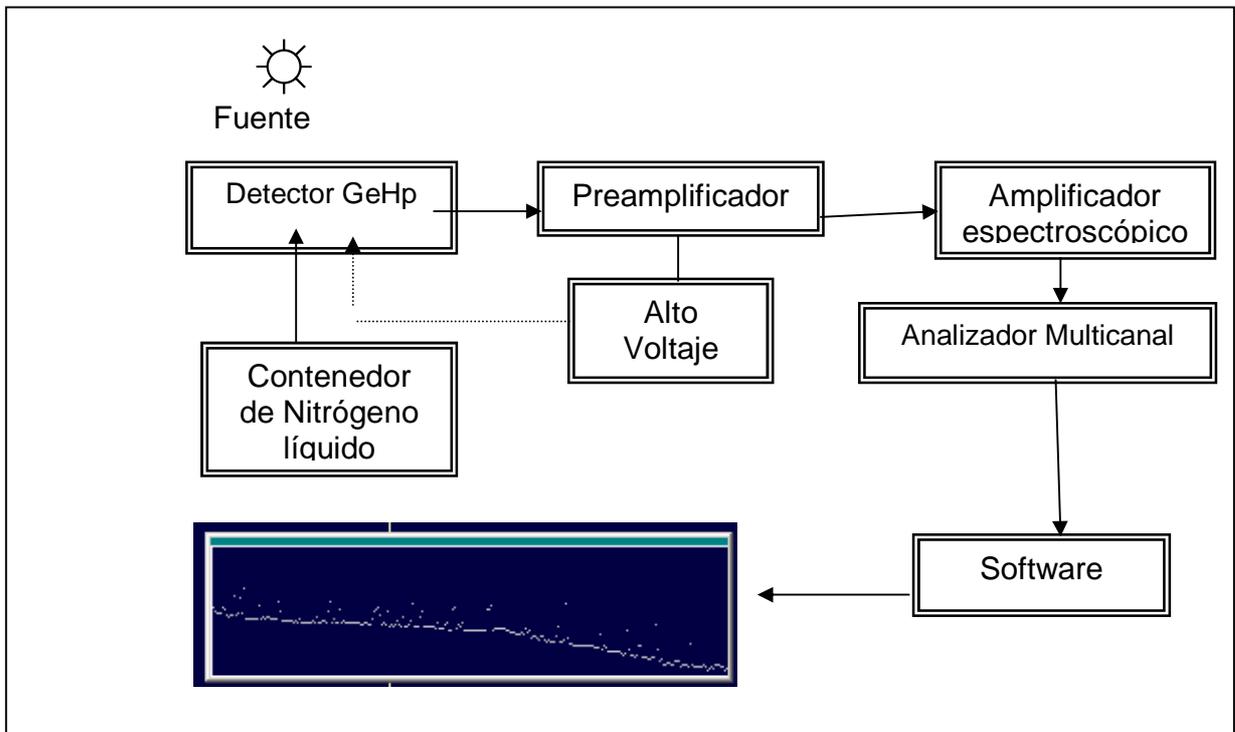


Figura 3.9. Representación esquemática de un sistema de espectroscopia de rayos gamma con detector de GeHp. Tomado y modificado de [15]

3.2.2 Espectro de altura de pulsos:

La forma más común de mostrar la información de amplitud de pulsos es a través de una distribución diferencial de altura de pulsos. A manera de ejemplo, la Figura 3.10 muestra una distribución hipotética. La abscisa es una escala lineal de amplitud de pulsos que va de cero hasta un valor tan grande como la amplitud de cualquier pulso proveniente de la fuente. La ordenada es el número diferencial dN de pulsos observados con una amplitud comprendida dentro de un incremento diferencial de amplitud dH , dividida entre dicho incremento, es decir dN/dH . El número de pulsos cuya amplitud se encuentra entre dos valores específicos $H1$ y $H2$ puede ser obtenido integrando el área bajo la distribución entre esos dos límites, como se muestra en el área rayada de la Figura 3.10(a) [16].

$$\text{Número de pulsos entre } H_1 \text{ y } H_2 = \int_{H_1}^{H_2} \frac{dN}{dH} dH \quad (3-21)$$

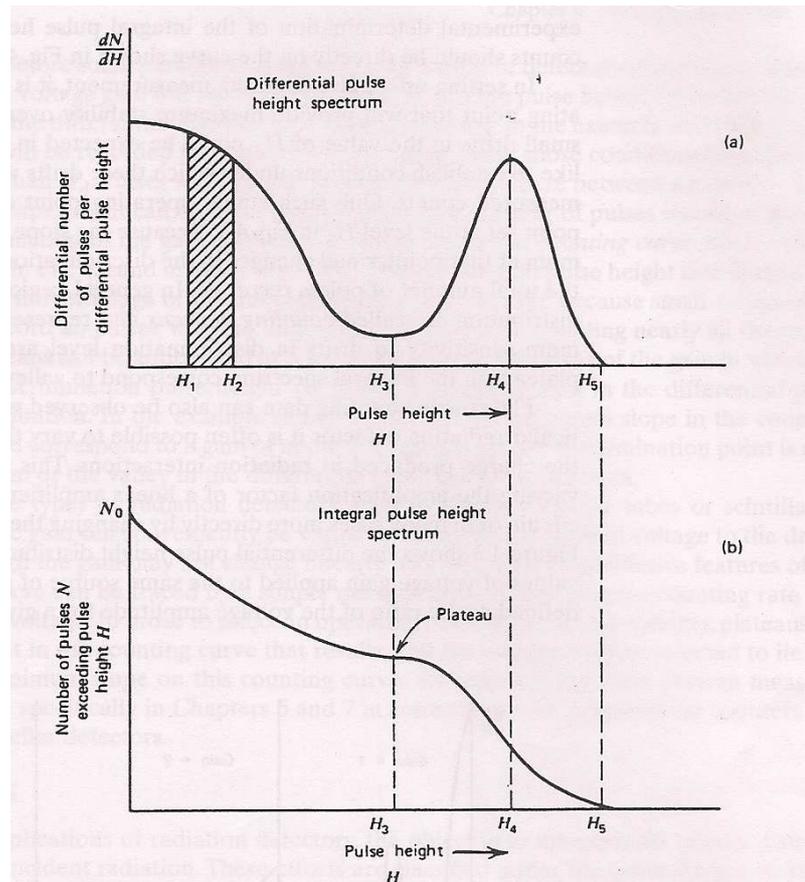


Figura 3.10. Ejemplos de espectros de altura de pulsos (a) Espectro diferencial. (b) Espectro integral.
Tomado de [16]

El número total de pulsos N_0 representado por la distribución puede ser obtenido integrando el área bajo todo el espectro.

$$N_0 = \int_0^{\infty} \frac{dN}{dH} dH \quad (3-22)$$



- *Eficiencia absoluta:*

$$\epsilon_{\text{abs}} = (\text{número de pulsos detectados/número de cuantos de radiación emitidos por la fuente}) \quad (3-23)$$

y depende no solo de las propiedades del detector, sino también de la geometría de la configuración fuente-detector

- *Eficiencia intrínseca:*

$$\epsilon_{\text{int}} = (\text{número de pulsos detectados/número de cuantos de radiación que llegan al detector}) \quad (3-24)$$

esta no incluye la geometría fuente-detector como factor implícito. Dicha eficiencia depende de varios factores a saber, el material del detector, la energía de la radiación y el espesor del detector en la dirección de la radiación incidente [16].

3.3 Calibración de sistemas de espectrometría gamma

El propósito de la calibración es obtener resultados cualitativos (es decir, cuáles radionúclidos están presentes) y cuantitativos (es decir, cuánto de cada radionúclido está presente) para cada muestra que va a ser analizada.

Etapas principales:

(1) *calibración de energía*, donde se obtiene la relación entre el número de canales y la energía del fotón, lo que permite que a cada pico de absorción total observado le sea asignado un valor de energía,

(2) *calibración de eficiencia*, donde se obtiene la curva de eficiencia de conteo del detector *versus* energía del fotón, lo cual posibilita conocer el número absoluto de fotones emitidos a partir de un espectro registrado.

3.3.1 Calibración para espectrometría gamma de suelos “in situ”:

La exactitud en la determinación de las concentraciones de radionúclidos presentes en el suelo depende principalmente de dos elementos: la calibración del detector y la geometría de la fuente en el sitio. La calibración puede ser expresada en términos de la tasa de conteo de pico de absorción total, N (el subíndice “o” representa la respuesta para incidencia normal y el subíndice “f” representa la respuesta integrada sobre todos los ángulos), la tasa de fluencia, ϕ , y la concentración en el medio [17],[6]. La relación de estas cantidades se expresa entonces como:

$$\frac{N_f}{A} = \frac{N_f}{N_o} \frac{N_o}{\phi} \frac{\phi}{A} \quad (3-25)$$

donde N_f/A es la tasa de conteo del pico de absorción total (cps o cpm) para una energía determinada E , para un radionúclido, por unidad de concentración de dicho radionúclido en el suelo. N_f/N_o es el factor de corrección angular para la distribución de radionúclidos en el suelo. N_o/ϕ es la tasa de cuentas del pico absorción total por unidad de densidad de flujo para un haz paralelo de fotones de energía E , es decir, perpendicular a la superficie del detector. ϕ/A es la densidad de flujo proveniente de fotones no dispersados que llegan al detector por unidad de concentración para una determinada distribución de radionúclidos en el suelo.

Conocidos los tres coeficientes mencionados anteriormente, se puede determinar la actividad de un radionúclido en el suelo a través de:

$$A = \frac{N_f}{\frac{N_f}{N_o} \frac{N_o}{\phi} \frac{\phi}{A}} \quad (3-26)$$

3.3.2 Factores que afectan las mediciones realizadas mediante espectrometría gamma “in situ”:

Los factores que afectan las mediciones radiométricas in situ son:

- **Ubicación y Topografía del sitio:**

En la realización de mediciones gamma espectrométricas in situ, el sitio debe ser plano, localizado en un área libre de obstrucciones tales como edificios, casas o cualquier estructura hecha por el hombre, así como de árboles o vegetación de gran tamaño. Ello debido a que todos estos elementos obstruyen el flujo de fotones que llegan al detector provenientes del suelo [18].

Por otra parte, la excesiva irregularidad del terreno afectará el flujo de fotones que llegan al detector proveniente del suelo causando la presencia de auto-absorción adicional. Esta auto-absorción limitará la cantidad de fotones a ser detectados y por lo tanto parecerá como si la fuente se encontrase más profundamente distribuida o que contiene menor cantidad de emisores de radiación gamma [17].

- **Geometría de la fuente:**

En función del tipo de radionúclido –natural o antrópico- se tendrá que la fracción total del flujo total de fotones provenientes de cierta distancia puede variar. Así, para radionúclidos antrópicos entre el 40% y el 50% del flujo total proviene de distancias tan grandes como 10m, y para radionúclidos naturales solamente entre el 10 y 20% del flujo total de fotones provienen de distancias tan grandes como 10 m. Por otra parte, más del 90% del flujo total de fotones proviene de los primeros 10 cm de suelo, en función de la energía de los fotones [17].

- **Variación en la composición del suelo:**

La variación en la composición del suelo afectará el flujo de fotones hacia el detector a través de los coeficientes de atenuación másicos, y en casos extremos esta resultará en un porcentaje pequeño (~ 1%) de error para el flujo de fotones de energía media y alta.

En tanto más profundamente distribuida se encuentre la fuente será más sensible a la composición específica del suelo. Claramente para fuentes distribuidas profundamente la



determinación exacta de la actividad requerirá conocer los coeficientes de atenuación másicos específicos del suelo [17].

- **Lluvias/Emanación de Radón:**

El uranio natural consiste principalmente en U-238 (vida media = $4,5 \times 10^9$ años). Este decae a través de una serie de isótopos hija intermedios antes de alcanzar el Bi-214, el cual es la fuente principal de radiación gamma. El isótopo Bi-214 es la subsiguiente hija del Rn-222 (vida media = 3,8 días), el cual es un gas. Este gas luego de emanar del suelo puede difundirse en la atmósfera antes de decaer. El Bi-214 puede entonces adherirse a las partículas de polvo en la atmósfera y la radiación gamma emitida al desintegrarse este radionúclido también contribuirá al flujo de fotones que llegan al detector. La caída de las lluvias también causará un gran incremento en la actividad de Bi-214 en la superficie al depositarse sobre ella las partículas de polvo. Cualquier medición hecha durante o inmediatamente después de ocurrida la lluvia mostrará valores anómalos de uranio [4].

3.4 Anomalías de la radiación asociadas a la presencia de hidrocarburos:

Varios autores han descrito comportamientos radiométricos típicos sobre yacimientos de petróleo. Alekseev [19] ha resumido estudios experimentales de campos de radiaciones gamma sobre varios depósitos de petróleo en la antigua URSS. Se reconoció que las áreas sobre depósitos de petróleo exhiben predominante valores bajos de la radiación gamma ligados por sus formas y dimensiones a las estructuras del yacimiento de petróleo. La diferencia entre la anomalía radiométrica negativa del conteo total y el campo circundante se estimó que fue del 20-25 por ciento; el contorno de la baja radiométrica no fue brusco, y en algunos casos ocurrió una anomalía positiva de forma anular (halo). Estos comportamientos se presentaron independientemente de la litología del área. Los análisis de laboratorio de las muestras de roca demostraron que el contenido de Th fue generalmente estable, mientras que el U exhibió diferencia sobre el depósito de petróleo.

El origen de los comportamientos radiométricos sobre yacimientos de petróleo fue explicado sobre la base de ascensión de hidrocarburos ligeros que saturan rocas y minerales. Esto



da lugar a una disminución de la capacidad de sorción de las rocas que se encuentran encima del reservorio para los radionúclidos móviles U y K. Kogan y cols.[20] describieron el depósito de hidrocarburo de Korovkov en la URSS, el cual exhibe una disminución de la radiación gamma dentro de su frontera y cambio en la concentración media de K y U, mientras que el Th se mantiene relativamente estable. Se planteó la hipótesis de que los cambios radiométricos se debieron a la influencia de los hidrocarburos que migran. El Shazly y cols. [21] analizaron los resultados de un estudio de conteos totales de radiación gamma medida desde un avión en el área del campo de hidrocarburo del El Alamein, el cual exhibió una baja radiométrica apenas perceptible. Nunn y Meulbrock [22] estimaron un alcance del orden de kilómetros de migración vertical del gas hidrocarburo. Los autores estimaron una velocidad de propagación en 100 m año^{-1} . Sikka y Shives [23] introdujeron los principios, y una descripción histórica, del uso de métodos radiométricos en la exploración de hidrocarburos. La lista de los campos de petróleo o gas que reflejan anomalías radiométricas y del conteo total de radiación gamma apoyan la hipótesis de una influencia directa de los fluidos de hidrocarburos en la redistribución de los elementos radiactivos naturales K, U, y a veces Th, en rocas sobre campos de hidrocarburo.

Varios campos de petróleo y gas reflejan anomalías geofísicas y geoquímicas formadas debido a la migración de hidrocarburos, salmuera y sales en general. Estas anomalías que incluyen hidrocarburos, mineralización, parafina, ceras, sales, metales, gases, microbios, etc., se encuentran comúnmente en los bordes o hasta 3 km fuera de los límites de producción. Las anomalías geoquímicas y geofísicas pueden resultar del enriquecimiento o del agotamiento de una amplia gama de elementos, sales, gases, minerales y los propios hidrocarburos, formando tendencias apicales o anulares, modificadas por condiciones locales. Estas anomalías pueden ocurrir en varios niveles a través de la columna estratigráfica. La forma de las anomalías puede reflejar la naturaleza de la trampa del hidrocarburo. Las fallas pueden producir subidas apicales. Las trampas, anticlinales y estratigráficas reflejarían mínimos confinados por máximos (efecto del halo). Una combinación de estas estructuras puede producir un efecto apical y de halo combinados. Los mecanismos para explicar la formación de anomalías geoquímicas y geofísicas se basa en la presencia de fracturas (macro/micro) que proporcionan los vías para la migración de hidrocarburos (crudo y gas), agua, gases, sales e iones, bajo la forma de microburbujas y con el



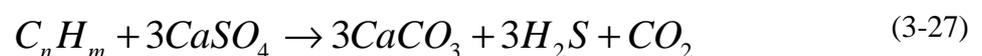
CO₂ y otros gases que actúan como gases portadores para llevar la materia mineral a la superficie [23].

La asunción subyacente es que los hidrocarburos son generados y/o atrapados en profundidad y migran hacia la superficie en cantidades variables pero detectables. Este es un hecho largamente comprobado y la asociación directa entre anomalías superficiales con reservorios productivos, algunos prospectos específicos, así como con fallas u otras vías de migración, es bien conocida. Por lo tanto, se asume o al menos queda implícito que la anomalía en la superficie puede ser relacionada con una acumulación de petróleo en profundidad. La anomalía en superficie representa el final del camino de migración, una migración que pudo ser corta y vertical o larga y lateral [3],[4].

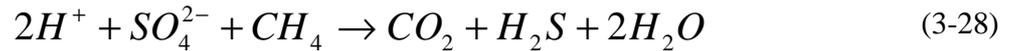
Microfugas de hidrocarburos:

Saunders y otros [3], [4] presentaron una descripción detallada de un modelo basado en la mejor información disponible en cuanto a cómo las anomalías en uranio, potasio, topografía, y magnetismo se pueden relacionar con la microfuga de hidrocarburos hacia la superficie terrestre desde los depósitos del petróleo. Se basaron en el concepto de que la microfiltración de hidrocarburos implica el ascenso, próximo al vertical, de burbujas ultra-pequeñas de gas (de tamaño coloidal) a través de una red de empalmes y planos del lecho interconectados y saturados de agua según lo sugerido por MacElvain [24], o sea, las microfiltraciones del petróleo ascienden verticalmente en forma de microemulsiones formadas por el crudo y gas a través de las porosidades y permeabilidades que presentan las rocas del sistema petrolífero. Esto se ilustra conceptualmente en la Figura 3.12

A medida que los hidrocarburos se elevan hacia la superficie, pueden reaccionar químicamente con los sulfatos en aguas subterráneas para producir sulfuro de hidrógeno (H₂S), dióxido de carbono (CO₂) y mineralización secundaria del carbonato (CaCO₃). El proceso se puede describir por:



Las bacterias sulfato-reductoras en aguas subterráneas pueden lograr esto también [25], [26]. Ellas obtienen el oxígeno de los iones sulfato y consumen los hidrocarburos produciendo los subproductos sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono.



Las concentraciones de dióxido de carbono en las aguas subterráneas forman ácido carbónico que puede reaccionar con los minerales de arcilla (silicatos de calcio, por ejemplo) para crear carbonato de calcio (Figura 3.12), haciendo que los materiales cercanos a la superficie sean más densos y resistentes a la erosión. Los efectos pueden ser: (1) aumento de la velocidad sísmica sobre acumulaciones de petróleo, (2) altos topográficos erosionados y anomalías geomorfológicas, (3) dilución de las concentraciones normales de elementos radiactivos produciéndose bajas concentraciones de actividades gamma de uranio, torio y potasio [27].

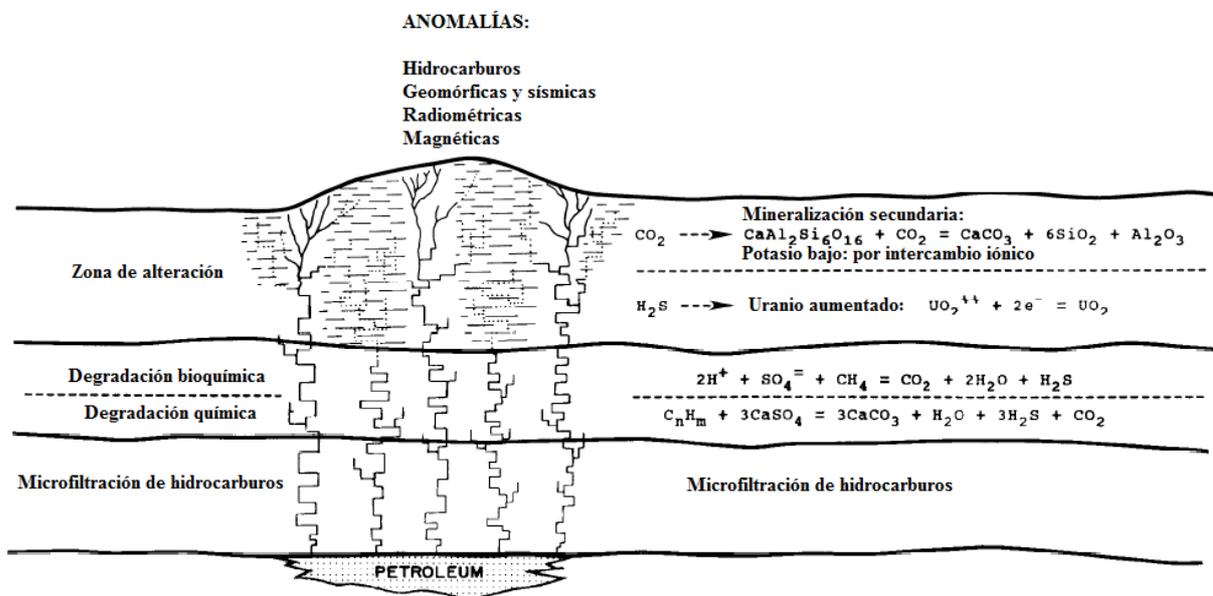


Figura 3.12. Modelo para alteraciones por microfiltración de hidrocarburos.
Tomado de [3]

3.5 Normalización al Torio:

La interpretación de los datos radiométricos involucra tener en cuenta variables tales como: litología de la superficie, humedad del suelo, presencia de vegetación y geometría de conteo. Sobre dichas variables no se posee control alguno, y este hecho ha ocasionado que los resultados de las adquisiciones radiométricas sean cuestionables. Ahora bien, el método de normalización al torio ha sido desarrollado para suprimir los efectos de las variables antes mencionadas [4].

En primer lugar Saunders y cols. [4] utilizaron el contenido de torio a modo de patrón litológico con el fin de definir los valores “ideales” de potasio y uranio en cada punto de muestreo. La asunción en la cual se basa el método es que los efectos litológicos y ambientales que influyen en la concentración aparente del torio también afectan al potasio y al uranio de forma predecible.

Así, la humedad del suelo y la presencia de abundante vegetación producen la absorción de los rayos gamma, siendo generalmente muy similar la cantidad relativa de absorción para la radiación gamma proveniente del uranio, torio y potasio. También las diferencias en la geometría de conteo ocasionada por irregularidades topográficas producirán variaciones paralelas en los tres elementos. Dada la similaridad en el comportamiento, y dado que no se conoce algún efecto secundario del petróleo sobre el torio, normalizar a este elemento suprimirá los efectos de todas las variables no deseadas [3].

Los valores de concentración de torio pueden ser usados para predecir las concentraciones de uranio y potasio, Saunders & cols. [4] determinaron la relación entre ellos, siendo la misma una expresión sencilla (ecuaciones 3-29).

$$K_i = (\text{promedio}K_s / \text{promedio}Th_s) * Th_s \quad (3-29a)$$

$$U_i = (\text{promedio}U_s / \text{promedio}Th_s) * Th_s \quad (3-29b)$$



Donde K_i es el valor “ideal” de potasio definido a partir del valor de torio Th_s medido en una estación particular, asimismo, U_i es el valor “ideal” de uranio definido a partir del valor de torio Th_s .

Entonces las diferencias entre los valores predichos (o “ideales”) para el uranio y el potasio y los medidos tendrán su origen en factores distintos de la litología, la humedad del suelo o la geometría de conteo. Atribuyendo la causa de estas diferencias a la presencia de hidrocarburos en el subsuelo [13].

Las desviaciones de los valores reales de los calculados como “ideales” para cada estación se determinan a partir de ecuaciones de la forma:

$$KD\% = (K_s - K_i) / K_s \quad (3-30a)$$

$$UD\% = (U_s - U_i) / K_s \quad (3-30b)$$

Donde K_s y U_s son los valores medidos en cada estación, y $KD\%$ y $UD\%$ son las desviaciones relativas expresadas como una fracción de los valores medidos en las estaciones. Estas desviaciones son muy importantes ya que sobre acumulaciones de petróleo se ha observado que $KD\%$ presenta valores bajos (negativos) y $UD\%$ presenta valores menos bajos (negativos) o algunas veces positivos. Ahora bien, los valores de $KD\%$ y $UD\%$ pueden combinarse en un solo número positivo $DRAD$, el cual es la diferencia entre ellos:

$$DRAD = UD\% - KD\% \quad (3-31)$$

Se ha encontrado que valores positivos de $DRAD$ son indicadores favorables de la presencia de petróleo.



CAPÍTULO IV

Marco Metodológico

4.1 Materiales y Equipos:

- Espectrómetro Gamma con detector coaxial de Germanio Hiperpuro de alta resolución, Marca Ortec, modelo GEM-40P4 con diámetro del detector de 62.mm y longitud de 83 mm, contenedor de N₂ líquido de 30 L, FWHM a 122 keV y 1.33 MeV para ⁶⁰Co de 1.76 keV y 0.88 keV, respectivamente; eficiencia relativa a 1.33 MeV de ⁶⁰Co de 48%.

- Analizador multicanal DigiDART, marca Ortec

- Trípode
- Nivel de burbuja
- Cinta métrica
- Nitrógeno líquido
- Programas ISOTOPIC y MAESTRO – 32.
- Fuentes:
 - Co- 60
 - Ba-133
 - Cs-137
- Herramientas para extracción de muestras de suelos:
 - Chicora
 - Pala
- Materiales de referencia certificados: RGK-1, RGU-1 y RGTh-1.
- Instrumental utilizado para las ubicaciones de las estaciones:
Dos (2) Receptores Trimble R8GNSS con accesorios RTK.
Un (1) Radio base HPB450.
Un (1) Computador portátil



- Un (1) Trípode
- Un (1) Bípode.
- Un (1) Bastón de 2 m.
- Un (1) Mástil 16 m. para la antena de radio RTK.
- Una (1) Cámara fotográfica.
- Dos (2) Camionetas Vitara 4x4

4.2 Metodología:

4.2.1 Calibración en eficiencia para la determinación de radionúclidos mediante espectrometría gamma “in situ”

a) *Determinación de los factores necesarios a fin de llevar a cabo la calibración en eficiencia para mediciones espectrométricas in situ:*

- Método convencional desarrollado por Beck y cols [6]:

En la determinación de los diferentes valores presentes en la ecuación 3-21 se empleó el procedimiento descrito en el Manual de Procedimientos del Laboratorio de Mediciones Ambientales de los Estados Unidos (E.M.L. por sus siglas en inglés), no obstante aquí se presenta una breve descripción del mismo:

➤ N_o/ϕ :

1. Se coloca una fuente puntual a una distancia de al menos 1 metro del detector, a fin de simular un haz de fotones que inciden perpendicularmente a la superficie del detector.
2. Se calcula la densidad de flujo (o tasa de fluencia) a través del centro del cristal del detector dividiendo la tasa de emisión de la fuente $R(E)$ entre $4\pi r^2$.

$$\phi(E) = \frac{R(E)}{4\pi r^2} \quad (4-1)$$

El valor de r es la distancia de la fuente al centro efectivo del cristal. La densidad de flujo debe ser corregida por la atenuación en el aire y en el contenedor de la fuente.



3. Se corre el espectro y se determina la tasa neta de conteo de los picos de energía total -es decir, la tasa de conteo sin la contribución de la radiación de fondo-.
4. Se divide la tasa de conteo neta corregida entre la densidad de flujo.
5. Se llevan a cabo las mediciones para varias energías.
6. Se grafican los valores de N_o/ϕ versus la energía, con lo cual es posible interpolar el valor de dicho factor para cualquier energía dentro del rango de energías de las fuentes puntuales disponibles.

➤ N_f/N_o :

1. Se mide la tasa de conteo del pico de energía total (menos cualquier contribución del fondo) usando una fuente puntual a una distancia fija de al menos 1 metro del cristal a intervalos de 10° , entre 0° (normal a la superficie del detector) y 90° .
2. Se grafica la respuesta relativa $N(\theta)/N_o$ versus el ángulo θ y se ajusta la data mediante una curva.
3. Se evalúa la ecuación

$$\frac{N_f}{N_o} = \int_0^{\pi/2} \frac{\phi(\theta)}{\phi_o} \frac{N(\theta)}{N_o} d\theta \quad (4-2)$$

numéricamente para una distribución uniforme (radionúclidos naturales) de la fuente en el suelo.

4. Se repiten los pasos del 1 al 3 para varias energías y se grafican los valores de N_f/N_o versus la energía.

Sin embargo para llevar a cabo la determinación de estos factores es necesaria la utilización de fuentes “puntuales” intensas (es decir, que posean una alta tasa de emisión para una energía particular) y que las energías de los fotones que estas emitan abarquen un amplio rango (desde ~ 300 KeV hasta energías mayores de 2615 KeV). Debido a que las fuentes disponibles en primer lugar no eran puntuales (tenían forma de disco), y en segundo lugar no eran intensas, lo que se traduce en tiempos de medición muy prolongados para obtener estadística de conteo apropiada, fue necesario hallar la forma de obtener mediante



simulaciones: 1) la distancia mínima fuente - detector para la cual una fuente en forma de disco puede ser considerada puntual, 2) la tasa de conteo a 1 metro de distancia fuente-detector para diversos ángulos con el eje del detector a partir de mediciones hechas a 25 cm (ver apéndice A)

➤ ϕ/A :

El flujo incidente por unidad de concentración de un radionúclido en el suelo no es dependiente del detector, sino que depende de la densidad y composición del suelo, atenuación en el aire y distribución de la fuente en el suelo. Así, la determinación de este factor para diversas energías fue llevada a cabo a partir de datos obtenidos por Beck & cols [6].

- Método semiempírico desarrollado por Helfer y Miller [1]:

El trabajo realizado Helfer y Miller se basa en el método desarrollado por Beck en 1972 (ver [6]) para la calibración de espectrometría gamma in situ, y este consistió principalmente en obtener los factores de calibración antes mencionados a partir de determinadas características de los detectores [1] a saber:

- Eficiencia (ϵ), a 1332 keV, relativa a un detector de NaI(Tl) cuyas dimensiones son 7,6 cm x 7,6 cm.
- Orientación del detector
- Relación longitud – diámetro del cristal

b) Adquisición en campo de prueba:

A fin de comprobar la calibración en eficiencia (factores de calibración), se procedió a realizar una serie de mediciones (5) in situ en un campo de prueba. La razón de realizar varias mediciones yace en el hecho de que la cantidad de fotones de los distintos radionúclidos emisores de radiación gamma que llega al detector puede experimentar variaciones en función de la hora a la que se realice la medición debido principalmente a la alteración en las condiciones atmosféricas presentes, y dado que los conteos netos bajo el pico de absorción total para un

radionúclido es directamente proporcional a la concentración del mismo (es decir, actividad por unidad de volumen), es necesario conocer el rango en el cual pueden ocurrir las variaciones en los conteos netos, pues estas implican cambios en las concentraciones.

➤ Descripción del sitio:

El campo de prueba ubicado en las cercanías del Departamento de Oceanología y Ciencias Costeras del IVIC, dicho campo cumplía con los requisitos de ser plano, amplio y con vegetación de baja altura (~5 cm.), (Figura 4.1)



Figura 4.1. Campo de prueba

➤ Ajuste del equipo gamma espectrométrico:

Se procedió a ubicar el trípode sobre el terreno teniendo en cuenta los cálculos necesarios para que la distancia entre el suelo y el detector sea de 1 m, igualmente se verificó que el trípode estuviese adecuadamente nivelado con el terreno. A continuación se colocó el detector sobre el trípode, se encendió el analizador multicanal fijando el tiempo vivo de medición a 2700 s, se habilitó el alto voltaje (el valor de dicho voltaje está predeterminado a 2500 V), se esperó el tiempo necesario para que el voltaje fuese estable y se procedió a correr el espectro.

c) *Recolección de muestras*

A fin de comparar la representatividad de las mediciones in situ, se llevó a cabo la recolección de muestras de suelo (Figura 4.3) de diversos espesores en cada uno de los puntos que se muestran en la Figura 4.3. Los espesores tomados fueron: (0-2) cm, (2-20) cm, (20-40)cm y (40-55) cm.



Figura 4.2.Recolección de muestras



Figura 4.3.Sitios de muestreo en el campo de prueba

d) Preparación de las muestras para análisis mediante espectrometría gamma en laboratorio:

A fin de eliminar la humedad de las muestras, las mismas fueron secadas en dos pasos: primero durante 120 horas (5 días) al aire y luego en estufa a 115°C entre 3 y 5 días, aproximadamente. Una vez secas, las muestras fueron tamizadas con tamiz de 2 cm para eliminar gravas y restos de materiales orgánicos. Posteriormente, las muestras, de manera independiente, fueron colocadas en un plástico limpio para la homogeneización y posterior cuarteo para la obtención de submuestras representativas. Una vez obtenidas dichas submuestras, las mismas fueron envasadas en recipientes plásticos hasta completar un volumen determinado (tal como se muestra en la Figura 4.4 para los materiales de referencia certificados) a fin de determinar la concentración de los radionúclidos presentes.



Figura 4.4: Materiales de referencia certificados en envases de polietileno de alta densidad de 1L de capacidad y altura de muestra de 7,2 cm

e) Adquisición de espectros en laboratorio:

- Ajuste del equipo gamma espectrométrico:

Para la adquisición de espectros de las muestras de suelo se dispuso del detector de la forma que ilustrada en la Figura 4.5:



Figura 4.5: Disposición del detector gamma para la medición de muestras en laboratorio.

Las mediciones de laboratorio se realizaron procurando un tiempo vivo de 72000 s (20 horas).

➤ Determinación de concentraciones de radionúclidos:

Método comparativo:

El procedimiento de cálculo de las actividades de los radionúclidos de interés utilizado fue realizado por el método comparativo, asumiendo que la eficiencia de conteo de cada pico de energía total es la misma para las muestras y materiales de referencia certificados (MRC) en virtud de que ambos, se miden en la misma geometría. Como los radionúclidos a determinar en las muestras están contenidos en los materiales de referencia, se utilizan las mismas líneas energéticas, se miden durante el mismo tiempo y se asume que las matrices son similares, entonces la actividad de un radionúclido en particular se puede calcular por la expresión (4-3) [15]:

$$A_m = \left(\frac{Aneta_m}{Aneta_{MRC}} \right) \left(\frac{m_{MRC}}{m_m} \right) A_{MRC} \quad (4-3)$$

donde:

A_m = Actividad del radionúclido de interés en la muestra (Bq/kg)

A_{MRC} = Actividad del radionúclido de interés en el material de referencia certificado (Bq/kg).



A_{net_m} = Área neta del pico de energía total del radionúclido de interés en las muestras (cuentas).

$A_{\text{net}_{\text{MRC}}}$ = Área neta del pico de energía total del radionúclido de interés en el material de referencia certificado (cuentas).

m_m = masa de la muestra (kg)

m_{MRC} = masa del material de referencia certificado (kg).

4.2.2 Estudio de anomalías de radiación sobre pozos petroleros

a) Diseño de adquisición y ubicación de la zona:

Los sitios de medición (estaciones) se ubicaron sobre una transecta de 40 puntos (separados por 250 m) que pasaba por dos pozos petroleros (Figura 4.6), los cuales se realizaron tomando como base los estudios geológicos y geofísicos que apuntaban a una gran probabilidad de éxito como fuentes económicamente rentables de petróleo. El primer pozo resultó productivo mientras que el segundo resultó seco de petróleo y solamente se encontró agua.

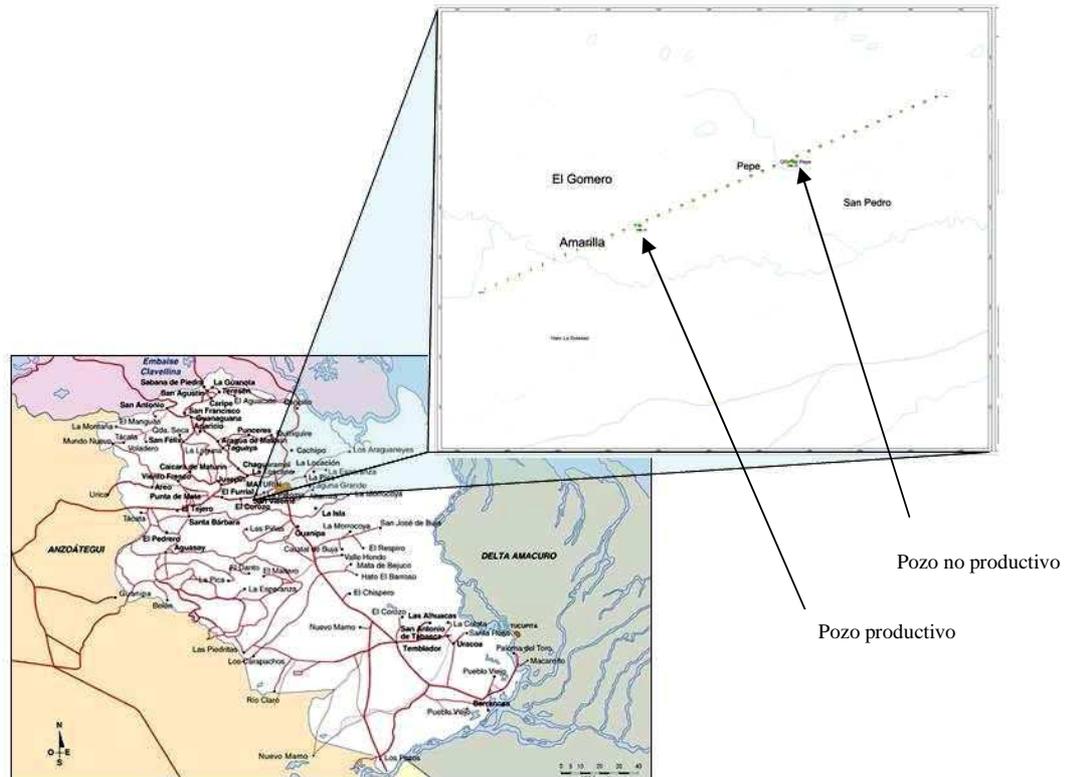


Figura 4.6.Ubicación de la Transecta

b) Procedimiento de observación:

Los criterios aplicados para la selección de las estacas fueron los siguientes:

- Cada estación debe encontrarse libre de vegetación en un radio mínimo de 20 m.
- Las estaciones deben cumplir la característica de encontrarse topográficamente lo más plana posible.

c) Adquisición:

En cada una de las estaciones a lo largo de la transecta se procedió a ubicar el trípode sobre el terreno teniendo en cuenta los cálculos necesarios para que la distancia entre el suelo y el detector fuese de 1 m, igualmente se verificó que el trípode estuviese adecuadamente nivelado con el terreno (Figura 4.7). A continuación se colocó el detector sobre el trípode, se encendió el

analizador multicanal fijando el tiempo vivo de medición a 1800 s. En la Figura 4.8 se observa el detector durante la adquisición gamma espectrométrica en la estación 15 de la transecta.

Finalmente, se realizaron mediciones espectrométricas de 30 minutos de duración a lo largo del día con intervalos de 30 minutos comenzando a las 6:00 am hasta las 6:00 p. m. Dichas mediciones fueron llevadas a cabo a fin de estudiar las posibles variaciones en las tasas de conteo producidas por los distintos radionúclidos naturales.



Figura 4.7. Nivelación del trípode



Figura 4.8. Adquisición gamma espectrométrica

4.2.3



Determinación de concentraciones de radionúclidos naturales mediante el programa ISOTOPIC (espectrometría gamma in situ):

El programa ISOTOPIC cuenta con dos modos de funcionamiento, a saber, el modo operador (Operator mode) y el modo supervisor (Supervisor mode). En el modo supervisor se define el tipo de determinación que será llevada a cabo en el modo operador, en tanto que en este último se realizan las especificaciones necesarias para el cálculo de concentraciones de radionúclidos.

El procesamiento de los espectros adquiridos tanto en el campo de prueba como en la transecta fue el siguiente: en primer lugar se utilizó el programa ISOTOPIC en el modo supervisor, especificando el tipo de determinación a realizar (soil mode, Figura 4.9). A continuación se utilizó el mencionado programa en el modo operador, especificando principalmente: 1) características geométricas del detector (eficiencia relativa, longitud y diámetro del cristal, altura sobre el suelo, orientación del detector durante las adquisiciones) (Figura 4.10), 2) calibración en energía, 3) densidades del suelo y del aire, 4) unidades en las que el reporte mostrará los resultados, y 5) base de datos de radionúclidos y distribución de los mismos en el suelo (parámetro α/ρ) (Figura 4.11). Una vez hechas las especificaciones necesarias para el cálculo de las concentraciones de radionúclidos, se procedió a descargar en la memoria del programa el espectro (Figura 4.12) y a ejecutar el análisis. El resultado fue un reporte de los radionúclidos presentes en el espectro (análisis cualitativo) y la concentración (análisis cuantitativo) de estos (Figura 4.13).

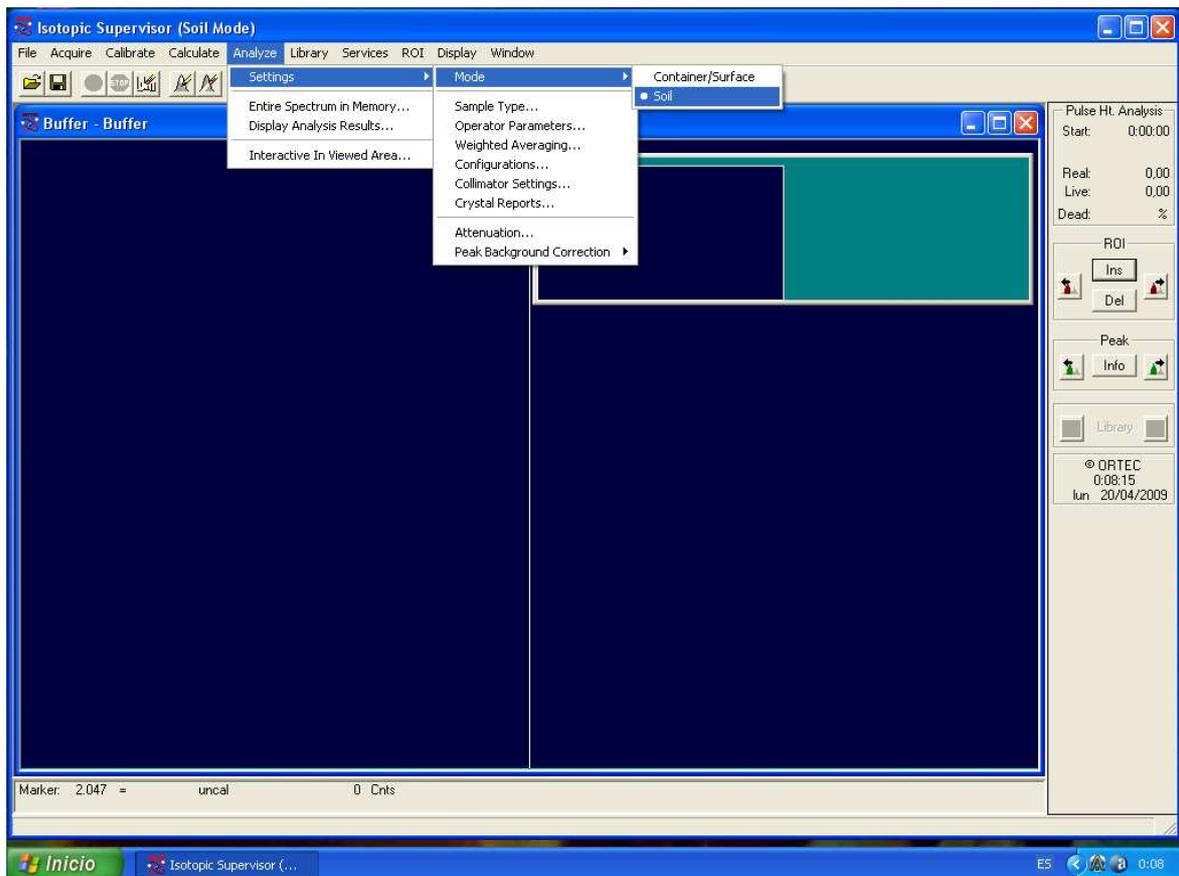


Figura 4.9. Programa ISOTOPIC (supervisor).
Selección de la determinación a realizar
(concentración de radionúclidos en suelos, soil mode)

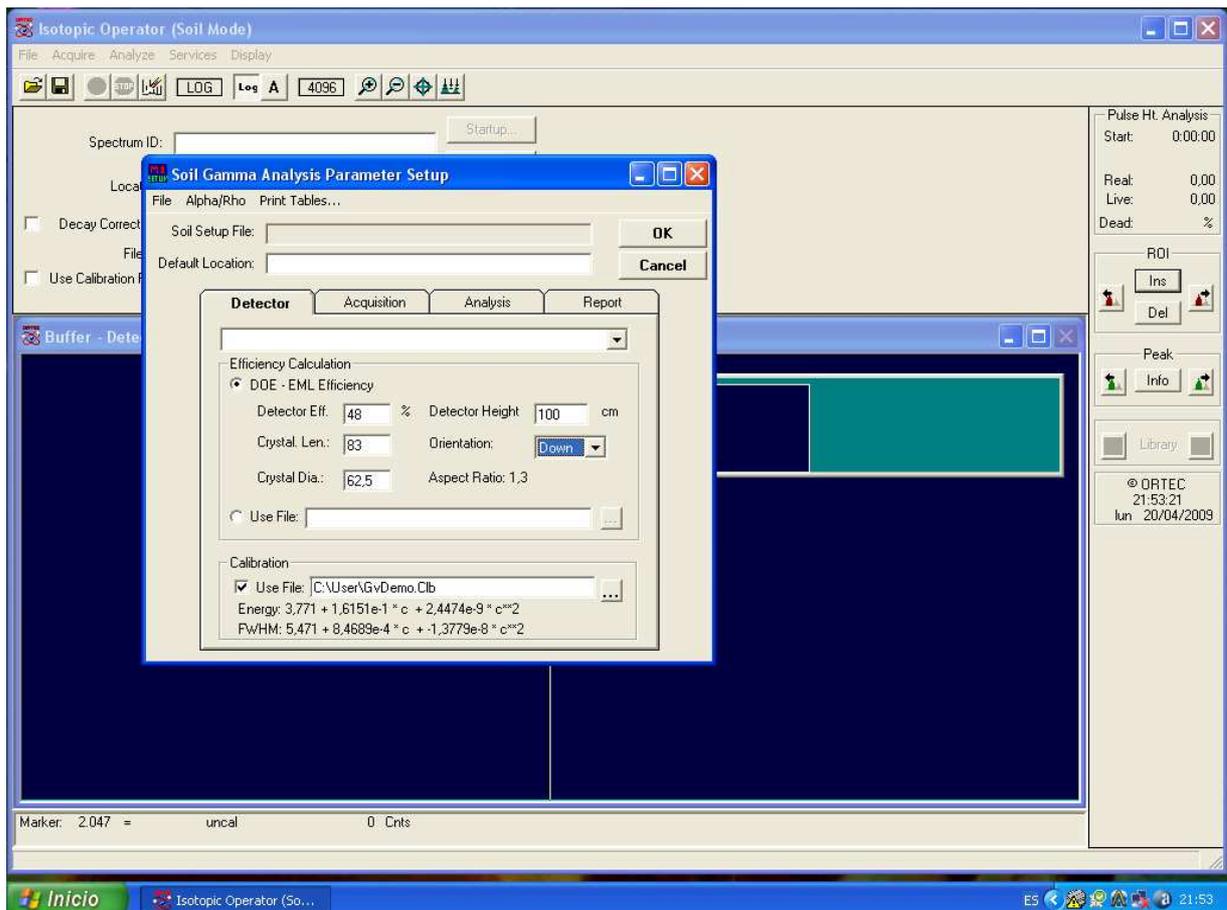


Figura 4.10. Programa ISOTOPIC (operador). Especificación de las características del detector necesarias para el cálculo de eficiencias.

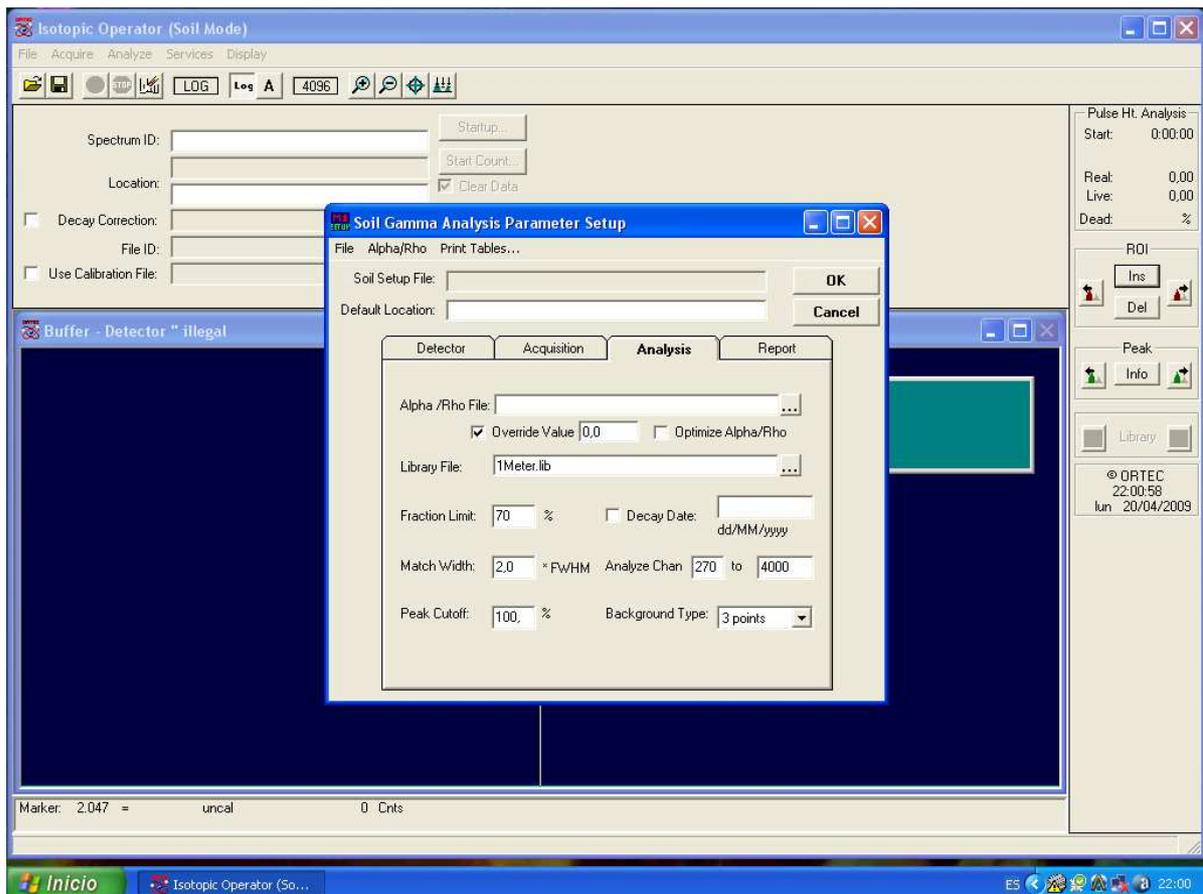


Figura 4.11. Programa ISOTOPIC (operador). Especificación de distribución de radionúclidos en el suelo ($\alpha/\rho=0$) y biblioteca de radionúclidos a utilizar

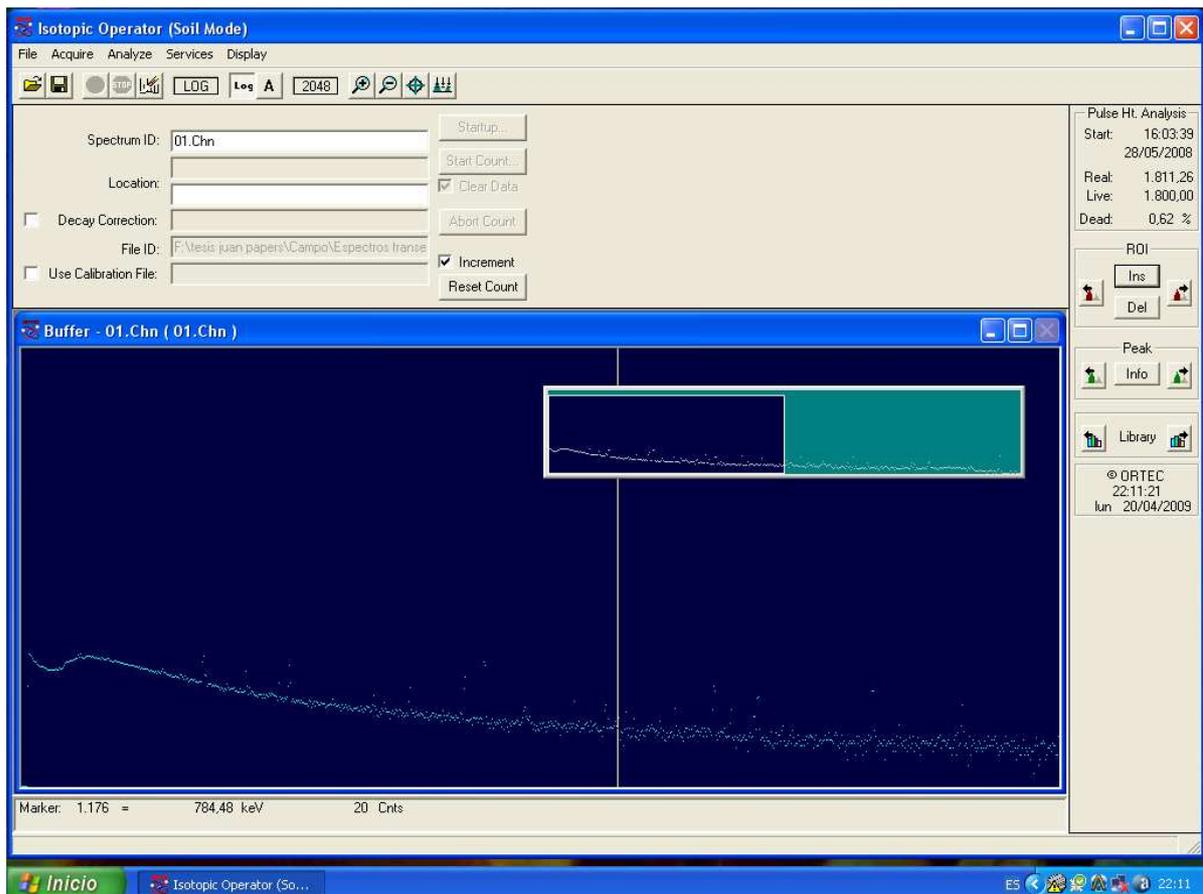


Figura 4.12. Programa ISOTOPIC (operador).
Descarga de espectro de campo en la memoria

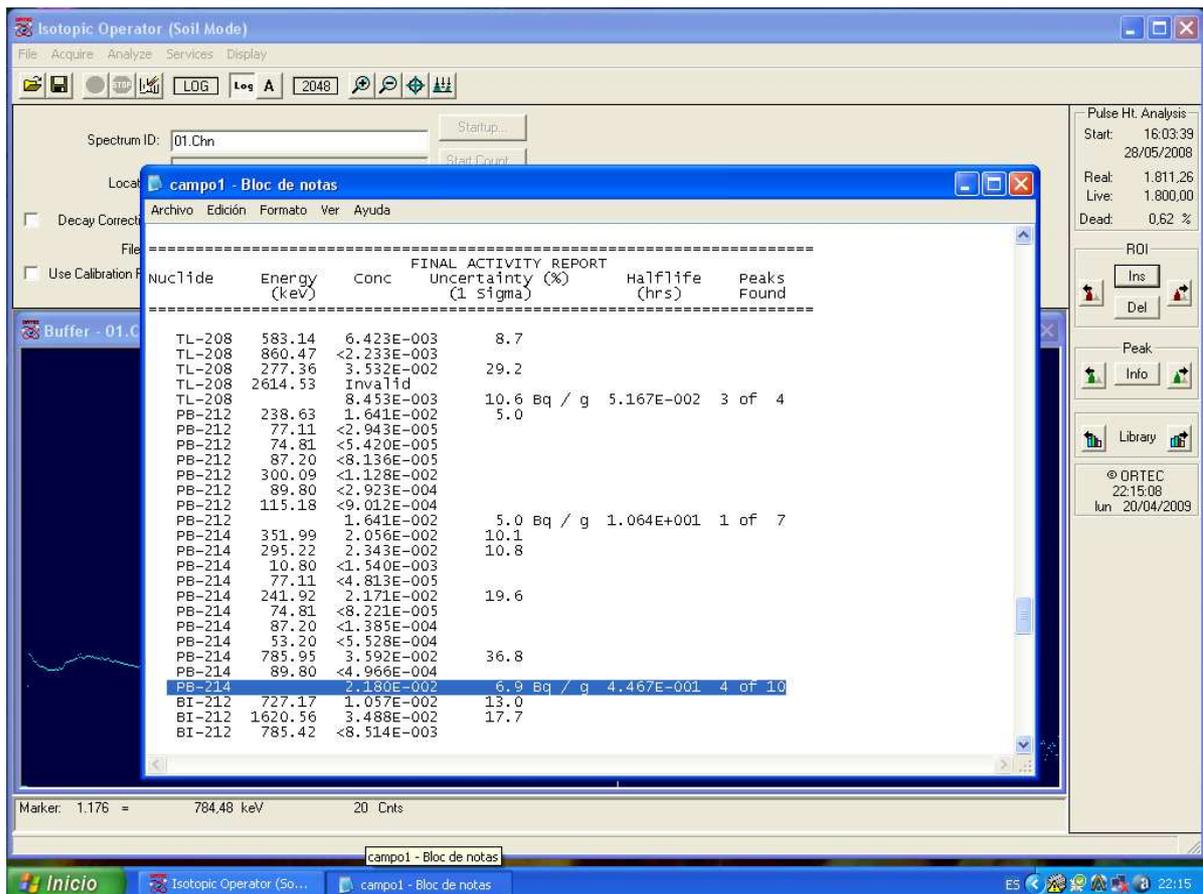


Figura 4.13. Programa ISOTOPIC (operador).
Reporte de radionúclidos presentes y su



CAPITULO V

Resultados y Discusiones

5.1 Calibración en eficiencia para la determinación de radionúclidos mediante espectrometría gamma “in situ”

5.1.1 Determinación de los factores necesarios a fin de llevar a cabo la calibración en eficiencia para mediciones espectrométricas “in situ”:

5.1.1.1 *Método convencional desarrollado por Beck:*

➤ N_0/ϕ :

Las fuentes de que se dispuso a fin de determinar los factores de calibración se presentan en la Tabla I:

Tabla I: Fuentes gamma disponibles

Fuentes	Actividad (Bq)	Energía (keV)	P.E. (%)
Cs-137	37259	661,66	85,21
Ba-133	40737	302,85	18,33
		356,017	62,05
Co-60	34632	1332,5	99,97
		1173,24	99,99

P.E.: Probabilidad de emisión

Se tuvieron en cuenta aquellos radionúclidos pertenecientes a las series del uranio (U-238), torio (Th-232) y potasio (K-40) cuyas energías poseyeran mayor cociente de ramificación, es decir mayor probabilidad de emisión gamma por desintegración (Tabla II):

**Tabla II: Radionúclidos de interés**

Radionúclido	Energía (keV)	P.E. (%)
Pb-214	295	18,5
	352	35,8
Bi-214	609	44,8
	1120	14,8
	1238	5,82
	1765	15,36
Ra-226	186	3,5
Pb-212	239	43,3
Ac-228	911	26,6
Tl-208	583	84,5
	861	12,42
	2615	99,16
K-40	1461	10,67

Así, teniendo en cuenta el procedimiento descrito en la metodología se determinaron los valores de N_0/ϕ para las energías de las fuentes disponibles (Tabla III):

Tabla III: Valores calculados de N_0/ϕ para las energías de las fuentes disponibles

Energía (keV)	N_0/ϕ (cpm por $\gamma/\text{cm}^2\text{-s}$)
302,85	$813,91 \pm 81,39$
356,017	$737,00 \pm 73,70$
661,66	$511,91 \pm 51,19$
1173,24	$378,17 \pm 37,82$
1332,5	$351,04 \pm 35,10$

Ahora bien, se ha obtenido con los datos una expresión de la forma (5-1):

$$\text{Ln}(N_0/\phi) = a - b\text{Ln}(E) \quad (5-1)$$

donde E está expresada en MeV.

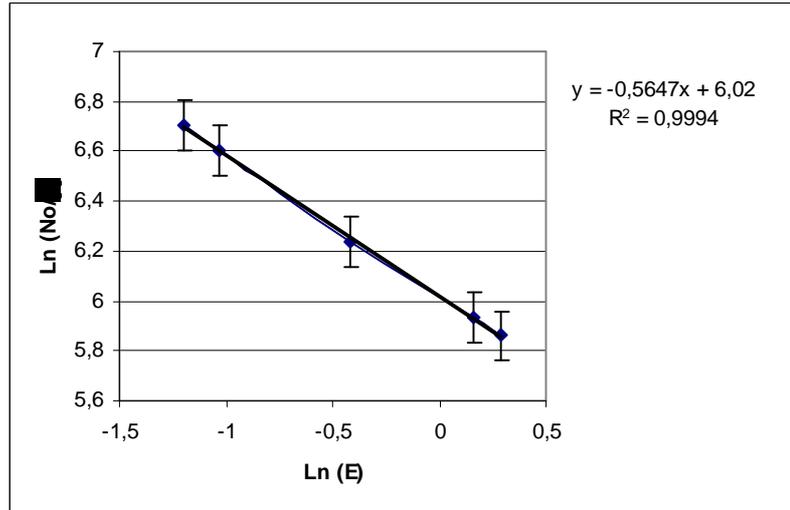


Figura 5.1: Ajuste de los valores experimentales de N_0/ϕ a una recta

Donde, a partir del ajuste hecho, $a = (6,02 \pm 0,01)$ y $b = (0,5647 \pm 0,0077)$

Las incertidumbres reportadas para a y b fueron obtenidas mediante las expresiones 5-2, 5-3, 5-4 (Tomadas de [33]).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (y_i - bx_i - a)^2}{n - 2}} \quad (5-2)$$

$$\Delta b = \frac{\sqrt{n}\sigma}{\sqrt{n \sum_1^n x_i^2 - \left(\sum_1^n x_i\right)^2}} \quad (5-3)$$



$$\Delta a = \Delta b * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (5-4)$$

donde:

$n = 5$

x_i : Logaritmo neperiano del i-ésimo valor de energía (en MeV) reportado en la Tabla III.

y_i : Logaritmo neperiano del i-ésimo valor de N_o/ϕ reportado en la Tabla III

Luego, se utilizó la expresión obtenida para determinar los valores de N_o/ϕ para las energías de los radionúclidos de interés, los resultados se muestran en la Tabla IV:

Tabla IV: Valores calculados de N_o/ϕ para las energías de los radionúclidos de interés

Energía(keV)	N_o/ϕ (cpm por γ/cm^2-s)
186	1064,042 \pm 332,238
239	923,574 \pm 286,632
295	820,057 \pm 78,855
338	759,405 \pm 34,230
352	742,199 \pm 26,686
511	601,323 \pm 2,709
583	558,187 \pm 1,209
609	544,602 \pm 0,922
861	448,022 \pm 0,11
911	433,823 \pm 0,078
1120	386,064 \pm 0,022
1238	364,832 \pm 0,012
1461	332,283 \pm 0,001
2615	239,1699 \pm 0,0001

Las incertidumbres para la Tabla IV se calcularon utilizando la expresión (5-5).

$$\Delta \left(\frac{N_o}{\phi} \right) = \frac{e^b}{E^a} (\Delta b - \text{Ln}(E) * \Delta a) \quad (5-5)$$

El ajuste de los datos a una expresión de la forma (5-1) se fundamenta en los resultados obtenidos por Helfer y Miller [1] en la determinación del factor N_o/ϕ como función de la energía para 8 detectores de Ge con diferentes eficiencias relativas (Figura 5.1), dichos resultados muestran la dependencia lineal de $\text{Ln}(N_o/\phi)$ respecto a $\text{Ln}(E)$. Por otra parte, el comportamiento lineal antes mencionado se mantendrá en el rango desde aproximadamente 200 keV hasta energías superiores a los 2000 keV (Figura 5.2), por lo cual las extrapolaciones hechas para obtener N_o/ϕ para energías inferiores a 300 keV y superiores a 1332 keV quedan justificadas.

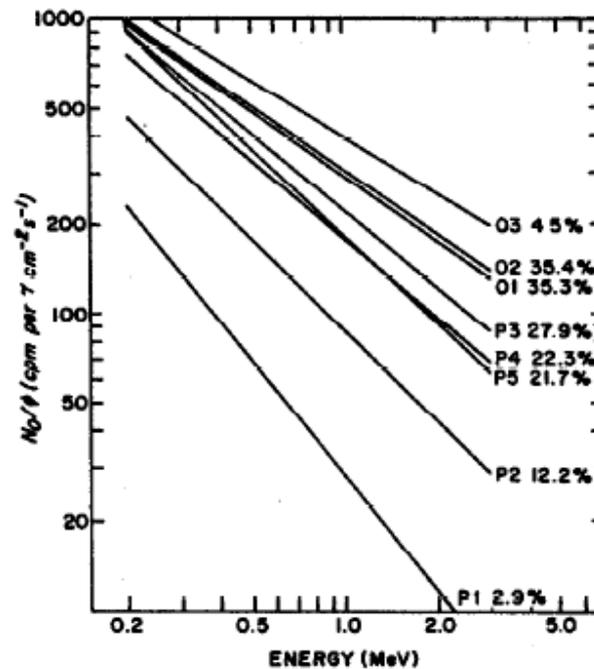


Figura 5.2: N_o/ϕ vs Energía para distintos detectores. Tomado y modificado de [1].

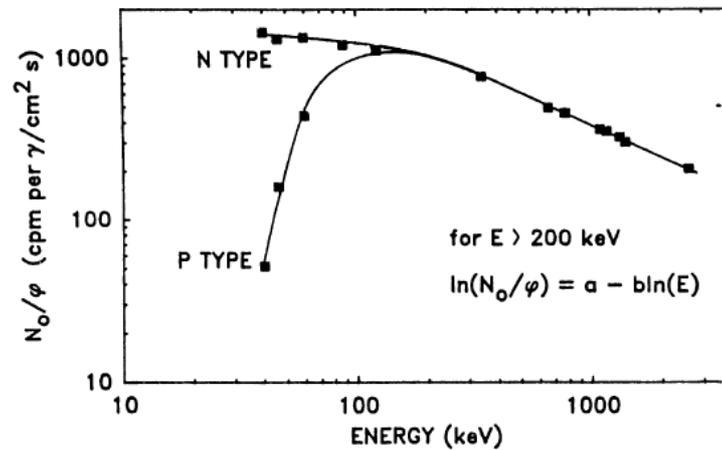


Figura 5.3: N_o/ϕ vs Energía para detectores de Ge, tipo p y tipo n . Tomado de [1].

➤ N_f/N_o

El parámetro N_f/N_o es un factor de corrección angular, y tiene en cuenta el hecho de que la respuesta de un detector de Ge cilíndrico ante rayos gamma que inciden desde diferentes ángulos cenitales no es isotrópica. Por lo tanto, este factor dependerá de la geometría tanto del detector como de la fuente.

A fin de obtener los valores de N_f/N_o , se evaluó la ecuación (4-2) numéricamente utilizando para ello: a) los datos de distribución de flujo no dispersado que llega al detector ($\phi(\theta)/\phi_o$) de la Tabla 6 que se encuentra en el trabajo de Beck [6] y b) los datos experimentales obtenidos para la respuesta angular relativa del detector ($N(\theta)/N_o$).

Los resultados obtenidos a partir de la medición de las fuentes disponibles se muestran en la Tabla V:

Tabla V: Valores calculados de N_f/N_0 para las energías de las fuentes disponibles

Energía(keV)	(N_f/N_0)
302,71	$1,37 \pm 0,07$
355,82	$1,40 \pm 0,06$
661,62	$1,35 \pm 0,07$
1173,3	$1,33 \pm 0,07$
1332,58	$1,31 \pm 0,07$

Se estimó el error en la determinación del factor para las energías de las fuentes disponibles en un 5%. Por otra parte, se observó que los resultados obtenidos se encuentran alrededor de un valor promedio de 1,35 presentando un coeficiente de variación porcentual de 3% que indica la poca desviación de los resultados respecto al promedio. El valor de N_f/N_0 para las energías de los radionúclidos de interés utilizado fue de $(1,35 \pm 0,07)$. Aunque, como se puede observar en la Figura 5.4 el valor de N_f/N_0 depende de la energía, se puede hablar (a partir de 100 keV) de un valor promedio teórico aproximado de $(1,30 \pm 0,12)$. Puede decirse entonces que el valor promedio obtenido experimentalmente es el esperado.

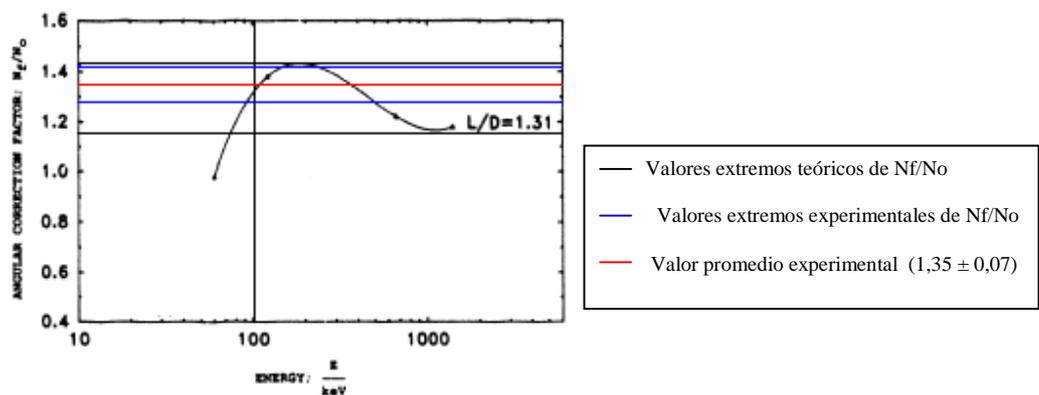


Figura 5.4: N_f/N_0 vs Energía obtenida por Helfer y Miller. Tomado y modificado de [1].

➤ ϕ/A :

A fin de determinar este factor para las energías de los radionúclidos de interés en primer lugar se procedió a graficar los valores de flujo no dispersado que llega al detector para una distancia fuente- detector de 1 m obtenidos por Beck y dicha gráfica se ajustó mediante una recta (Figura 5.5), luego, los valores obtenidos para las energías de los radionúclidos de interés fueron multiplicados por las probabilidades de emisión correspondientes (Tabla VII).

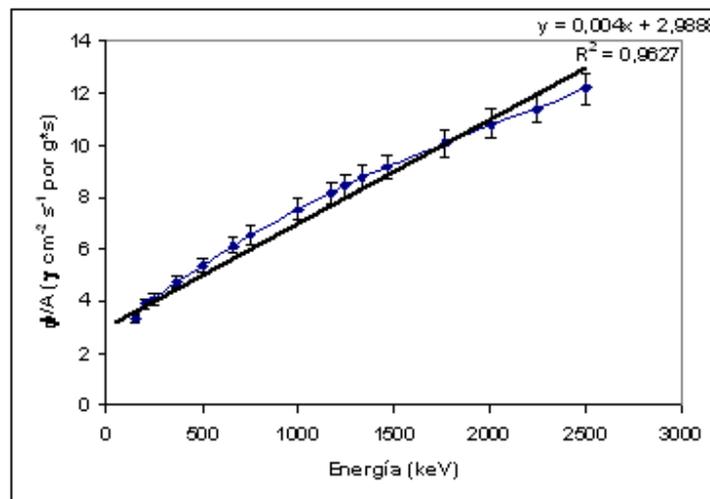


Figura 5.5: Ajuste de los valores de flujo no dispersado obtenidos por Beck & cols.[6]

Tabla VI: Valores de ϕ/A para las energías de los radionúclidos de interés

Energía (keV)	$(\phi \pm 0,006) (\gamma \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ por g*s})$	P. E.	$\phi/A * 10^{-4} (\gamma \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ por Bq*kg}^{-1})$
186	3,730	0,04	$1,4920 \pm 0,0002$
239	3,944	0,433	$17,078 \pm 0,002$
295	4,168	0,185	$7,711 \pm 0,001$
352	4,396	0,358	$15,738 \pm 0,002$
511	5,032	0,226	$11,3723 \pm 0,0002$
583	5,320	0,845	$44,9540 \pm 0,0001$



609	5,424	0,448	24,2995 ± 0,0005
861	6,430	0,124	7,9860 ± 0,0003
911	6,632	0,266	17,6411 ± 0,0007
1120	7,468	0,148	11,1132 ± 0,0008
1238	7,940	0,06	4,7640 ± 0,0009
1460	8,828	0,1067	9,4195 ± 0,0008
1765	10,048	0,1536	15,4337 ± 0,0003
2615	13,448	0,99	133,135 ± 0,006

Finalmente los valores de N_f/A para las energías de los radionúclidos de interés fueron obtenidos mediante la ecuación (3-25), los resultados se muestran en la Tabla VII:

Tabla VII: Valores de N_f/A para las energías de los radionúclidos de interés

Energías (keV)	N_f/A (cpm por Bq*kg)
186	0,21 ± 0,03
239	2,19 ± 0,34
295	0,87 ± 0,14
352	1,61 ± 0,27
583	3,41 ± 0,58
609	1,80 ± 0,30
911	1,04 ± 0,16
1120	0,58 ± 0,08
1238	0,24 ± 0,03
1460	0,43 ± 0,07
1765	0,63 ± 0,11
2615	3,53 ± 0,23

5.1.1.2 Método semi-empírico (Helfer & Miller [1]):

A fin de determinar el valor de N_f/A mediante el método semi-empírico se obtuvieron a partir de los valores calculados por Helfer y Miller[1] dos factores a saber: el factor de corrección angular N_f/N_o y el factor N_o/A , luego evaluando la ecuación (5-6).



$$\left(\frac{N_f}{A}\right)_H = \frac{N_f}{N_o} \frac{N_o}{A} \quad (5-6)$$

Los resultados de evaluar la ecuación (5-6) se muestran en la Tabla VIII y las incertidumbres allí mostradas son de 15% para energías menores a 500 keV y 5% para energías superiores a 500 keV (de acuerdo a [1]).

Tabla VIII: Valores de N_f/A para las energías de los radionúclidos de interés, obtenidos mediante la metodología desarrollada por Helfer & Miller

Energía (keV)	Radionúclido	N_f/N_o	N_o/A	$(N_f/A)_H$
186	Ra-226	1,34	0,15	$0,20 \pm 0,03$
239	Pb-212	1,32	1,96	$2,54 \pm 0,38$
295	Pb-214	1,30	0,72	$0,94 \pm 0,14$
352	Pb-214	1,29	1,33	$1,71 \pm 0,26$
583	Tl-208	1,24	0,98	$1,22 \pm 0,12$
609	Bi-214	1,23	1,47	$1,80 \pm 0,18$
911	Ac-228	1,18	0,87	$1,03 \pm 0,10$
1120	Bi-214	1,16	0,47	$0,55 \pm 0,05$
1238	Bi-214	1,16	0,19	$0,22 \pm 0,02$
1461	K-40	1,13	0,31	$0,35 \pm 0,04$
1765	Bi-214	1,16	0,44	$0,51 \pm 0,05$
2615	Tl-208	1,05	0,98	$1,03 \pm 0,10$

5.1.1.3 Comparación de las constantes de calibración:

En primer lugar, se calculó el error relativo porcentual (ecuación (5-7)) para las constantes obtenidas siguiendo la metodología de Beck y cols., luego se calculó la diferencia relativa porcentual entre las constantes obtenidas por siguiendo las metodologías antes mencionadas (ecuación (5-8)).

$$E_r \% = \frac{\Delta B}{B} * 100 \quad (5-7)$$



donde:

$E_r\%$: Error relativo porcentual

B : Valor de la constante de calibración ($B = N_f/A$)

ΔB : Incertidumbre del valor de la constante de calibración

$$D_r \% = \frac{|(B_B - B_H)|}{B_B} * 100 \tag{5-8}$$

donde:

$D_r\%$: Diferencia relativa porcentual

B_B : Valor de la constante de calibración determinada por la metodología de Beck y cols. para una energía determinada.

B_H : Valor de la constante de calibración determinada por la metodología de Helfer & Miller para una energía determinada.

Los resultados se muestran en la Figura 5.6:

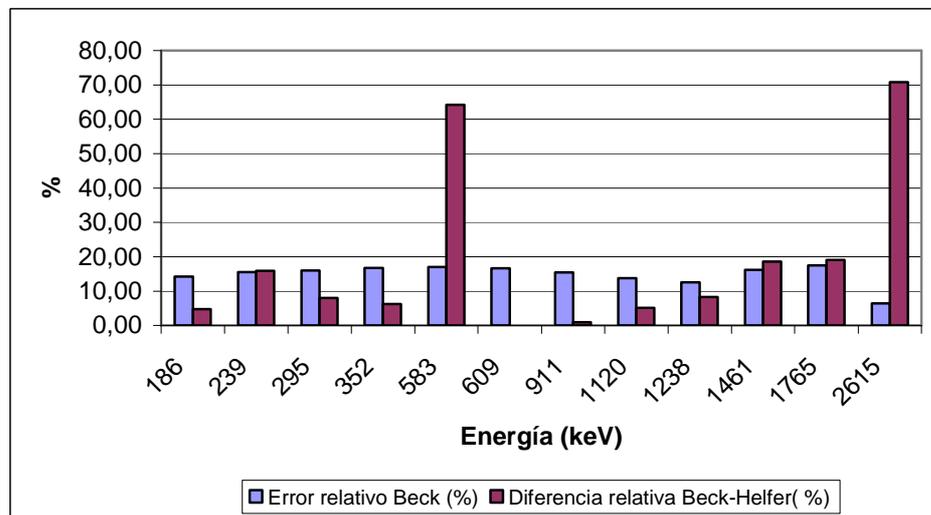


Figura 5.6: Comparación entre error relativo porcentual de las constantes de calibración (Metodología Beck) y diferencia relativa porcentual



En la Figura 5.6 se observa que para buena parte de las energías de los radionúclidos de interés la diferencia relativa porcentual está dentro de los límites de los errores porcentuales de las constantes de calibración determinadas siguiendo la metodología de Beck cols., este hecho indica que las constantes determinadas siguiendo ambas metodologías pueden considerarse iguales. Por otra parte, también se encontraron dos energías para las cuales las diferencias entre las constantes de calibración son notorias (583 y 2615 keV).

5.1.2 Adquisición en campo de prueba

5.1.2.1 Verificación de variación temporal:

A fin de tener en cuenta las variaciones diarias en las concentraciones de los radionúclidos pertenecientes tanto de la serie del U-238, como del Th-232 y el K-40, se realizaron 5 adquisiciones en el campo de prueba a diferentes horas. En primer lugar los espectros adquiridos en el campo de prueba fueron procesados utilizando el programa MAESTRO-32, determinando con este los conteos totales de los picos de absorción total correspondientes a los radionúclidos de interés (Figura 5.7).

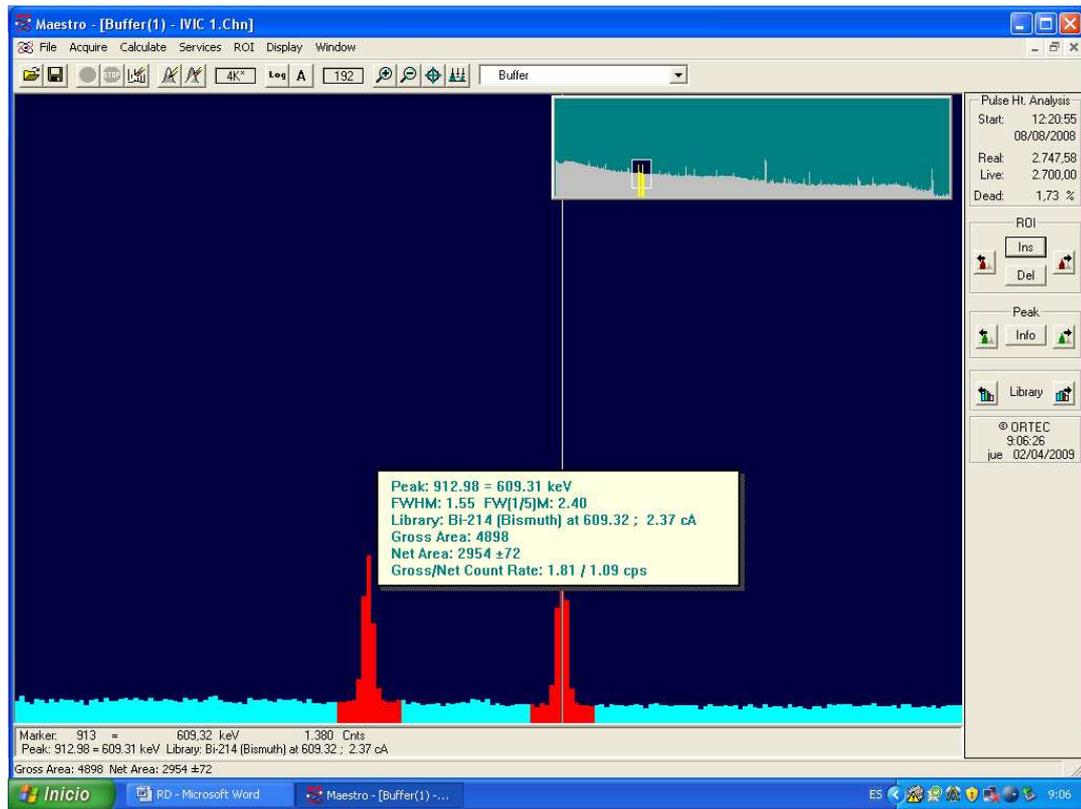


Figura 5.7: Ilustración de la determinación de las tasas de conteo de los picos de absorción total, empleando el programa MAESTRO-32.

Una vez determinados los conteos totales para cada una de las líneas energéticas correspondientes a los radionúclidos de interés, se procedió a graficarlas en función de la hora del día en la cual fue adquirido el espectro, para cada energía, con la finalidad de constatar si los posibles cambios en las condiciones climáticas del sitio (temperatura, humedad, densidad del aire, etc.) producirían cambios significativos en los conteos totales. Los resultados se muestran en las Figuras 5.8, 5.9 y 5.10. (las barras de error que muestran las figuras se obtuvieron del programa MAESTRO-32).

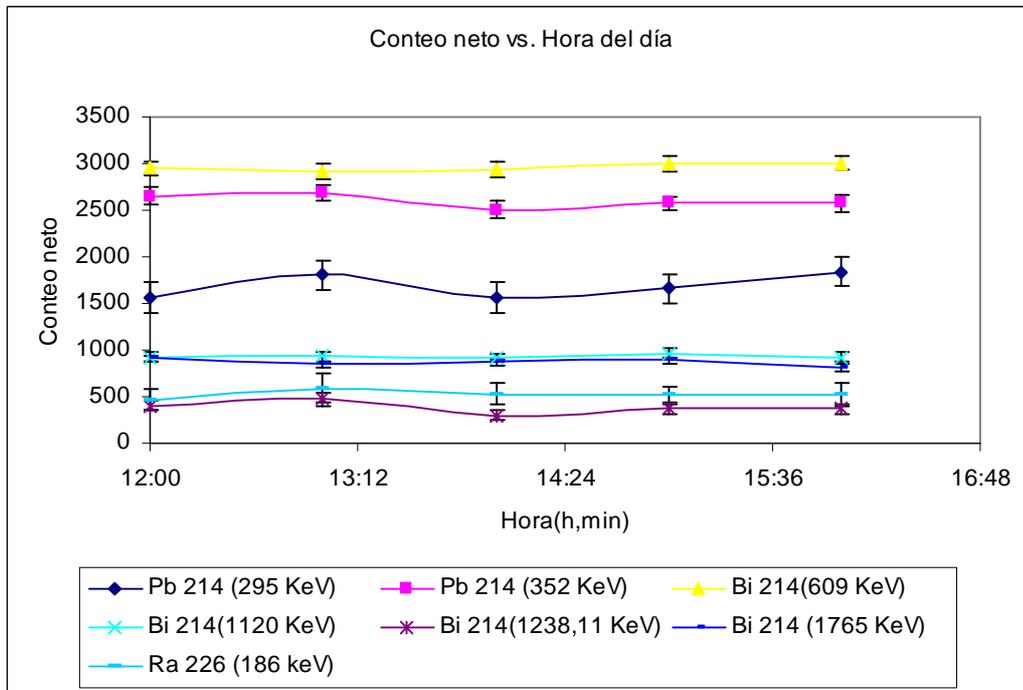


Figura 5.8 Conteos netos para los radionúclidos de la serie del U-238 en función de la hora del día

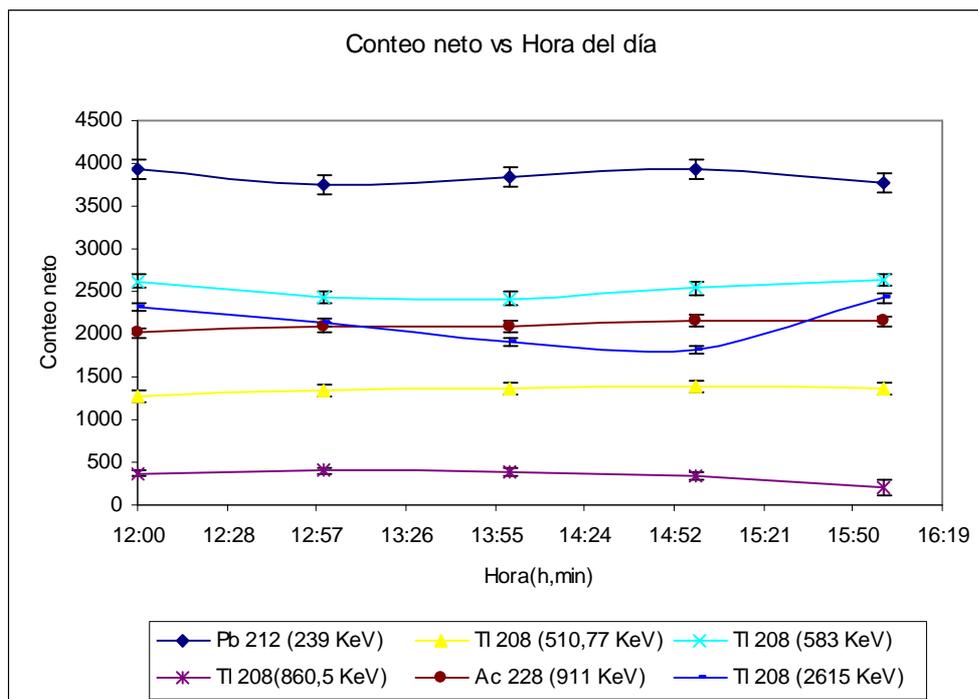


Figura 5.9 Conteos netos para los radionúclidos de la serie del Th-232 en función de la hora del día.

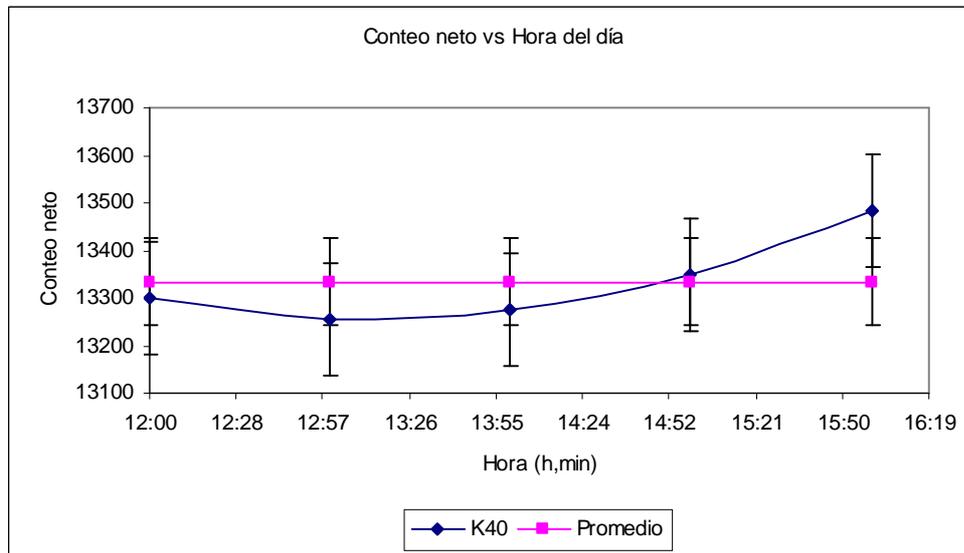


Figura 5.10 Conteos netos para K-40 en función de la hora del día.

En primer lugar, de las Figuras 5.8 y 5.9 se aprecia que los conteos netos de las energías de los radionúclidos de las series del U-238 y del Th-232 en las diferentes horas difieren entre sí, encontrando energías que presentan las mayores cantidades de conteos netos, como la energía de 609 keV del Bi-214 perteneciente a la serie del U-238 y la energía de 239 keV del Pb-212 perteneciente a la serie del Th-232. Las diferencias entre los conteos para diferentes energías pueden explicarse en función de las probabilidades de emisión (Tabla IX), así en tanto mayor la probabilidad de emisión para una energía en particular, esta, en un tiempo de medición determinado tendrá la mayor cantidad de conteos netos.

Tabla IX: Probabilidades de emisión para las energías de los radionúclidos de interés

Energía (keV)	Radionúclido	P.E.
	Serie U-238	
186	Ra-226	4,00%



295	Pb-214	18,50%
352	Pb-214	35,80%
609	Bi-214	44,80%
1120	Bi-214	14,80%
1238	Bi-214	6,00%
1765	Bi-214	15,36%
	Serie Th-232	
239	Pb-212	43,30%
511	Tl-208	22,60%
583	Tl-208	84,50%
861	Tl-208	12,40%
911	Ac-228	26,60%
2615	Tl-208	99,00%
1461	K-40	10,67%

En cuanto a la variación temporal de los conteos netos, de las Figuras 5.8, 5.9 y 5.10 también puede apreciarse que tanto para los radionúclidos de la series del U-238 y del Th-232 existen ligeras fluctuaciones en los conteos netos al transcurrir el tiempo. Dichas fluctuaciones realmente no sugieren de manera concluyente la dependencia temporal a lo largo de la tarde. Por otra parte, en la Figura 5.10 se observa que aunque en apariencia se evidenció una tendencia en los conteos netos para la energía correspondiente al K-40 a aumentar con la hora del día, los datos obtenidos bien pueden ser representados por un valor constante igual al promedio de los conteos netos.

5.1.2.2 Determinación de la concentración de radionúclidos mediante espectrometría gamma en laboratorio de muestras de suelo:

Una vez llevada a cabo la recolección y posterior preparación de las muestras de acuerdo a los procedimientos descritos en la metodología, cada muestra de suelo fue medida durante 20 horas y se determinó la concentración de los radionúclidos de interés mediante el método comparativo. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 5.11, 5.12 y 5.13.

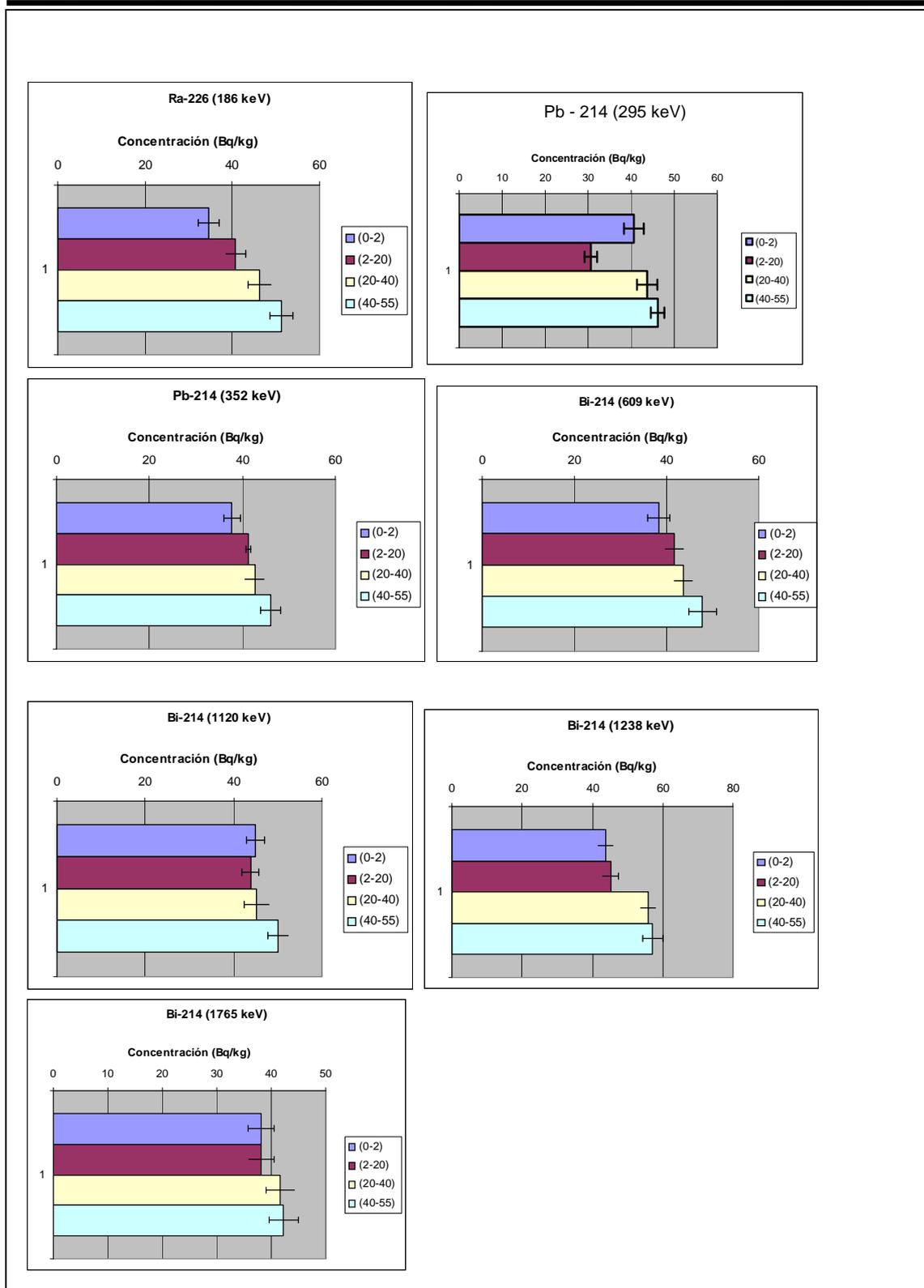


Figura 5.11 Concentraciones para las energías de los radionúclidos de la serie del U-238, para varios espesores de suelo.



En primer lugar, de manera general, y a modo de referencia, se tiene que los valores de concentración obtenidos para los radionúclidos de la serie del U-238 en muestras de suelos se encuentran ligeramente por encima del rango de valores de concentración promedio en la corteza terrestre, el cual, de acuerdo a [14] se encuentra entre 24,7 y 37,05 Bq/kg (2-3 ppm, siendo 1 ppm de U-238 = 12,35 Bq/kg).

La línea energética de 186 keV del Ra-226 presenta interferencia con la línea de 185,71 keV del U-235 (P. E. = 57,20%), ahora bien, los resultados evidencian la débil contribución de este último radionúclido en la línea energética del Ra-226, ya que una comparación entre las concentraciones obtenidas para las energías de 609 keV y 352 keV (poseen mayores P. E.) y la obtenida para la energía de 186 keV muestra que son iguales dentro del error experimental. En cuanto al comportamiento de en función de la profundidad se tiene que para la única línea del Ra-226 (186 keV) la concentración de este radionúclido aumenta de forma creciente desde $(34,54 \pm 1,62)$ Bq/kg en el estrato más superficial hasta $(51,39 \pm 2,41)$ Bq/kg en el estrato más profundo (Figura 5.11).

Para el Pb-214, en la línea de 295 keV se observó una variación en las concentraciones entre el estrato más superficial y el más profundo de aproximadamente 6 Bq/kg, presentando en el estrato de 2 a 20 cm una disminución brusca (de 10 Bq/kg), lo cual comparado con los valores obtenidos mediante otras líneas energéticas para el mismo estrato sugiere la posibilidad de autoabsorción de la radiación, esta, aumenta mientras menor sea la energía de la radiación gamma, sin embargo al tener en cuenta que la diferencia entre 295 y 352 keV no es grande la aparición de autoabsorción no tiene sustento puesto que para la línea de 352 keV las concentraciones aumentan gradualmente a medida que aumenta la profundidad del estrato siendo la variación entre el valor mínimo y el máximo de aproximadamente 9 Bq/kg.

Para el Bi-214, las concentraciones obtenidas mediante sus diversas líneas energéticas a lo largo del perfil muestran un aumento gradual con la profundidad del perfil, siendo de todas las líneas energéticas el menor valor de concentración obtenido de $(38,17 \pm 2,40)$ Bq/kg (estrato de 0 a 2 cm) y el mayor valor de $(57,10 \pm 2,86)$ Bq/kg (estrato de 40 a 55 cm). Dado que los valores obtenidos para la concentración de los tres radionúclidos de la serie del U-238 estudiados no



difieren entre sí de forma significativa (de 3 a 10 Bq/kg), no se evidencia desequilibrio en la serie.

A partir de lo descrito anteriormente y de la figura 5.11 acerca de las concentraciones para los radionúclidos de interés pertenecientes a la serie del U-238 (Ra-226, Pb-214 y Bi-214), puede afirmarse que la distribución de dichos radionúclidos no es estrictamente uniforme, siendo este hecho un factor importante a tener en cuenta en la determinación de los factores de calibración puesto que esta estrechamente relacionado con la geometría de la fuente de radiación gamma.

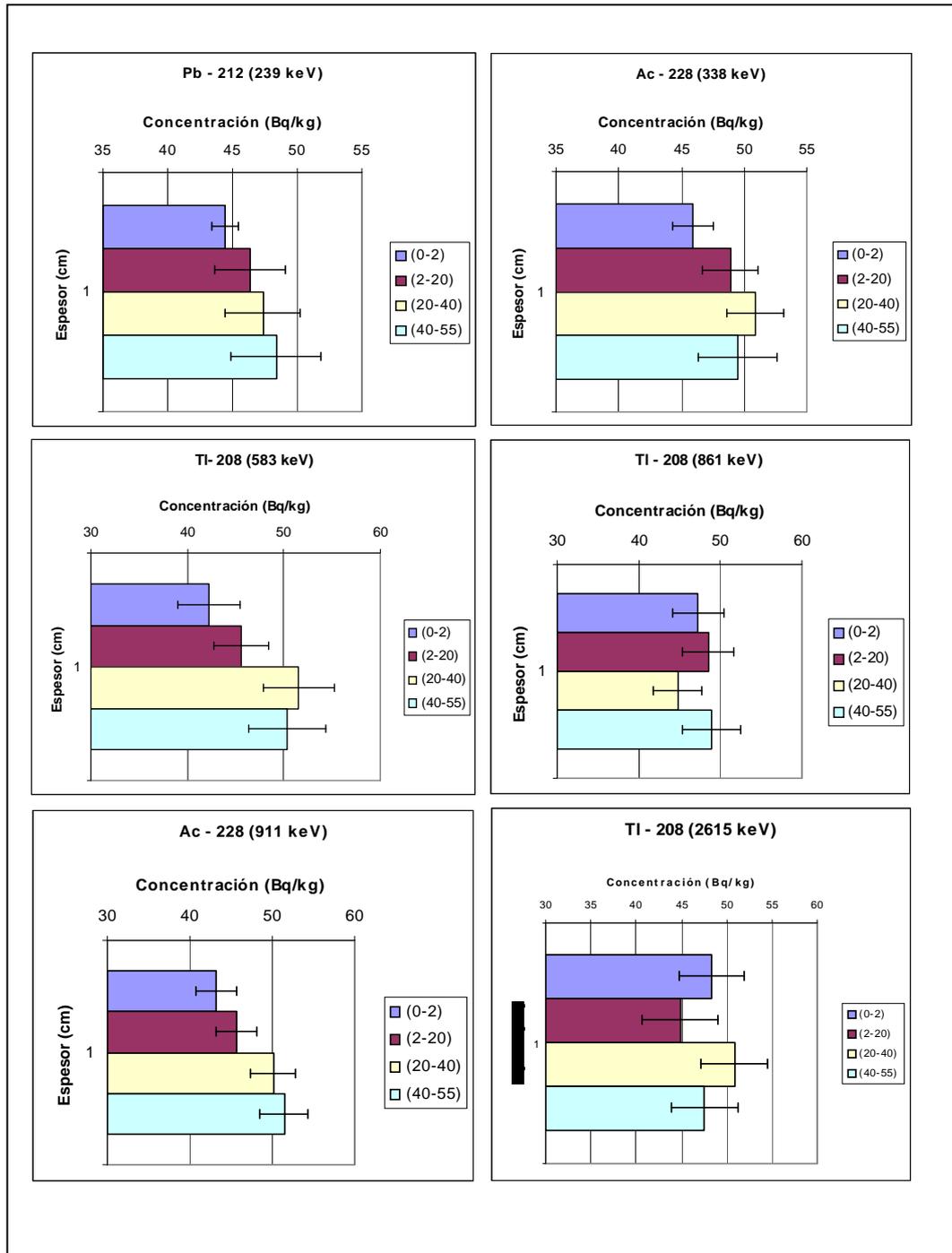


Figura 5.12: Concentraciones para las energías de los radionúclidos de la serie del Th-232, para varios espesores de suelo.



Los valores de concentración obtenidos para los radionúclidos de la serie del Th-232 en muestras de suelos se encuentran en el rango de valores de concentración promedio en la corteza terrestre, es decir, entre 32,48 y 48,72 Bq/kg, de acuerdo a [14], (8-12 ppm, siendo 1 ppm de Th-232 = 4,06 Bq/kg).

En la Figura 5.12 puede apreciarse nuevamente que las concentraciones para las diferentes líneas energéticas del Th -232 presentan variaciones a lo largo de los 55 cm del perfil del suelo. Para la línea de 239 keV del Pb-212 la concentración de este radionúclido aumenta de forma creciente desde $(44,48 \pm 2,72)$ Bq/kg en el estrato más superficial hasta $(48,36 \pm 3,42)$ Bq/kg en el estrato más profundo.

Para las líneas energéticas del Ac-228 (338 y 911 keV) se observa un ligero incremento de la concentración con la profundidad, siendo la diferencia entre los valores máximos y mínimos de aproximadamente 3 Bq/kg para la línea de 338 keV, y de aproximadamente 8 Bq/kg para línea de 911 keV.

Finalmente para el Tl-208, los valores de concentración obtenidos para las líneas de 861 y 2615 keV varían a lo largo del perfil alrededor de un promedio de $(47,42 \pm 3,43)$ Bq/kg y $(47,90 \pm 3,79)$ Bq/kg para cada línea respectivamente.

Para el K-40 los valores de concentración determinados para las muestras de suelos son altos comparados con el rango de valores de concentración promedio para este radionúclido en la corteza terrestre, el cual es de 626 a 782,5 Bq/kg (2-2,5%, siendo 1% de K-40 = 131 Bq/kg). En la Figura 5.13 se observa la concentración de K-40 para diferentes estratos del suelo, de ella puede apreciarse que el valor mínimo de concentración de K-40 se encuentra en la capa superficial $(853,81 \pm 25,61)$ Bq/kg, para estratos más profundos los valores de concentración aumentan ligeramente, experimentando un valor máximo para el estrato de (40-55) cm.

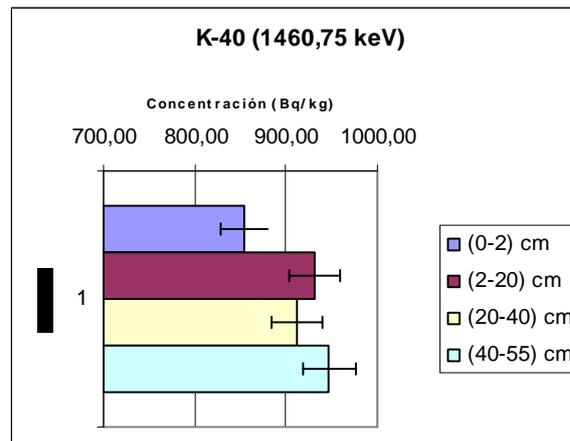


Figura 5.13: Concentración del K-40, para varios espesores de suelo.

5.1.2.3 Comparaciones:

En la Tabla X se muestran los valores de concentración para los radionúclidos de interés determinados tanto a partir de mediciones in situ (metodología desarrollada por Beck & cols. y programa ISOTOPIC), como en muestras de suelos. Para las muestras de suelos los valores reportados en dicha tabla se obtuvieron a partir del promedio de los valores de concentración para los espesores de suelo (0-2) y (2-20) cm,. Este criterio se justifica en el hecho de que la radiación que llega al detector del suelo proviene de entre los 10 y 20 cm del suelo [17].



Tabla X: Comparación entre las concentraciones obtenidas mediante el programa ISOTOPIC y el análisis espectrométrico de muestras de suelos en laboratorio.

Energía (keV)	Radionúclido	Serie	Concentración (Bq/kg)		Muestras (laboratorio)
			Beck (in situ)	Isotopic (in situ)	
186	Ra-226	U-238	52,95 ± 3,92	62,93 ± 8,20	37,65 ± 1,77
239	Pb-212	Th-232	41,04 ± 1,74	42,79 ± 1,82	45,42 ± 2,01
295	Pb-214	U-238	37,25 ± 2,41	31,46 ± 2,70	35,63 ± 1,08
352	Pb-214	U-238	35,87 ± 1,21	33,45 ± 2,52	39,48 ± 1,16
583	Tl-208	Th-232	45,83 ± 1,83	45,58 ± 3,05	43,91 ± 3,03
609	Bi-214	U-238	35,56 ± 1,01	31,95 ± 2,23	39,95 ± 2,17
861	Tl-208	Th-232	43,69 ± 3,28	46,27 ± 1,47	47,89 ± 3,16
911	Ac-228	Th-232	44,9 ± 1,27	42,34 ± 2,53	44,45 ± 2,46
1120	Bi-214	U-238	35,72 ± 1,95	39,51 ± 5,47	44,36 ± 2,00
1238	Bi-214	U-238	40,54 ± 1,05	43,88 ± 2,51	44,55 ± 2,22
1461	K-40		689,05 ± 6,09	788,40 ± 13,47	892,52 ± 26,78
1765	Bi-214	U-238	35,65 ± 3,34	37,88 ± 2,47	38,19 ± 2,41
2615	Tl-208	Th-232	37,06 ± 4,50	*	46,61 ± 3,91

* Esta energía no estaba en la biblioteca de radionúclidos del programa, por lo cual no se pudo determinar la concentración.

A fin de comparar los valores de concentración obtenidos para los diferentes radionúclidos de las series naturales (y potasio – 40) obtenidos tanto para mediciones in situ como para mediciones de muestras de suelos (mediciones de laboratorio), se graficó el error relativo porcentual de las concentraciones obtenidas con el programa ISOTOPIC y la diferencia relativa porcentual de estas respecto a las obtenidas mediante: 1) las constantes de calibración determinadas en la sección 5.1.1.1 (Figura 5.14) y 2) las determinadas utilizando muestras de suelos (Figura 5.15).

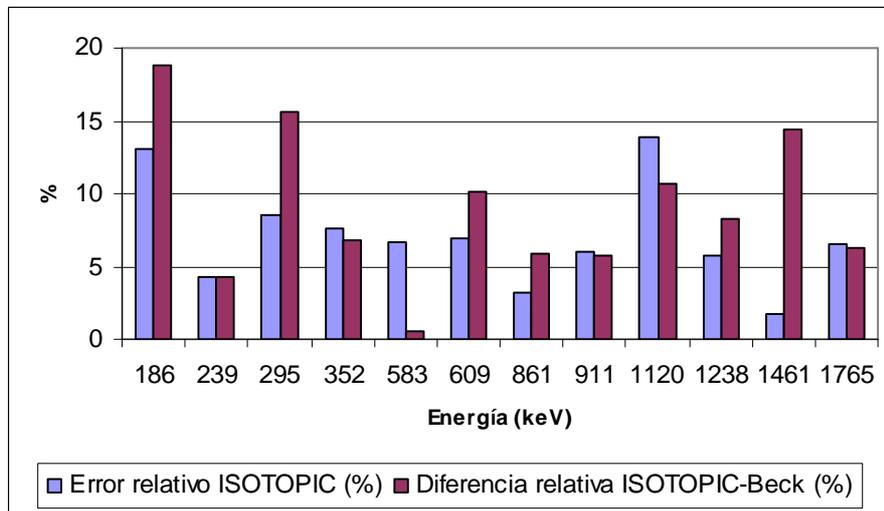


Figura 5.14: Comparación entre error relativo porcentual de los valores de concentración de radionúclidos determinados mediante el Programa ISOTOPIC respecto a los determinados usando las constantes de calibración (Beck y cols.)

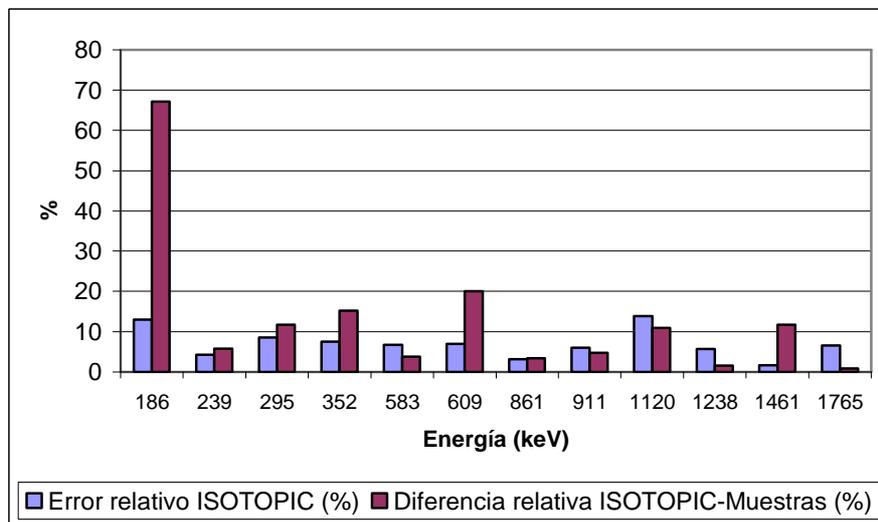


Figura 5.15: Comparación entre error relativo porcentual de los valores de concentración de radionúclidos determinados mediante el Programa ISOTOPIC respecto a los determinados mediante el análisis de muestras de suelos en laboratorio.

De las Figuras 5.14 y 5.15 se observa que en su mayoría tanto el error relativo porcentual en la determinación de las concentraciones mediante el programa ISOTOPIC, así como las diferencias relativas porcentuales no exceden el 20%, este hecho constituye un fuerte indicativo de que no existen grandes diferencias en la determinación de las concentraciones ya sea mediante mediciones llevadas a cabo in situ como las realizadas en laboratorio. Sin embargo, para la energía de 186 keV correspondiente al radionúclido Ra -226 sí se encontró una gran diferencia relativa porcentual que excede el 60 % (Figura 5.15), esta particularidad quizá se deba (para mediciones in situ) al hecho de que el comportamiento del detector para energías menores a 200 keV no es lineal, por lo cual se tendrá la tendencia a sobreestimar las concentraciones para estas energías.

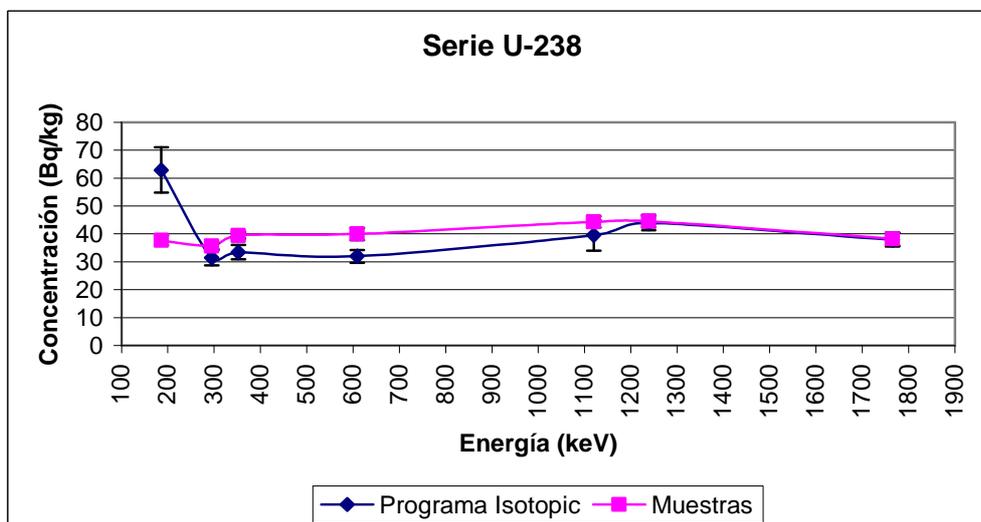


Figura 5.16: Concentración de radionúclidos en función de la energía para los radionúclidos de la serie del U-238.

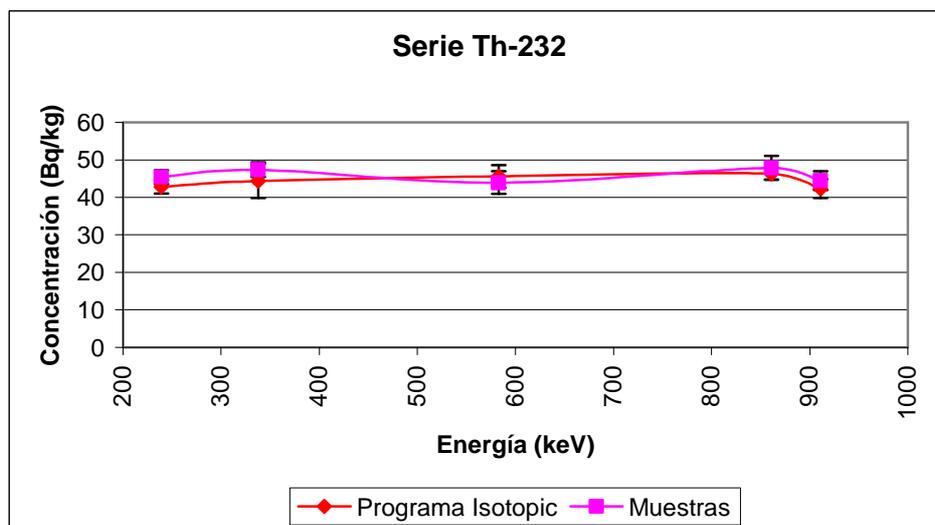


Figura 5.17: Concentración de radionúclidos en función de la energía para los radionúclidos de la serie del Th-232.

En las Figuras 5.16 y 5.17 pueden observarse los valores de concentración en función de la energía obtenidos: mediante el programa ISOTOPIC y mediante mediciones de laboratorio (método comparativo) para los radionúclidos pertenecientes a las series del U-238 (Ra – 226, Pb – 214 y Bi – 214) y el Th-232 (Ac-228, Pb – 212 y Tl – 208). De la figura 5.16 puede decirse que los radionúclidos pertenecientes a la serie del U – 238 se encuentran en equilibrio secular ya que dentro de la cadena de desintegración padres e hijas presentan el mismo valor de concentración, por otra parte, el valor de concentración para la serie en promedio: 1) utilizando el programa ISOTOPIC es $(38,48 \pm 2,83)$ Bq/kg y 2) mediante mediciones de laboratorio es de $(39,97 \pm 1,83)$ Bq/kg. Asimismo, de la figura 5.17 -serie del Th-232- puede decirse que los radionúclidos se encuentran en equilibrio secular. Las concentraciones determinadas por el programa ISOTOPIC y mediciones de laboratorio se encuentran alrededor de un valor promedio de $(45,81 \pm 2,50)$ Bq/kg.

Por último, la t – Student es una prueba mediante la cual se puede verificar si las diferencias entre los resultados obtenidos por distintos métodos se puede atribuir a errores aleatorios, véase [25]. Si el valor de P obtenido en la prueba es mayor de 0,05 entonces es mayor la posibilidad de que las diferencias en los datos se deban a errores aleatorios, en caso contrario



se constata la existencia de errores sistemáticos [33]. En la Tabla XI se muestra la prueba t – Student para datos apareados con un nivel de significación del 5%. Esta prueba se realizó con la finalidad de constatar que no existiesen diferencias significativas entre las concentraciones determinadas por el programa ISOTOPIC y las determinadas siguiendo tanto la metodología convencional (Beck y cols.), como por medición de muestras de suelo en laboratorio (método comparativo).

Tabla XI: Contraste de significación entre las concentraciones de radionúclidos obtenidas mediante el programa ISOTOPIC, mediante la metodología convencional (Beck y cols.) y mediante la medición de muestras de suelos en laboratorio.

	ISOTOPIC a Beck	ISOTOPIC a Muestras
Valor de P	0,30	0,34
Resultado	No hay diferencia significativa	No hay diferencia significativa

5.2 Estudio de anomalías de radiación mediante espectrometría gamma in situ sobre pozos petroleros del campo Amarilis, Edo. Monagas

5.2.1 Determinación de líneas energéticas para la cuantificación de las concentraciones:

Con respecto a la determinación de las líneas a usar en la cuantificación de radionúclidos de las series naturales por una parte se procedió a extraer de los espectros adquiridos en cada estación la información de los conteos netos de los picos de absorción total correspondientes a las energías de los radionúclidos de interés (durante el tiempo vivo de medición = 3600 s), para lo cual los espectros adquiridos en cada punto (estación) de la transecta fueron procesados inicialmente utilizando el programa MAESTRO-32. Los resultados se muestran en las Figuras 5.18 y 5.19.

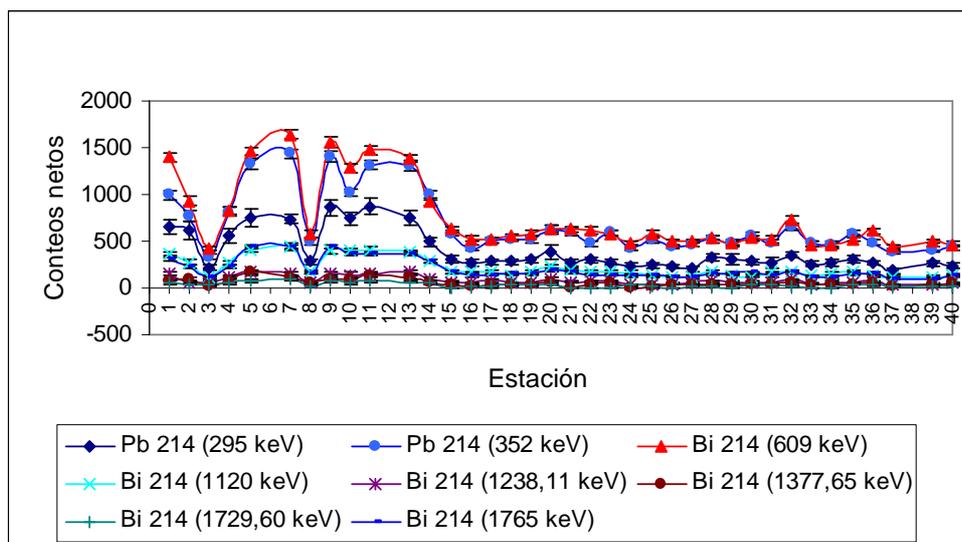


Figura 5.18: Conteo neto vs. Estación de medición para los radionúclidos de interés pertenecientes a la serie del U-238.

Así, de forma cualitativa, puede observarse en la Figura 5.18 para la serie del U-238, que las energías que mostraron la mayor cantidad de conteos netos fueron 352 keV (P. E.:35,8%) (correspondiente a la emisión gamma del radionúclido Pb-214) y 609 keV (P. E.:44,8%) (correspondiente a la emisión gamma del radionúclido Bi-214), seguido de las energías 295 (P.

E.:18,5,8%) , 1120 (P. E.:14,8%) y 1765 (P. E.:15,36%) keV y por último las energías 1729,60 (P. E.:2,88%) ; 1238,11 (P. E.:5,82%) y 1377,65 (P. E.:3,92%) keV (todas correspondientes al radionúclido Bi-214) mostraron lo conteos netos más bajos. Los resultados obtenidos fueron los esperados en función de las probabilidades de emisión para cada una de las energías estudiadas.

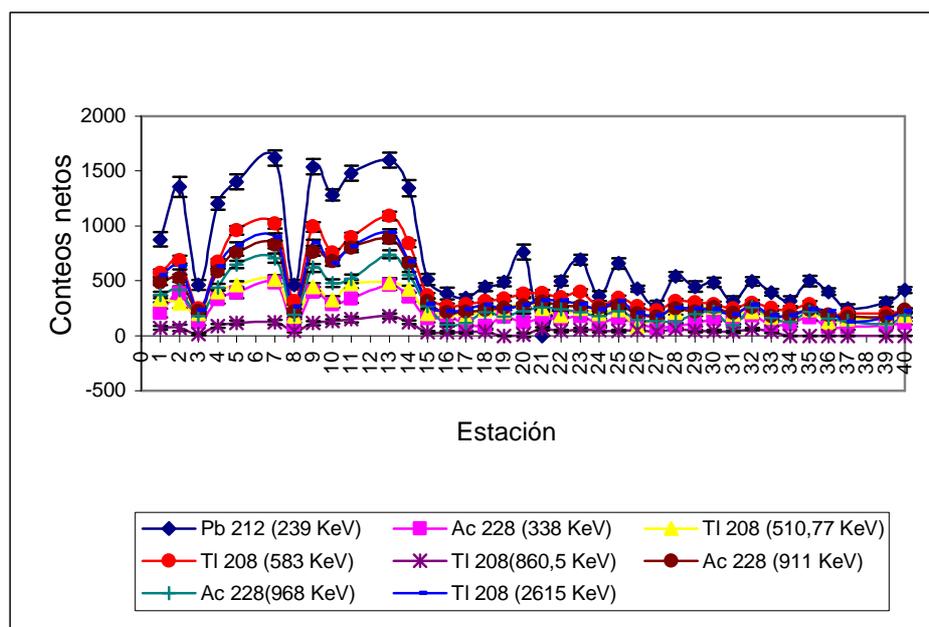


Figura 5.19: Conteo neto vs. Estación de medición para los radionúclidos de interés pertenecientes a la serie del Th-232.

En cuanto a los radionúclidos pertenecientes a la serie del Th-232 se observó (Figura 5.19) que las líneas energéticas con mayor cantidad de conteos netos fueron la de 239 (P. E.:43,3%) y 583 keV (P. E.:84,5%) correspondientes a los radionúclidos Pb – 212 y Tl – 208 respectivamente, para las líneas de 338 (P. E.:11,30%); 911(P. E.:26,6%); 968 (P. E.:16,20%) ; 2615 (P. E.:99,16%) y 510,77 (P. E.:22,60%) keV (correspondientes a los radionúclidos Ac - 228 y Tl-208) el conteo neto para cada estación mostró valores intermedios y finalmente la menor cantidad de conteos netos fue obtenida para la línea de 860,5 (P. E.:12,42%) keV del Tl-208. Nuevamente estos resultados son esperados en virtud de las probabilidades de emisión de cada una de las energías estudiadas, no obstante es importante destacar que aunque la energía de 239 keV presenta una alta probabilidad de emisión, la misma presenta problemas de interferencia con la energía de 241,98 keV (P. E.: 7,5%) del Pb-214.



Por otra parte, también se procedió a observar la variación diurna de los conteos netos y en general se observó una leve tendencia a disminuir las áreas netas de los picos a medida que avanzaba el día. Las pendientes de las tendencias son muy similares en todos los casos (Figura 5.20), lo que garantiza independencia de la energía de la radiación gamma con la posible influencia de la variación de parámetros meteorológicos y ambientales en la autoabsorción de la radiación en el medio entre los sitios de emisión y el detector (autoabsorción en el propio suelo y en el aire). Resultados análogos se obtuvieron para los radionúclidos gamma emisores de la serie del Th-232 (Figura 5.21).

En la Tabla XII se muestran los parámetros de las ecuaciones de regresión lineal, demostrándose que independientemente del tipo de radionúclido y energía, el rango de variación de las pendientes fue el mismo (entre -5.0 y -10.0 conteos/hora). En consecuencia, se puede concluir que dentro de los márgenes de los errores experimentales las variaciones en las variables ambientales y meteorológicas medidas afectan por igual las mediciones de los radionúclidos analizados.

Tabla XII: . Parámetros de regresión lineal del ajuste de los datos de áreas netas en los picos de absorción total versus hora de medición del espectro.

Serie del ^{238}U	
Bi-214(609 keV)	$y = -10.047x + 758.5$
Pb-214(352 keV)	$y = -7.7637x + 675.27$
Pb-214(295 keV))	$y = -5.0073x + 379.83$
Bi-214(1765 keV)	$y = -5.377x + 236.87$
Serie del ^{232}Th	
Pb212(239 keV)	$y = -9.8405x + 587.13$
Tl208(583 keV)	$y = -7.2611x + 418.76$
Tl208(2615 keV)	$y = -5.5532x + 332.03$

Ac228(911 keV)	$y = -6.6216x + 336.91$
Ac228(338 keV)	$y = -5.9263x + 220.52$

Aunque aparentemente en todos los casos se muestra una ligera tendencia a disminuir el número neto de conteos en los picos de absorción total con la hora de medición, debido a las grandes fluctuaciones obtenidas no se puede concluir de manera categórica que exista alguna regularidad o dependencia entre ambas variables, como se ilustra en las Figuras 5.22 y 5.23. En esas dependencias cada área neta se normalizó al mayor valor obtenido durante las mediciones a diferentes horas. En consecuencia, no fue necesario realizar correcciones por la hora del día en las mediciones de espectrometría gamma in situ, dada la poca influencia en los cambios de las variables ambientales analizadas

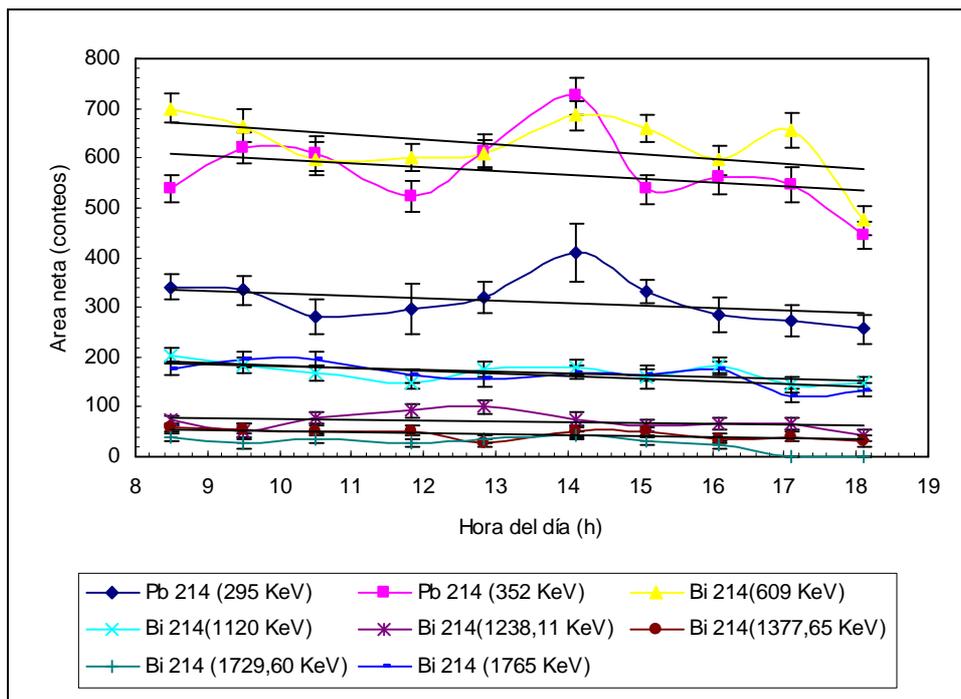


Figura 5.20: Dependencia de las áreas netas en los picos de absorción total con la hora de medición de los espectros para diferentes energías gamma de radionúclidos de la serie del U-238.

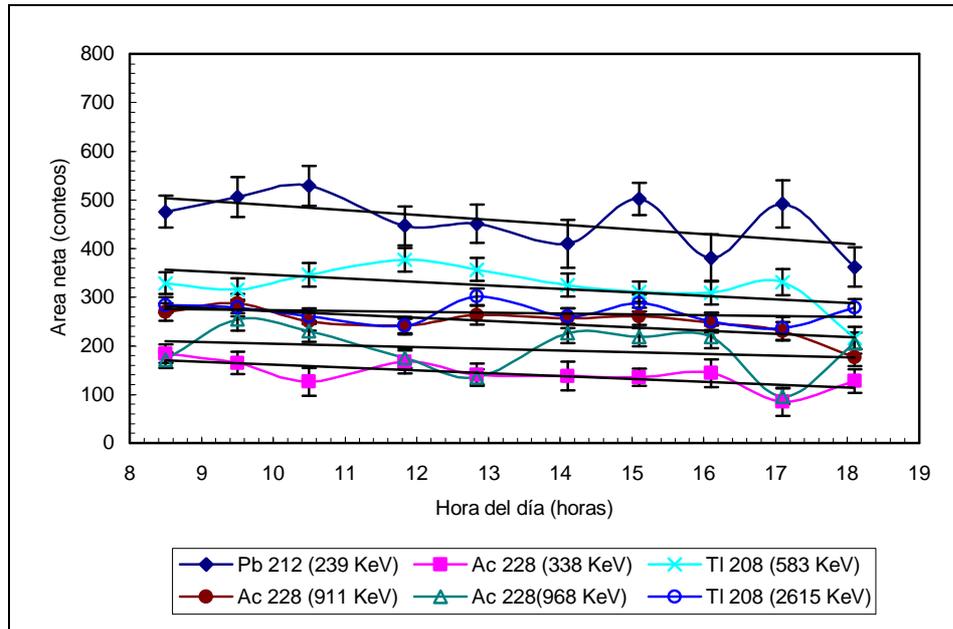


Figura 5.21: Dependencia de las áreas netas en los picos de absorción total con la hora de medición de los espectros para diferentes energías gamma de radionúclidos de la serie del Th-232.

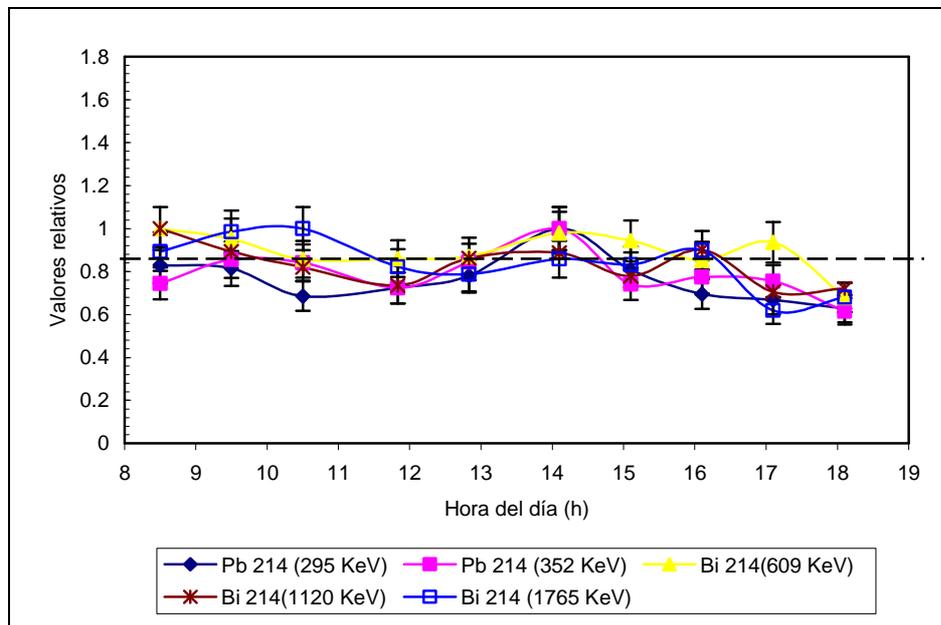


Figura 5.22: Dependencia de las áreas netas relativas con la hora de medición de los espectros para diferentes energías gamma de radionúclidos de la serie del ^{238}U .

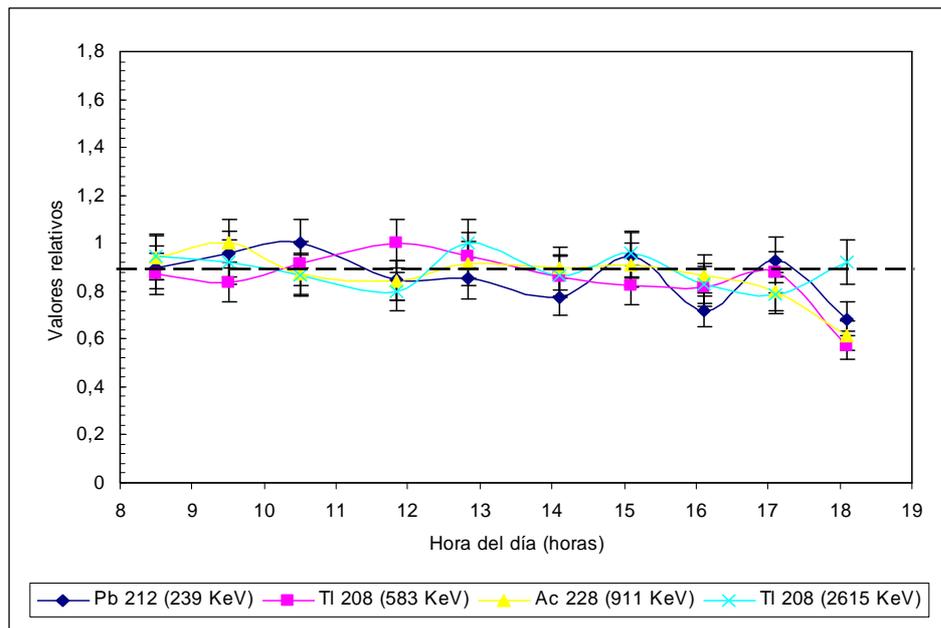


Figura 5.23: Dependencia de las áreas netas relativas con la hora de medición de los espectros para diferentes energías gamma de radionúclidos de la serie del ^{232}Th .

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos tanto para los conteos netos bajo los picos de absorción total en los espectros de cada estación de la transecta, como la variación diurna de los mismos (además de la probabilidad de emisión, Tabla II) se determinó que las líneas energéticas a utilizar para cuantificar la concentración de los radionúclidos pertenecientes a las series naturales serían:

Para la serie del U-238:

352 keV (Pb-214)

609 keV (Bi-214)

1765 keV (Bi-214)

Para la serie del Th-232:

239 keV (Pb-212)

338 keV (Ac-228)

911 keV (Ac-228)

2615 keV (Tl-208)

Potasio:

1461 keV (K-40)

5.2.2 Determinación de la concentración de radionúclidos en la transecta:

A fin de determinar la concentración de los radionúclidos se utilizó el programa ISOTOPIC, los resultados del análisis de los espectros se muestran en las Figuras 5.24, 5.25 y 5.26.

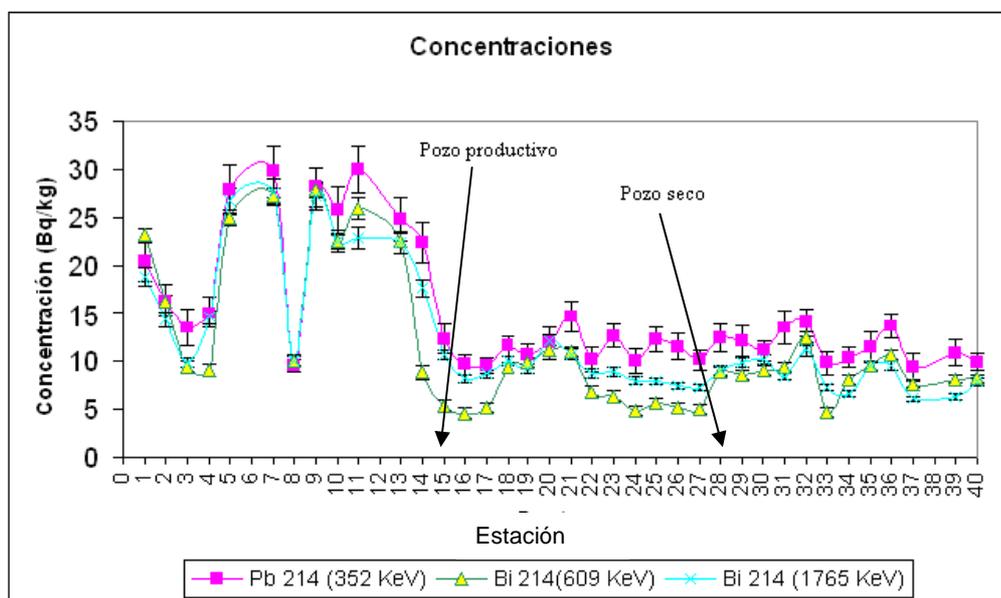


Figura 5.24 Concentración vs. Estación de medición para radionúclidos de la serie del U-238

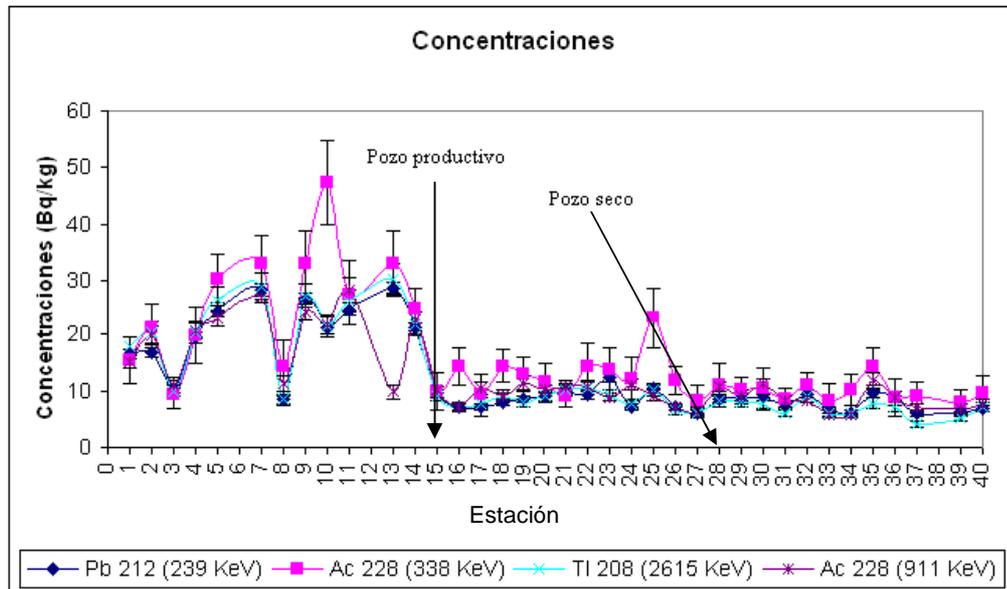


Figura 5.25 Concentración vs. Estación de medición para radionúclidos de la serie del Th-232

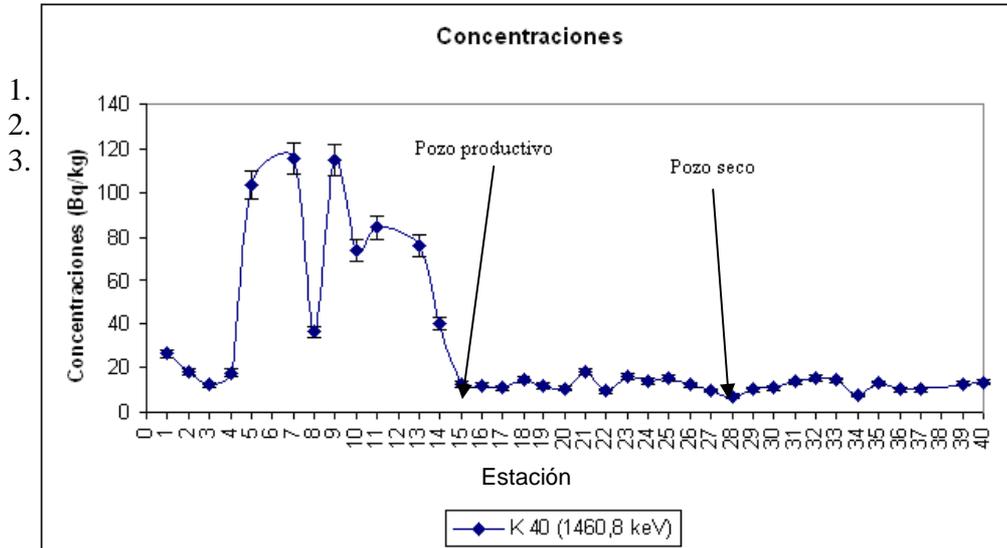


Figura 5.26 Concentración vs. Estación de medición para K-40

Como puede apreciarse en las Figuras 5.24, 5.25 y 5.26 entre las estaciones 5 y 14 se encontraron los mayores valores de concentraciones para los radionúclidos de las series naturales,



así, para la serie del U-238 dichos valores se encontraron aproximadamente entre un mínimo de 20 Bq/kg y un máximo de 32 Bq/kg (Figura 5.24), para la serie del Th-232 los valores de concentración hallados se encontraron aproximadamente entre un mínimo de 15 Bq/kg y un máximo de 54 Bq/kg (Figura 5.25) y por último las concentraciones de K-40 para el rango de estaciones ya mencionados se encontraron entre 30 Bq/kg como valor mínimo y 120 Bq/kg como valor máximo (Figura 5.26).

Es importante destacar que se observaron valores mínimos de concentración (los cuales no se tomaron en cuenta en la descripción del párrafo anterior) en las estaciones 3 y 8 para todas las energías de los radionúclidos estudiados lo cual implica que muy probablemente estos valores tienen su origen en factores diferentes de la presencia de hidrocarburos en el subsuelo, como lo son el tipo de suelo, y la vegetación circundante.

En lo referente a las concentraciones de los radionúclidos de la serie del U-238 en la estación 15 (cerca al pozo productivo), se encontró que para la energía de 609 keV (la cual posee una P.E. mayor) correspondiente a la emisión gamma del Bi-214 la concentración fue baja ($5,37 \pm 0,58$) Bq/kg, destacando también el hecho de que en las estaciones cercanas (14, 16 y 17) también se observaron valores mínimos de concentración (de hecho, en la estación 14 se obtuvo el menor valor de concentración de toda la transecta), no obstante también se observaron valores de concentración bajos desde la estación 21 hasta la estación 27. En el punto 28 (pozo seco) no se observó el fenómeno de disminución de la concentración. Para las dos energías restantes 352 keV y 1765 keV (Pb-214 y Bi-214 respectivamente) no se observó lo descrito anteriormente para la energía de 609 keV, más bien las concentraciones desde la estación 14 hasta la estación 40 fluctuaron alrededor de un valor promedio de ($13,37 \pm 1,44$) Bq/kg para la energía de 352 keV y ($10,48 \pm 0,52$) Bq/kg para la energía de 1765 keV.

Por otra parte en lo concerniente a las concentraciones de los radionúclidos de la serie del Th-232, a partir de la estación 15 (cerca al pozo productivo) hasta la estación 40 no se observaron mayores variaciones alrededor de un valor promedio de ($9,07 \pm 1,36$) Bq/kg.

Por último, para el radionúclido natural K-40 a partir de la estación 15 hasta la estación 40 los valores de concentraciones se encontraron alrededor de un valor promedio de $(12,35 \pm 1,12)$ Bq/kg.

5.2.3 Normalización al Torio:

A fin de llevar a cabo el método de normalización al torio se utilizaron los datos de concentración de los radionúclidos pertenecientes tanto a las serie del U-238 como del Th-232, así como el radionúclido K-40. Por lo tanto, para estimar la concentración equivalente de U-238 se utilizó la concentración obtenida en campo para los radionúclidos Pb-214(352 keV) y Bi-214(609 keV), de modo similar para estimar la concentración equivalente de Th-232 se utilizó la concentración de los radionúclidos Pb-212 (239 keV) y Ac-238 (911 keV). Con los datos de concentración de los radionúclidos antes mencionados y las ecuaciones 3-29(a) y (b) se obtuvieron los resultados que se muestran en las Figuras 5.27 5.28y 5.29 Como puede observarse estos resultados muestran un alto grado de similitud entre sí.

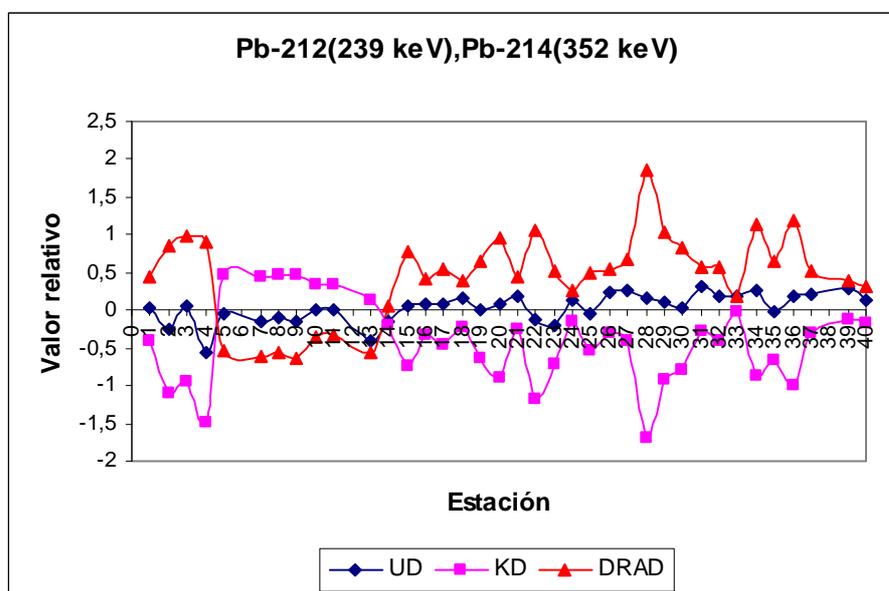


Figura 5.27 Normalización al Torio empleando los radionúclidos Pb-212 (239 keV) y Pb-214(352 keV)

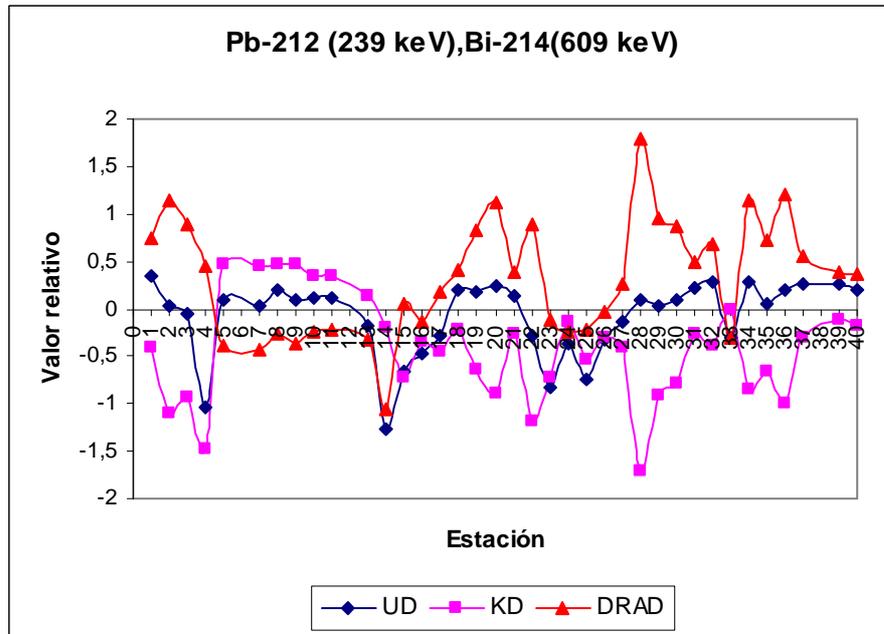


Figura 5.28 Normalización al Torio empleando los radionúclidos Pb-212 (239 keV) y Bi-214(609 keV)

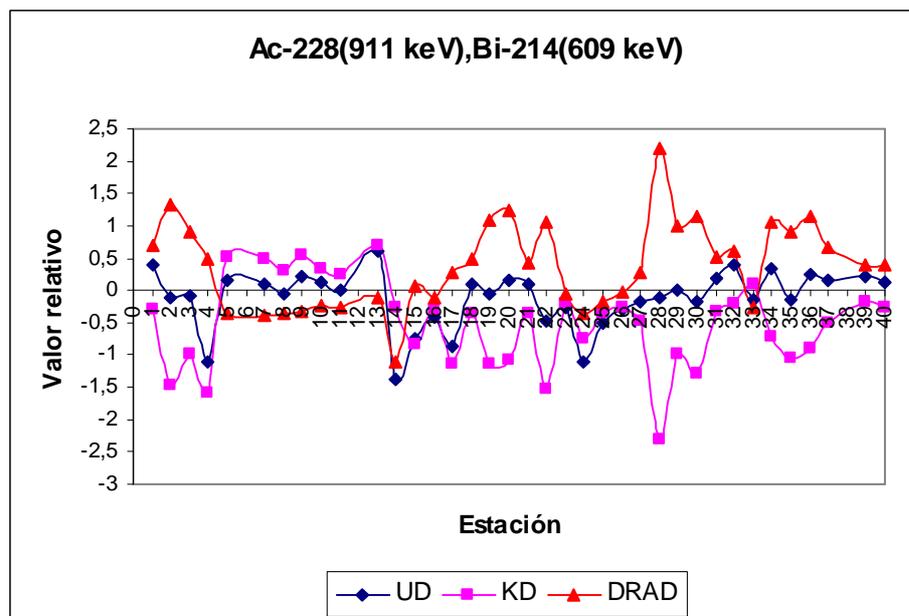


Figura 5.29 Normalización al Torio empleando los radionúclidos Ac-228 (911 keV) y Bi-214(609 keV)



Respecto a los valores relativos obtenidos para el UD% en las Figuras 5.27y 5.28 puede observarse que la estación cercana al pozo productivo (estación 15) no obstante de presentar un valor negativo (para ambas figuras), el mismo parece distar de ser considerado como una fuerte anomalía respecto a los valores de las otras estaciones como cabría de esperarse de acuerdo a la teoría (Sección 3.5). Por otra parte en las Figuras 5.27 5.28y 5.29 se aprecia que para la estación 15 los valores de KD% fueron negativos, sin embargo el menor valor se presentó en la estación 28, la cual es la más cercana al pozo seco.

Por último, los valores de DRAD obtenidos a lo largo de la transecta parecen sugerir (de acuerdo a la teoría) la presencia de hidrocarburos en ciertos intervalos, por ejemplo entre las estaciones 1 y 4, 15 y 23, 26 y 33, 33 y 40. No obstante, no hay antecedente que indique que las zonas adyacentes a las estaciones antes mencionadas sean zonas prospectivas, por lo cual dichas regiones pueden considerarse como “falsos positivos” (ver [28]). La estación con mayor valor de DRAD resulta ser precisamente la estación 28 (cercana al pozo seco) y dado que dicha zona ha sido extensamente estudiada cabe la posibilidad de que exista acumulación de hidrocarburos.



CAPÍTULO VI

Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

En primer lugar se comprobó que es posible llevar a cabo la calibración en eficiencia para espectrometría gamma *in situ* mediante la utilización de fuentes con forma de disco (a distancias menores de 1 m) y escasa tasa de emisión siguiendo la metodología convencional (desarrollada por Beck y cols., véase [18]).

Por otra parte las concentraciones de radionúclidos pertenecientes a las series naturales del U-238, Th-232 y K-40 obtenidas en el campo de prueba no variaron apreciablemente durante el lapso de tiempo empleado en la medición.

Al comparar los resultados de la determinación de concentración de actividad para los radionúclidos de interés mediante el programa ISOTOPIC y los obtenidos al utilizar, tanto las constantes de calibración obtenidas por el método convencional, como la medición de muestras de suelo en laboratorio se encontró que no existen diferencias significativas, es decir, los resultados obtenidos pueden considerarse iguales ya que las diferencias existentes no son producto de errores sistemáticos, sino aleatorios. De igual manera, a pesar de que se comprobó mediante la medición de muestras en laboratorio que la distribución vertical de radionúclidos en el suelo del campo de prueba no era estrictamente uniforme las concentraciones determinadas mediante el método comparativo en laboratorio y las obtenidas mediante el programa ISOTOPIC asumiendo una distribución uniforme de radionúclidos no presentaron diferencias significativas. De todo lo antes comentado se verifica la confiabilidad (en cuanto a precisión y exactitud) de los resultados obtenidos mediante el programa ISOTOPIC en la determinación de concentraciones en mediciones gamma espectrométricas *in situ*.

Para las mediciones realizadas en la transecta ubicada en el campo Amarilis, si bien los resultados de conteos netos para las energías de los radionúclidos estudiados mostraron la



tendencia a disminuir con la hora del día (variación diurna en la tasa de conteo), se encontró que dicha disminución es independiente de la energía del radionúclido. También, se encontró, que de los radionúclidos estudiados para la serie del U-238, sólo la energía de 609 keV del Bi-214 presentó los menores valores de concentración en las estaciones cercanas al pozo productivo, no obstante este resultado no necesariamente ha de ser atribuible a la presencia de hidrocarburos en el subsuelo.

Los resultados obtenidos mediante la técnica de normalización al torio no mostraron el comportamiento esperado de acuerdo a la teoría sobre la zona del pozo productivo (estación 15), este resultado puede ser debido a las bajas concentraciones del radionúclido K-40 observadas a lo largo de la transecta.

6.2 Recomendaciones:

Se sugiere llevar a cabo un estudio detallado de la forma en la cual los hidrocarburos migran a través del perfil del suelo, teniendo en cuenta aquellos factores que faciliten o dificulten el ascenso de los mismos, tales como: la presencia de estructuras como fallas o pliegues, la litología a lo largo del perfil, las propiedades petrofísicas de las rocas (porosidad y permeabilidad en particular), a fin de constatar el modelo de microfiltraciones que predice la presencia de anomalías de concentración de actividades de los radionúclidos U-238 y K-40 en superficie. Esto ayudaría a determinar las limitaciones de dicho modelo, y podría ayudar en la interpretación de los resultados espectrométricos sobre otras zonas petroleras con características litológicas, estructurales y petrofísicas similares.

Dado que la radiación que llega al detector proviene de un espesor de suelo de aproximadamente 20 cm, se recomienda tener en cuenta al realizar el diseño de adquisición entre otros factores (terreno libre de estructuras que bloqueen el paso de la radiación, plano) el uso de los suelos (por ejemplo actividad agrícola), ya que de acuerdo al tipo de uso podrían producirse alteraciones en la concentración de los radionúclidos (lixiviación por ejemplo) que luego conducirían a una interpretación errónea de los resultados.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1]Helfer I., Miller K. 1988 Calibration factors for Ge detectors used for field spectrometry. Health physics 55 p.p 15-29.
- [2]Matolín M., Stranik Z. 2006 Radioactivity of sedimentary rocks over the Zdanice hydrocarbon field. Geophysics Journal Int. p.p 1491- 1500.
- [3]Saunders D., Burson K., Branco J., Thomson K. 1993 Relation of thorium- normalized surface and aerial radiometric data of subsurface petroleum accumulations. Geophysics, Vol 58.Nº 10. p.p 1417 – 1427.
- [4]Saunders D., Burson K., Branco J., Thomson K. 1994 Test of Australian aerial radiometric data of use in petroleum reconnaissance. Geophysics. Vol. 59. Nº 3 p.p 411 – 419.
- [5]Yanaki H., Ashery D. 2000. Careful analysis reveals root cause of gamma-ray anomalies. World Oil. October, p.p 81-83.
- [6]Beck H., DeCampo J., Gogolak C. 1972. In situ Ge(Li) and NaI(Tl) gamma ray spectrometry. U.S. Department of Energy report HASL – 258. 75 p.
- [7]WEC, VENEZUELA 1997. *Evaluación de Pozos*. Caracas, Venezuela.
- [8]PDVSA. 2008 Antecedentes del proyecto Boquerón- Huso – Amarilis. Informe Técnico.20 p.
- [9]CIEN 1998. Comité Interfiliar de Estratigrafía y Nomenclatura. Léxico Estratigráfico Electrónico de Venezuela. Pdvsa – Intevep. <http://www.pdv.com/lexico/>
- [10]International Atomic Energy Agency, IAEA 1973 Radiation protection procedures safety series No 38. Vienna, Austria. 199 p.
- [11]Friedlander G., Kennedy J., Miller J., 1955 *Nuclear and Radiochemistry*. John Wiley and Sons Inc. New York E.E.U.U.Segunda Edición 585 p.
- [12]Maphoto K. 2004 Determination of natural radioactivity concentration in soil: a comparative study of windows and full spectrum analysis. University of Western Cape. Trabajo de grado de maestría.
- [13]Krane K. 1988 *Introductory Nuclear Physics* John Wiley and Sons Inc. New York E.E.U.U.Segunda Edición 854 p.
- [14]International Atomic Energy Agency, IAEA 2003 Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. IAEA- TECDOC- 1363. Vienna. Austria. 158 p.



- [15]Perez K. 2008. Estudio de la distribución de radionúclidos emisores gamma en sedimentos marinos en Venezuela. Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. Trabajo de grado de maestría.
- [16]Knoll G. 2000 *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley and Sons Inc. New York E.E.U.U.Tercera Edición. 802 p.
- [17]Miller K., Shebell P. 1993 In situ gamma ray spectrometry – A tutorial for environmental radiation scientist. Environmental Measurements Laboratory, U.S. Department of Energy, N.Y. 45 p.
- [18]Chieco N. Bogen D., Knutson E. 1992 *E.M.L. Procedures Manual*. U.S. Department of Energy report HASL – 300. Vol 1. Sección 3
- [19] Alekseev, F.A., Grumbkov, A.P. & Gottih, R.P., 1960. Radiometry and radiochemistry in direct oil and gas prospecting (in Russian), *Yadernaya geofizika pri poiskah poleznyh iskopaemyh*, Gostoptechizdat, Moscow.
- [20] Kogan, P.M., Nazarov, I.M. & Fridman S.D., 1969. *Fundamentals of gamma-ray spectrometry of natural environment*, (in Russian), Atomizdat, Moscow.
- [21] El Shazly, E.M., Meshref, W.M., Fouad, K.M., Ammar, A.A. & Meleik, M.L., 1969. Aerial radiometry El Alamein oil field, Egypt, *Geophys. Prospect.*, XVII, 3.
- [22] Nunn, J.A. & Meulbrock, P., 2002. Kilometer-Scale Upward Migration of Hydrocarbons in Geopressured sediments by Buoyancy-Driven Propagation of Methane-Filled fractures, *AAPG Bull.*, 86, 5, 907–918.
- [23] Sikka, D.B. & Shives, R.B.K., 2002. Radiometric Surveys of the Redwater Oil Field, Alberta: Early Surface Exploration Case Histories Suggest Mechanisms for the Development of Hydrocarbon-related Geochemical Anomalies, Surface Exploration Case Histories, *AAPG Studies in Geology* No. 48, SEG Geophysical References Series No. 11, 243–297.
- [24] MacElvain, R., 1969, Mechanics of gaseous ascension through a sedimentary column, in Heroy, W. B., Ed., *Unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas*: Southern Methodist Univ. Press, 15-28.
- [25] Krauskopf, K. B., 1967, *Introduction to geochemistry*: McGraw-Hill Book Co
- [26] Sassen, R., 1980, Biodegradation of crude oil in a shallow Gulf Coast salt dome: *Organic Geochem.*, 2, 153-166.
- [27]Schumacher D. Hydrocarbon – Induced Alteration of soils and sediments hydrocarbon migration and its near surface expresión. *AAPG Memoir* 66, p.p. 71-89.



-
- [28]Debertin, K., Schoetzig, U., 1979. Coincidence summing corrections in Ge(Li) spectrometry at low source-detector distances. Nucl. Instrum. Methods 158, 471.
- [29]Russ, W.R., Venkataraman, R., Bronson, F., 2004. Validation testing of the GENIE 2000 cascade summing correction. 6th International Conference on Methods and Applications of Radioanalytical Chemistry—MARCVI, held on April 7-11, 2003 in Kailua-Kona, Hawaii. Proceedings to be published in the Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry.
- [30]Schima, F.J., Hoppes, D.D., 1983. Tables for cascade summing corrections in gamma-ray spectrometry. Appl. Rad. Isotop. 34, 1039.
- [31] R.J. Gehrke, J.R. Davidson 2005. Acquisition of quality γ -ray spectra with HPGe spectrometers. Applied Radiation and Isotopes 62 479–499.
- [32] Berger M., Hubell J., Seltzer J. Chang J. Cousey J., Sukumar R., and Zucker D. 2005 XCOM: Photon Cross Section Database (version 1.3). <http://physics.nist.gov/xcom>. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- [33]Miller J. 2002 *Estadística y quimiometría para química analítica*. Prentice Hall. Madrid, España. Cuarta Edición. 292 p.

**APÉNDICES****Apéndice A**

Consideraciones que justifican el uso de fuentes con forma de disco en lugar de fuentes puntuales para el estudio de la dependencia angular en la respuesta de detectores de Ge.

La eficiencia geométrica, ε_{geom} es la fracción de fotones que llegan al detector. Este factor es esencialmente independiente de la energía de los fotones. Así la eficiencia geométrica para una fuente localizada a una distancia d sobre el eje del detector será:

$$\varepsilon_{gps} = \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r_d}{d}\right)^2}} \right]$$

A-1

donde r_d es el radio del detector.

La eficiencia geométrica para una fuente extendida puede ser determinada fácilmente por la técnica Monte – Carlo. Para ello, a fin de simular una fuente de radiación gamma isotrópica los ángulos cenital (θ) y azimutal (ϕ) empleados fueron:

$$0 \leq \theta \leq \pi \text{ y } 0 \leq \phi \leq 2\pi$$

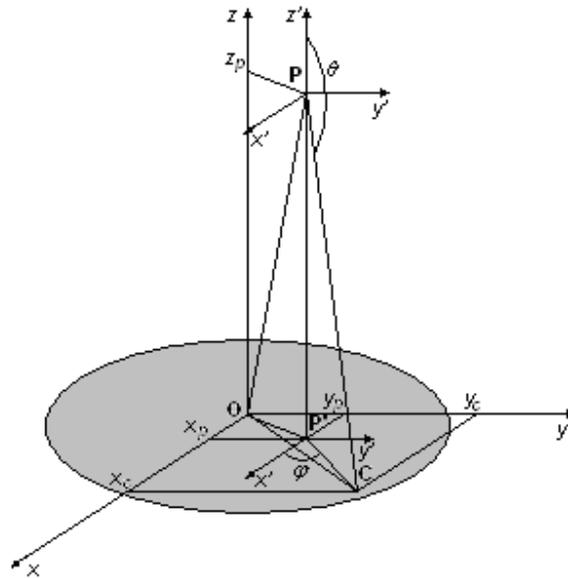


Figura A-1: Ilustración de la emisión isotrópica de rayos gamma provenientes de una fuente radiactiva ubicada en P

Escogiendo dos valores independientes, ξ_1 y ξ_2 con probabilidad uniforme entre 0 y 1 la dirección inicial de la emisión de los rayos gamma provenientes de una fuente puntual puede ser generada imponiendo las condiciones $\theta = \arccos(1 - 2\xi_1)$ y $\varphi = 2\pi\xi_2$

Después de generar la dirección inicial de la emisión de rayos gamma, las coordenadas del punto de intersección con el plano del detector es calculada mediante:

$$x_p = z \tan(\pi - \theta) \cos \varphi \tag{A-2}$$

$$y_p = z \tan(\pi - \theta) \operatorname{sen} \varphi \tag{A-3}$$

Entonces la distancia (OC) al eje del detector es:

$$OC = \sqrt{(x + x_p)^2 + (y + y_p)^2} \tag{A-4}$$

Si $OC \leq r_d$ (radio del detector) y $\theta > \pi/2$ se considera que el fotón colisionó con la superficie del detector y el evento es contado. La eficiencia geométrica es calculada como el número de fotones incidentes sobre el detector dividido entre el número de fotones producidos por la fuente de radiación. La secuencia antes descrita es repetida para un número predefinido de

historias. Las eficiencias geométricas para fuentes puntuales calculadas mediante la expresión analítica y por la técnica Monte Carlo se muestran en la Figura A-2. Como puede verse, ambos resultados se solapan, indicando que el algoritmo desarrollado para la simulación de Monte Carlo es adecuado.

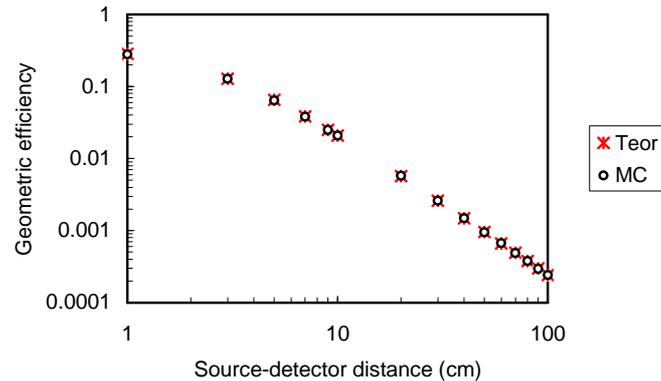


Figura A-2: Comparación entre los valores de eficiencias geométricas obtenidas mediante simulación Monte Carlo y la ecuación A-1 para una fuente puntual colocada a diferentes distancias fuente detector

Para los cálculos, fueron tomados en cuenta los siguientes parámetros del detector de Ge:
Diámetro del detector: 6,25 cm
Longitud del detector: 8,3 cm

Para calcular la eficiencia geométrica de una fuente extendida (cilíndrica), además de la dirección de viaje, una subrutina especial del programa fue asignada a la selección aleatoria del punto emisor de rayos gamma en la muestra.

Como puede verse en la Fig. A-3, con un error menor de 5% fuentes con forma de disco con radio entre 0,5 y 2,5 cm pueden ser consideradas como fuentes puntuales si son ubicadas a lo largo del eje detector a distancias tan grandes como 9 cm.

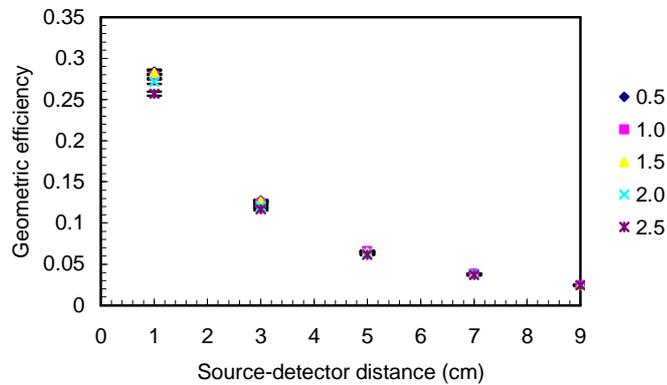


Figura A-3: Eficiencias geométricas para fuentes con forma de disco con radio entre 0.5 y 2.5, a diferentes distancias fuente- detector

Apéndice B

1. *Estimación de la tasa de conteo para diferentes energías y ángulos, para una distancia fija de 1 m a partir del uso de fuentes de laboratorio en forma de disco a distancias mas cortas del centro del detector.*

La actividad de un radionúclido puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$A_i = \frac{(n_i - n_b)}{\varepsilon(E_i)Y_i t} = \frac{N_i}{\varepsilon(E_i)Y_i}$$

A-5

Donde n_i , son las cuentas obtenidas en un determinado pico de energía E_i , durante un tiempo efectivo de medición t , n_b son las cuentas de fondo bajo el pico, Y_i es la probabilidad de emisión, y $\varepsilon(E_i)$ es la eficiencia del pico de absorción total a una energía E_i , la cual puede ser expresada como el producto de 5 factores.

$$\varepsilon(E_i) = f(E_i)\varepsilon_{geom}\varepsilon_{absp}(E_i)\varepsilon_s(E_i)\varepsilon_{int}(E_i)$$

A-6



Donde $f(E_i)$ es el factor de corrección por suma de coincidencias. El uso de radionúclidos emisores de varios rayos gamma como ^{60}Co [28], [29], [30] que abarcan el rango de energías de interés crea un problema ya que generalmente estos rayos gamma se emiten en cascada.

Esto introduce un efecto de suma de coincidencias en las mediciones haciendo necesario corregir las eficiencias experimentales obtenidas, en particular cuando las distancias fuente-detector son muy cortas. A fin de reducir la suma en cascada a una cantidad despreciable y particularmente con rayos x y rayos γ de baja energía, Gehrke y Davidson [31] recomiendan una distancia fuente detector entre 10 y 20 cm para detectores medianos (es decir $\epsilon_r \leq 40\%$) tipo p. El detector utilizado en este trabajo es tipo p y posee una eficiencia relativa de 40 %, así que una distancia de 25 cm fue escogida a fin de simular la tasa de conteo a una distancia fuente – detector de 1 m. Al mismo tiempo a esta distancia la fuente también se puede considerar como puntual.

La eficiencia de absorción $\epsilon_{absp}(E_i)$, toma en cuenta el efecto de los materiales que intervienen absorbiendo parte de la radiación antes de que interactúe con el detector. Su forma matemática es la siguiente:

$$\epsilon_{absp}(E_i) = e^{-[\mu(E_i)\rho x]_{sh}} e^{-[\mu(E_i)\rho x]_{air}} e^{-[\mu(E_i)\rho x]_{dh}} e^{-[\mu(E_i)\rho x]_{dl}}$$

A-7

Donde $\mu(E_i)$, ρ , y x son: el coeficiente de atenuación másico, densidad y espesor para el encapsulado de la fuente (sh), encapsulado del detector (dh) y capa muerta del detector (dl). Debe decirse que la ecuación (9) es una aproximación. Sólo es exacta en el caso en que los fotones viajan perpendicularmente a la superficie del detector.

La eficiencia de la muestra $\epsilon_s(E_i)$, es el recíproco de la corrección por auto-absorción de la muestra. La eficiencia intrínseca $\epsilon_{int}(E_i)$ es la probabilidad de que un rayo γ que llega al detector interactúe y de un pulso en el pico de absorción total.



Cuando la radiactividad de una fuente puntual es medida a dos distancias distintas, para la tasa de conteo en el pico de absorción total a 1 m (N_{1m}) y a una distancia más cercana, r , (N_{rm}) la siguiente ecuación aplica:

$$\frac{N_{1m} \varepsilon_{rm}(E_i)}{N_{rm} \varepsilon_{1m}(E_i)} = 1$$

A-8

Donde ε_{rm} y ε_{1m} son las eficiencias del pico de absorción total a las distancias r y 1m respectivamente. Tomando en cuenta las ecuaciones (A-6) y (A-7), la tasa de conteo del pico de absorción total cuando la fuente esta localizada a 1 m de distancia del detector puede ser estimada como:

$$N_{1m} = \frac{\varepsilon_{geom}^{1m}}{\varepsilon_{geom}^{rm}} e^{-\mu_{air}(E_i)\rho_{air}(100-r)} N_{rm}$$

A-9

Donde ε_{geom}^{1m} y ε_{geom}^{rm} son las eficiencias geométricas a 1 m y a una distancia menor r respectivamente. La distancia fuente – detector esta dada en cm.

Las eficiencias geométricas para fuentes puntuales, localizadas en un plano que intercepta perpendicularmente al detector por el centro de su cara a una distancia r del centro del mismo y ángulos (α) varia desde 0 a 90° (Figura A-6). Las coordenadas del punto P fueron calculadas como:

$$x = r \cos \alpha \text{ y } y = r \sin \alpha$$

A medida que el ángulo α aumenta desde 0 hasta 90°, diferentes porciones del detector son vistas por la fuente (Figura A-4, A-5 y A-6), por lo tanto la probabilidad de que un rayo gamma emitido por la fuente impacte la parte lateral y/o la parte frontal es tenida en cuenta. Subrutinas fueron incluidas en el programa para ello. En los casos en donde $x > r_d$ si los ángulos cenital y azimutal generados caen entre θ_{min} y θ_{max} y entre φ_{min} y φ_{max} , respectivamente, entonces los rayos gamma inciden sobre el detector y el evento es contado. El generador de

historias se detiene cuando el número de eventos exitosos se encuentra sobre 10^5 . El cálculo de los ángulos críticos θ_{min} , θ_{max} , φ_{min} and φ_{max} fue llevado a cabo utilizando las siguientes expresiones:

Caso 1 (Fig. 4), donde $x > r_d$ and $y \leq l_d/2$:

$$\theta_{min} = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{l_d/2 - y}{x - r_d} \right) \quad \text{A-10}$$

Caso 2 (Fig. 5), donde $x > r_d$ y $y > l_d/2$:

$$\theta_{min} = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left(\frac{y - l_d/2}{x + r_d} \right) \quad \text{A-11}$$

Para los casos previos las siguientes expresiones aplican:

$$\theta_{max} = \pi - \tan^{-1} \left(\frac{x - r_d}{y + l_d/2} \right), \quad \varphi_{min} = \pi - \tan^{-1} \left(\frac{r_d}{\sqrt{x^2 - r_d^2}} \right), \quad \varphi_{max} = \pi + \tan^{-1} \left(\frac{r_d}{\sqrt{x^2 - r_d^2}} \right) \quad \text{A-12}$$

Caso 3 (Fig. 6), donde $x \leq r_d$ and $y > l_d/2$:

$$z_p = (y - l_d/2) \tan(\pi - \theta) \cos \varphi \quad \text{A-13}$$

$$x_p = (y - l_d/2) \tan(\pi - \theta) \operatorname{sen} \varphi \quad \text{A-14}$$

La distancia OC al eje del detector es:

$$OC = \sqrt{(x + x_p)^2 + z_p^2} \quad \text{A-15}$$

Si $OC \leq r_d$ se considera que el fotón impactó en la superficie del detector y el evento es contado.

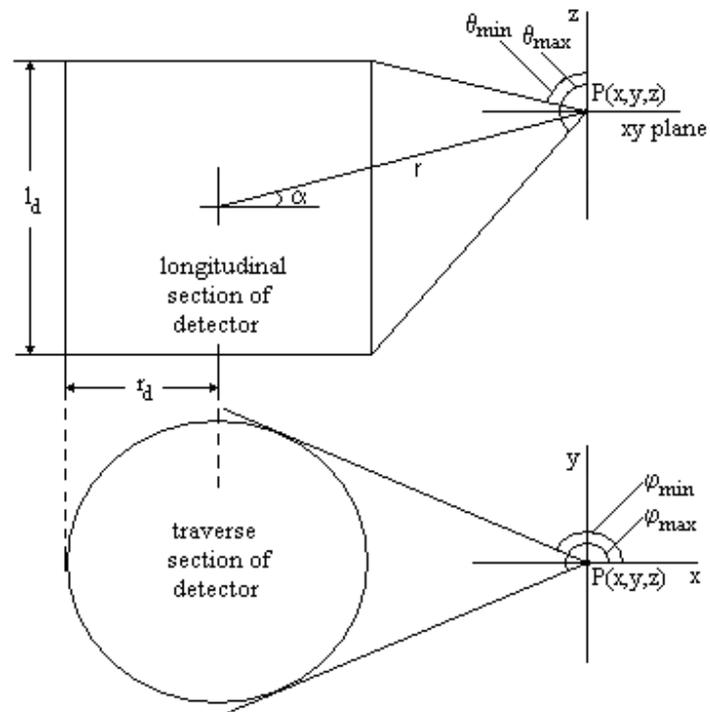


Figura A-4: Ilustración de los parámetros involucrados en el cálculo de las eficiencias geométricas.
Caso donde las coordenadas de P satisfacen la condición $x > r_d$ y $y \leq l_d/2$

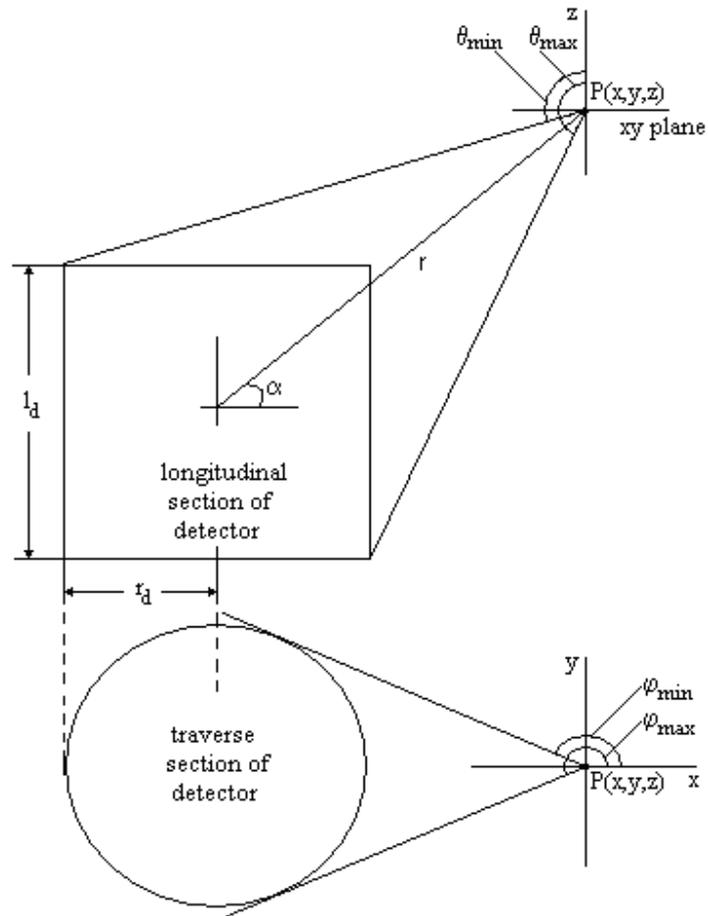


Figura A-5: Ilustración de los parámetros involucrados en el cálculo de las eficiencias geométricas.
Caso donde las coordenadas de P satisfacen la condición $x > r_d$ $y > l_d/2$

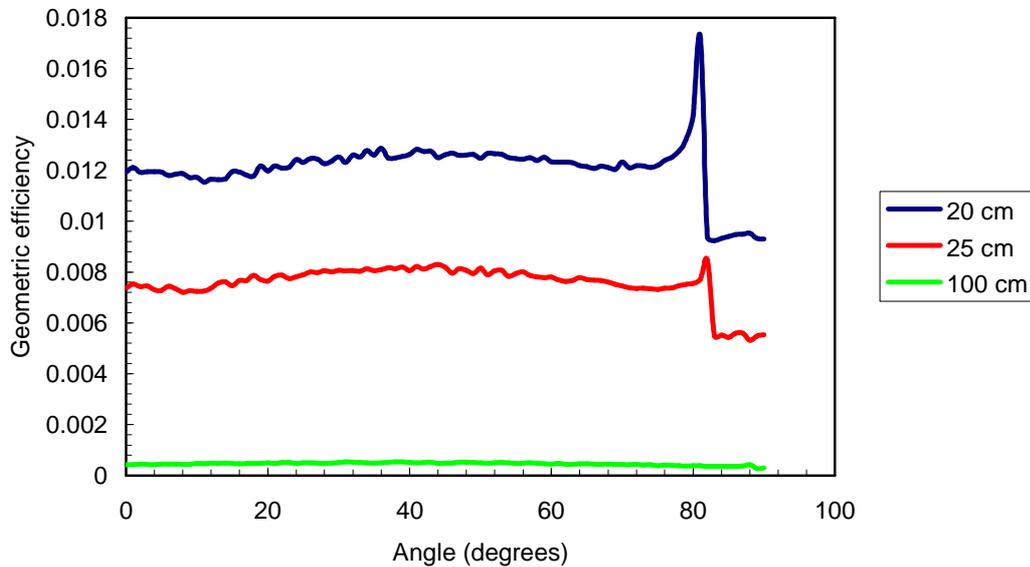


Figura A-7: Dependencia angular de la eficiencia geométrica para diferentes distancias fuente detector

La dependencia de los coeficientes de atenuación con la energía de la radiación gamma para el aire como medio fue determinada de Berger y cols. [32]. La composición química del aire fue estimada como carbono: 0,0124 %, oxígeno: 23,781 %, Nitrógeno: 75,5267 % y argón: 1,2827 %. Valores tomados de la base de datos de XCOM fueron ajustados por diferentes funciones.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Fig A-8 el coeficiente de atenuación másico en el aire puede ser calculado mediante la siguiente función empírica, obtenida mediante un proceso iterativo de una regresión no lineal.

$$\mu_{air}(E_i) = \frac{e^{a+bE_i}}{(E_i+1)^c} + \frac{e^{d+eE_i}}{(E_i+1)^f}$$

A-16

Los parámetros del modelo y las desviaciones fueron: $a = -1,645 (0,251)$; $b = 3,371 (105,010)$, $d = -1,802 (0,025)$, $e = 0,793 (0,108)$ y $f = 2,532 (0,193)$. Esta función junto con los resultados para las eficiencias geométricas fueron usados en la ecuación GGG para los cálculos de tasa de conteo a una distancia fuente detector de 1 m.

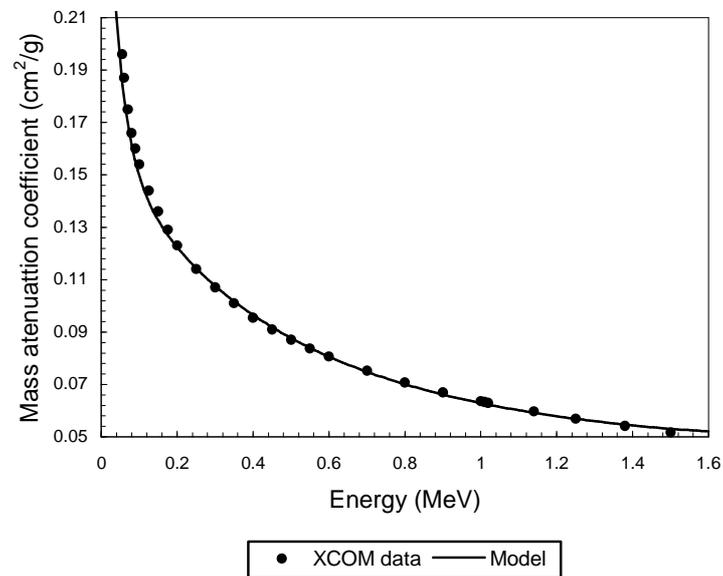


Figura A-8: Coeficientes de atenuación másico vs. Energía de la radiación gamma para el aire

Para estudiar la respuesta del detector a los fotones que inciden perpendicularmente a la superficie del detector el mismo es colocado horizontalmente (Figura A-9). Para la medición de las tasas de conteo de los picos de absorción total, fuentes fueron colocadas a diferentes distancias de la cara del detector con la ayuda de hojas de papel milimetrado fijas sobre la mesa.



Figura A-9: Configuración del detector para las mediciones

En la Figura A-10 se muestra un espectro típico de Co-60 para dos distancias fuente-detector. Como puede verse, el pico que aparece por efecto de suma de coincidencias entre los picos de las energías 1173 y 1332 keV prácticamente desaparece a 10 cm de distancia fuente-detector.

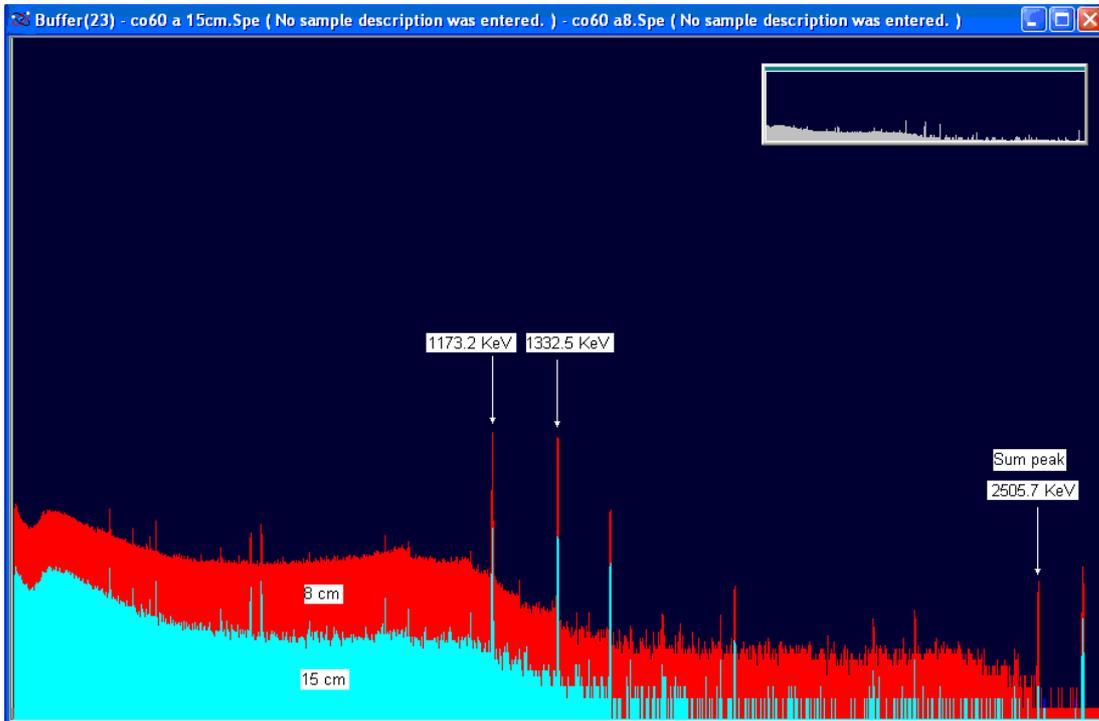


Figura A-10: Espectro de rayos gamma para la fuente ^{60}Co ubicada a dos distancias fuente-detector.

2. *Comparación de la tasa de conteo simulada y experimental para el pico de absorción total a distancia fuente detector de 1 m para diferentes energías.*

A fin de verificar la validez de el método desarrollado, los valores simulados para la tasa de conteo del pico de absorción total para las energías 1,33 MeV(^{60}Co) y 0,662 MeV (^{137}Cs), a una distancia fuente detector de 1m. fue obtenida de la ec. Empleando para ello la eficiencia geométrica ($\epsilon_{geom}^{1m}=0.00029$), coeficientes de atenuación másicos para el aire a ambas energías (0,055 y 0,076 cm^2/g respectivamente) y tasas de conteo a distancias fuente – detector menores a 1 m. Se asumió la densidad del aire como 0,0012 g/cm^3 . Los resultados obtenidos se muestran en la tabla A - 1.



Tabla A-1: Comparación entre las tasas de conteo de los picos de absorción total (Para las fuente ^{60}Co y ^{137}Cs) a 1 metro de distancia fuente- detector, bajo la condición de incidencia normal.

Distancia fuente-detector (cm)	Eficiencia geométrica	^{60}Co			^{137}Cs		
		Tasa de conteo experimental a 1m (s^{-1})	Tasa de conteo predicha a 1m (s^{-1})	Error (%)	Tasa de conteo experimental a 1m (s^{-1})	Tasa de conteo predicha a 1m (s^{-1})	Error (%)
10	0.04906	0.18	0.13	28.17	1.52	1.38	9.44
15	0.01967		0.14	22.63		1.35	10.93
20	0.00929		0.16	10.66		1.37	9.70
25	0.00553		0.17	4.06		1.68	10.83

Para ^{60}Co la predicción mejora a medida de las distancias fuente detector aumentan, entretanto que para ^{137}Cs los errores se encuentran alrededor de un 10% para todas las distancias. Este hecho puede estar relacionado con la influencia del efecto de suma de coincidencias a cortas distancias fuente detector dada la probabilidad de emisión en cascada para los rayos gamma de 1,17 y 1,32 MeV del ^{60}Co , mientras que dicho efecto no tiene lugar para el ^{137}Cs ya que este presenta sólo una energía de emisión gamma.

Los errores obtenidos pueden disminuirse de distintas formas: a) incrementando el número de historias en el cálculo de las eficiencias geométricas, b) utilizando una densidad en correspondencia con las condiciones de medición e incrementando el tiempo de medición a fin de mejorar la estadística de conteo. Otra fuente de error es la dependencia exponencial de la eficiencia de absorción la cual sólo es válida para el caso de incidencia normal y no tiene en cuenta la dispersión en el aire. Sin embargo, el método desarrollado puede considerarse adecuada que los errores obtenidos en el cálculo de tasas de los picos de absorción total, utilizando 25 cm como distancia de referencia son de alrededor del 10%, lo cual corresponde con el error típico en mediciones de radiactividad ambiental.