



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS**  
**“Francisco García Salinas”**

## **TESIS**

**Presentada en la Unidad Académica de Estudios Nucleares en cumplimiento parcial  
de los requisitos para obtener el grado de:**

**MAESTRA EN CIENCIAS NUCLEARES**  
**Con opción terminal en Técnicas Analíticas Nucleares**

**Estudio de la distribución de  $^{137}\text{Cs}$  en suelos de Zacatecas**

**PRESENTA:**

**Q.A. Leticia Hernández Ramírez**

**Director de Tesis:**

**Dr. Carlos Ríos Martínez**

**Asesores:**

**Dra. Sonia Azucena Saucedo Anaya**

**Dr. José Luis Pinedo Vega.**

**Zacatecas, Zac., Octubre 2018**

# Estudio de la distribución de $^{137}\text{Cs}$ en suelos de Zacatecas

Autor: Q.A. Leticia Hernández Ramírez

APROBADA POR EL JURADO

---

Dr. Carlos Ríos Martínez

---

Dra. Sonia A. Saucedo Anaya

---

Dr. José Luis Pinedo Vega

---

Dr. J. Ignacio Dávila Rangel

---

Dr. Fernando Mireles García

© Propiedad intelectual de Leticia Hernández Ramírez y  
la Unidad Académica de Estudios Nucleares  
2018 todos los derechos reservados

[inanna22@hotmail.com](mailto:inanna22@hotmail.com)  
[letyhr.28@outlook.com](mailto:letyhr.28@outlook.com)

Esta tesis es propiedad conjunta del autor y la Unidad Académica de Estudios Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas. No podrá ser publicada en parte o en su totalidad sin el consentimiento por escrito del autor y la Unidad Académica de Estudios Nucleares. La tesis deberá ser citada debidamente cuando sean utilizados los resultados para cualquier propósito.

## *DEDICATORIA*

A mis padres y hermanos por su gran apoyo, confianza, ejemplo y amor. Porque gracias a ellos he logrado cumplir mis metas personales y profesionales. No ha sido fácil pero como dicen la unión hace la fuerza.

Los amo.

## ***AGRADECIMIENTOS***

Al Dr. Carlos Ríos Martínez, mi director de tesis, por permitirme trabajar en este proyecto. Gracias por las enseñanzas dentro y fuera del salón de clases, la paciencia y la amistad.

A mis profesores: Dra. Sonia A. Saucedo Anaya, Dr. Fernando Mireles, M en C. Hugo López del Río, Dr. Ignacio Dávila Rangel, gracias por los conocimientos transmitidos y por brindar siempre una mano amiga.

A mis amigos y amigas que directa e indirectamente formaron parte de esta etapa. Y a mí por no rendirme.

A la Unidad Académica de Estudios Nucleares y al CONACYT, porque gracias a ellos fue posible continuar y concluir satisfactoriamente con esta etapa.

## Resumen

La radiación ambiental proviene de los radionúclidos distribuidos en la corteza terrestre, los rayos cósmicos y la radiación producida por el hombre. Es decir, muchos radionúclidos se encuentran naturalmente en el suelo (debido a las series de decaimiento del Uranio, Actinio y Torio, donde el  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$  son los núcleos padres de las series) y algunos otros como el  $^{137}\text{Cs}$ , que es un radionúclido artificial producto de la fisión del  $^{235}\text{U}$ , depositado en el suelo por las lluvias radiactivas resultantes de los ensayos con armas nucleares desde 1944 y accidentes en plantas nucleares, como el de Three Mile Island, Chernóbil 1986, Fukushima 2011. El movimiento del  $^{137}\text{Cs}$  en el suelo está asociado a la dinámica de sus partículas y además, es el radionúclido más ampliamente utilizado en investigaciones de erosión. Los estudios recientes sobre la presencia del  $^{137}\text{Cs}$  en suelos de Zacatecas se han limitado a determinar su abundancia superficial, por lo que el objetivo de este estudio fue determinar el perfil de concentración del  $^{137}\text{Cs}$  por espectrometría gamma, hasta una profundidad de 25 cm, para inferir su patrón de migración y la posibilidad de utilizarlo como marcador para estudios de erosión. La metodología consistió en elegir localidades representativas de los municipios de Tabasco, Pinos, Loreto y Fresnillo para realizar mediciones *In Situ* y tomar núcleos (de 25 cm de profundidad) de muestras de suelo divididos en estratos de 5 cm para mediciones en laboratorio. Ambas mediciones se realizaron con un sistema de espectrometría gamma basado en un detector de germanio. Las mediciones *In Situ* y la toma de muestra se duplicaron en las 4 localidades. Sólo en 3 sitios se pudo determinar  $^{137}\text{Cs}$  mediante mediciones *In Situ* (AMD 1.02 Bq/kg). Las mediciones de laboratorio (AMD 0.459 Bq/kg) proporcionaron perfiles no uniformes hasta profundidades de 15 cm. No se encontró  $^{137}\text{Cs}$  a mayor profundidad. La mayor abundancia se encontró en los primeros estratos. Las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  reportadas están por encima de la AMD. Los perfiles no son uniformes y se comportan de acuerdo a lo reportado en la literatura. La no existencia de  $^{137}\text{Cs}$  a profundidades mayores de 15 cm implica que no hay migración y su baja concentración impide utilizarlo para estudios de erosión.

## Abstract

Environmental radiation comes from the radionuclides distributed in the earth's crust, the cosmic rays and the radiation produced by man. That is, many radionuclides are found naturally in the soil (due to decay series of uranium, Actinium and Thorium, where the  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  are the series nuclei parents), and some others such as the  $^{137}\text{Cs}$ , which is an artificial radionuclide product of the  $^{235}\text{U}$  fission.  $^{137}\text{Cs}$  is deposited on the ground by the radioactive rains resulting from the essays with nuclear weapons since 1944 and accidents in nuclear plants, such as the Three Miles Island, Chernobyl 1986, Fukushima 2011. The dispersion of  $^{137}\text{Cs}$  in soil is associated with the dynamics of soil particles. This radionuclide is widely used in erosion investigations.

Recent studies on the  $^{137}\text{Cs}$  presence in Zacatecas soil have been limited to determine its surface abundance; the objective of this study is to determine the concentration profile of  $^{137}\text{Cs}$  to a depth of 25 cm to infer its migration pattern and the possibility of using it as a marker for erosion studies. The methodology consisted of choosing representative localities of the municipalities of Tabasco, Pinos, Loreto and Fresnillo to perform *In Situ* and *Lab* measurements by taking nuclei (25 cm deep) of soil samples divided into 5 cm strata. Both gamma spectrometry measurements were performed with a gamma spectrometer based on a germanium detector.

The measurements *In Situ* were doubled in the 4 locations. Only in 3 sites,  $^{137}\text{Cs}$  was able to be determined by *in situ* measurements (AMD 1.02 Bq/kg). Laboratory measurements (AMD 0.459 Bq/kg) provided non-uniform profiles up to depths of 15 cm.  $^{137}\text{Cs}$  was not found at greater depth. The greatest abundance was found in the first strata.  $^{137}\text{Cs}$  concentrations above AMD are only reported. The profiles are not uniform and behave according to what is reported in the literature. The absence of  $^{137}\text{Cs}$  at depths greater than 15 cm implies that there is no migration and its low concentration prevents its use for erosion studies.

## Contenido

<b>Resumen</b> .....	VIII
<b>Abstract</b> .....	IX
<b>Lista de Figuras</b> .....	12
<b>Lista de Tablas</b> .....	13
<b>1. Introducción</b> .....	1
<b>1.1. Planteamiento del problema</b> .....	1
<b>1.2. Justificación</b> .....	1
<b>1.3. Antecedentes</b> .....	1
<b>1.4. Objetivos</b> .....	3
<b>1.4.1. Objetivo General</b> .....	3
<b>1.4.2. Objetivos Específicos</b> .....	3
<b>2. Marco Teórico</b> .....	4
<b>2.1. Fisión Nuclear</b> .....	4
<b>2.2. <sup>137</sup>Cs</b> .....	5
<b>2.3. Dispersión (Transporte atmosférico)</b> .....	6
<b>2.4. Deposición de <sup>137</sup>Cs</b> .....	6
<b>2.5. Adsorción de <sup>137</sup>Cs</b> .....	8
<b>2.6. Radionúclidos en la biosfera.</b> .....	9
<b>2.7. Migración vertical</b> .....	10
<b>2.8. Tipos de distribución vertical natural de <sup>137</sup>Cs</b> .....	11
<b>2.9. Erosión</b> .....	12
<b>2.10. Desintegración nuclear.</b> .....	14
<b>2.10.1. Decaimiento alfa</b> .....	14
<b>2.10.2. Decaimiento beta (<math>\beta^-</math>)</b> .....	15
<b>2.10.3. Decaimiento Gamma</b> .....	16

<b>2.11. Rayos gamma</b> .....	16
<b>2.11.2. Fuentes de radiación gamma.</b> .....	18
<b>2.12. Actividad</b> .....	19
<b>2.13. Actividad específica</b> .....	20
<b>2.14. Detectores semiconductores</b> .....	20
<b>2.15. Detectores de Germanio (Ge)</b> .....	21
<b>2.16. Respuesta del detector</b> .....	22
<b>2.17. Espectrometría gamma</b> .....	23
<b>2.17.1. Espectrometría de rayos gamma en Laboratorio</b> .....	23
<b>2.17.2. Espectrometría gamma <i>In Situ</i></b> .....	24
<b>3. Materiales y Métodos</b> .....	25
<b>3.1 Sitios de medición.</b> .....	25
<b>3.1.1 Generalidades del Estado de Zacatecas.</b> .....	25
<b>3.1.2 Descripción de los sitios de medición</b> .....	27
<b>3.2 Mediciones <i>In Situ</i> y Laboratorio.</b> .....	31
<b>3.2.1. Sistema de detección.</b> .....	31
<b>3.2.2. Desarrollo experimental</b> .....	32
<b>3.2.3. Recolección y preparación de muestras</b> .....	35
<b>3.3. Adquisición de espectros</b> .....	37
<b>4. Resultados y discusión</b> .....	37
<b>5. Conclusiones</b> .....	44
<b>Bibliografía</b> .....	45

## Lista de Figuras

Figura 1. Fisión nuclear del $^{235}\text{U}$ ranio. ....	4
Figura 2. Densidad de deposición de $^{137}\text{Cs}$ con la distancia desde el reactor Chernóbil *.....	7
Figura 3. Ejemplo de perfiles típicos de $^{137}\text{Cs}$ asociados con suelos inalterados. A-E: variación de textura del suelo en Reino Unido; F-I: variación ambiental, en todo el mundo*. .....	8
Figura 4. Ruta de los radionúclidos en los ecosistemas* . ....	10
Figura 5. Distribución del $^{137}\text{Cs}$ a lo largo del perfil, donde, a) corresponde a una distribución a) Estable, b) Mezcla, c) Acumulación, d) denudación y e) No perturbado*. ....	13
Figura 6. Esquema de decaimiento de $^{60}\text{Co}$ .* .....	17
Figura 7. Esquema de decaimiento de $^{137}\text{Cs}$ .* .....	18
Figura 8. Estado de Zacatecas y su división municipal. ....	26
Figura 9. Clima que comprende el estado de Zacatecas. ....	27
Figura 10. Diagrama del sistema de detección utilizado In Situ. ....	32
Figura 11. Acomodo del detector para las mediciones In Situ. ....	33
Figura 12. Arreglo experimental. ....	34
Figura 13. Arreglo experimental del equipo de espectrometría gamma en el Laboratorio de la UAEN. ....	35
Figura 14. Toma de muestra. ....	36
Figura 15. Tratamiento dado a las muestras previo a la medición (Eliminación del exceso de humedad, tamizado, secado en estufa, envasado y sellado). ....	37
Figura 16. Espectro de rayos gamma correspondiente a medición In Situ en Loreto muestra la presencia de $^{137}\text{Cs}$ . ....	39
Figura 17. Espectro de rayos gamma correspondiente a mediciones In Situ en el Obraje (segundo sitio) muestra la presencia de $^{137}\text{Cs}$ .....	39
Figura 18. Espectro de rayos gamma correspondiente a medición In Situ en El Hancón (segundo sitio) muestra la presencia de $^{137}\text{Cs}$ .....	40
Figura 19. Distribución de $^{137}\text{Cs}$ en los perfiles de suelo. ....	43
Figura 20. Actividad vs Altura (msnm).....	44

## Lista de Tablas

Tabla 1. Precipitación anual a lo largo del territorio (milímetros).*	28
Tabla 2. Localización y tipo de suelo de cada sitio.	29
Tabla 3. Peso neto de las muestras.	38
Tabla 4. Actividad en Bq/kg del $^{137}\text{Cs}$ .	40
Tabla 5. Actividad específica en Bq/kg del radionúclido $^{137}\text{Cs}$ para cada muestra en los diferentes sitios de medición.	41

## **1. Introducción**

### **1.1. Planteamiento del problema**

Al determinar el perfil de distribución de  $^{137}\text{Cs}$  en suelo, se pueden documentar los patrones de la redistribución del radionúclido a diferentes profundidades. En estudios realizados anteriormente, se ha encontrado la presencia de  $^{137}\text{Cs}$  a nivel superficial, por lo que es necesario estudiar el comportamiento del  $^{137}\text{Cs}$  en su distribución vertical y en diferentes tipos de suelo. La comparación del perfil obtenido de mediciones de *Laboratorio* con las mediciones *In Situ* permitirá determinar su utilidad para estudio de erosión.

### **1.2. Justificación**

En la búsqueda de la aplicación de los radionúclidos a los estudios del medio ambiente, se ha encontrado que la distribución del  $^{137}\text{Cs}$  en suelos puede ser utilizada para estudios de erosión (1, 2). En el estado de Zacatecas se ha encontrado la presencia de  $^{137}\text{Cs}$  a nivel superficial (3, 4). En este sentido, se pretende determinar la presencia del  $^{137}\text{Cs}$  en suelos de Zacatecas hasta una profundidad de 25 cm para inferir el patrón de migración y la posibilidad de utilizarlo como marcador en estudios de erosión.

### **1.3. Antecedentes**

La radiactividad natural en el suelo se debe a las series naturales de decaimiento de Uranio, Actinio y Torio, junto con el  $^{40}\text{K}$ . Los radionúclidos artificiales como el  $^{137}\text{Cs}$  también pueden estar presentes en el suelo. El  $^{137}\text{Cs}$  es producto de la fisión nuclear del  $^{235}\text{U}$  y su presencia en el medio ambiente se debe a las precipitaciones radiactivas a partir de los ensayos con armas nucleares desde 1944 (5) y accidentes en plantas nucleares, como el de Three Mile Island en 1979 (6), Chernóbil 1986, Fukushima 2011 (7). La dispersión global generalizada

del  $^{137}\text{Cs}$  en el medio ambiente comenzó en 1952 a partir de las pruebas termonucleares con alta producción (1).

Un componente común a estos radionúclidos es la radiación gamma, cuya determinación se realiza en forma directa por espectrometría gamma. La actividad medida corresponde a la cantidad de átomos que se desintegran por unidad de tiempo.

La medición de la radiactividad en el suelo es muy importante para determinar cualquier cambio en las concentraciones de actividad en el tiempo como resultado de la emisión de algunos radionúclidos presentes en el suelo (8). El conocimiento preciso de estas concentraciones permite entonces calcular la dosis recibida de la radiación debido a la presencia de estos radionúclidos. Es necesario monitorear la emisión de radiactividad en el medio ambiente con el fin de gestionar la protección radiológica adecuada de los seres humanos (8). También permite caracterizar sitios en términos de radiación de fondo natural, realizar monitoreo para estudiar sitios contaminados por radionúclidos artificiales y / o TENORM (Materiales Radiactivos de Origen Natural Modificados Tecnológicamente), o para medir la contaminación por las precipitaciones después de la detonación de armas nucleares. Otras aplicaciones son la evaluación de las liberaciones de rutina y accidentales de las instalaciones nucleares, y el monitoreo del nivel de contaminación del suelo en las diferentes fases de los proyectos de restauración ambiental (9).

El  $^{137}\text{Cs}$  emite radiación beta menos de alta energía, produciendo un isómero,  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ , cuya desintegración produce un rayo gamma para dar lugar al isotopo estable,  $^{137}\text{Ba}$  (10). El  $^{137}\text{Cs}$  se adsorbe fuertemente en las partículas de suelo, que limitan su movimiento por procesos químicos y biológicos. El movimiento del  $^{137}\text{Cs}$  en el medio ambiente ocurre principalmente por procesos físicos (1), el agua y el viento son los factores dominantes que transportan las partículas de suelo marcadas con  $^{137}\text{Cs}$  entre las capas del suelo (11).

Las aplicaciones del  $^{137}\text{Cs}$  se extienden a diferentes ámbitos como la medicina, industria, alimentación y medio ambiente. Algunos ejemplos del uso del  $^{137}\text{Cs}$  son: terapia médica para oncología, radiografía industrial, medidores de radiación, irradiadores de alimentos y pruebas de suelo (10). Este último de gran interés para los fines de este trabajo, debido a que es el radionúclido más ampliamente utilizado en investigaciones de erosión de los suelos, gracias

a su gran afinidad por las partículas finas, a su tiempo de vida relativamente grande y su relativamente fácil detección (11).

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

- Determinar la distribución vertical del  $^{137}\text{Cs}$  en suelos del estado de Zacatecas.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Relacionar el perfil de distribución de  $^{137}\text{Cs}$  con el tipo de suelo.
- Establecer si los niveles de Actividad de  $^{137}\text{Cs}$  permiten su aplicación como marcador para estudios de erosión.
- Establecer la relación de estratificación del  $^{137}\text{Cs}$  con la exposición ambiental.

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Fisión Nuclear

Las centrales nucleoelectricas comerciales y las formas más comunes de armamento nuclear dependen del proceso de fisión nuclear para su funcionamiento. La primera fisión nuclear que se descubrió fue la del  $^{235}\text{U}$ .

En una reacción de fisión nuclear un núcleo pesado es bombardeado por un neutrón, el núcleo se divide en dos núcleos más pequeños, dando lugar a fragmentos de fisión, varios neutrones y una cantidad de energía. La Figura 1 ilustra el proceso de fisión. Mientras las ecuaciones 1 y 2 muestran dos formas diferentes de división del  $^{235}\text{U}$  (12).

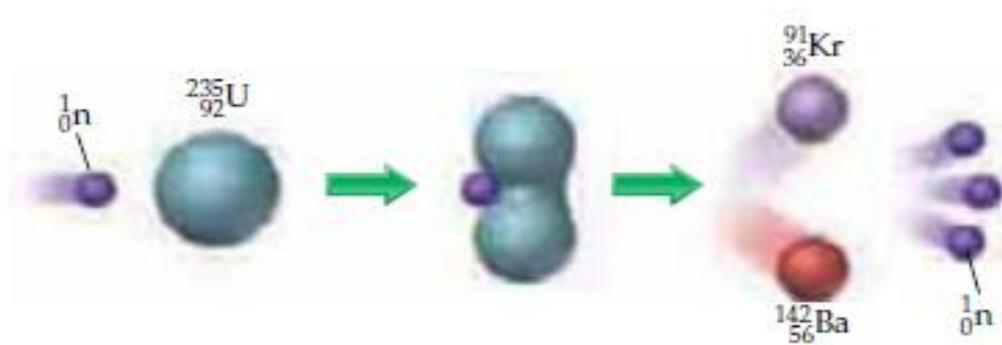
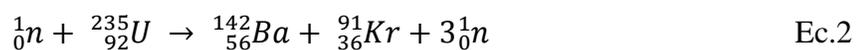
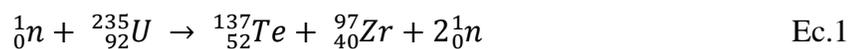
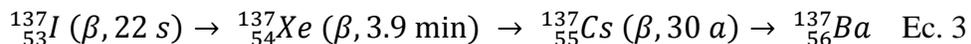


Figura 1. Fisión nuclear del  $^{235}\text{U}$  Uranio.



Todos los fragmentos de fisión son radioactivos y decaen, generalmente en cadenas de varios miembros, para formar productos de fisión hasta decaer a un producto estable. El  $^{137}\text{Cs}$  es un

producto de fisión, la siguiente cadena de productos de fisión describe la obtención de este radionúclido.



## 2.2. ${}^{137}\text{Cs}$

El rendimiento del  ${}^{137}\text{Cs}$  en reactores de agua ligera como producto de fisión es bastante alto (6.18%) (13) e igualmente se ha producido en las detonaciones durante las pruebas de armas nucleares desde la década de 1940 y se ha distribuido a través de la superficie terrestre en patrones dependientes de la latitud y la precipitación regional. Pese a que en 1963 se firmó un tratado de prohibición de pruebas nucleares y las tasas de precipitación radiactiva global han disminuido de manera constante, no todos los países firmaron el tratado y a la fecha continúan las pruebas nucleares en algunos países (1). Es adsorbido por las partículas finas del suelo y casi no intercambiable (14). El  ${}^{137}\text{Cs}$  se adsorbe fuertemente sobre arcilla y partículas orgánicas. El aumento de las concentraciones de iones como el Na, K e H se vuelven competitivos con el  ${}^{137}\text{Cs}$  y disminuyen ligeramente la adsorción de  ${}^{137}\text{Cs}$ . Debido a que el  ${}^{137}\text{Cs}$  está fuertemente adsorbido a los sitios de intercambio de cationes, el movimiento en los suelos debido a procesos químicos o biológicos es limitado. Por lo tanto, los procesos físicos, como la erosión y la labranza, son las principales causas de la redistribución de  ${}^{137}\text{Cs}$  en los suelos (1).

Cualquier movimiento posterior de  ${}^{137}\text{Cs}$  a través del paisaje puede estar relacionado con el movimiento de las finas partículas de suelo. La técnica de  ${}^{137}\text{Cs}$  (1) se puede utilizar para documentar las tasas de erosión. La comparación del inventario de  ${}^{137}\text{Cs}$  medido de un punto de muestreo con un inventario de referencia indica ya sea erosión, si es más pequeña, o deposición, si es mayor que el valor de referencia.

El  ${}^{137}\text{Cs}$  emite un fuerte rayo gamma (662 keV) haciendo que su medición en muestras ambientales sea realmente fácil y precisa sin requerir una preparación química especial (1).

### **2.3. Dispersión (Transporte atmosférico)**

Del accidente de Chernóbil, los productos radiactivos liberados fueron transportados en forma de gases y partículas de polvo por las corrientes de aire. De esta manera, se dispersaron ampliamente por el territorio de la Unión Soviética, sobre muchos otros países (principalmente europeos) y en pequeñas cantidades en todo el hemisferio norte. El cambio de las condiciones meteorológicas, con vientos de diferentes direcciones a distintas altitudes y la continua liberación de materiales radiactivos durante un período de 10 días dio lugar a un patrón de dispersión muy complejo (15).

En las pruebas nucleares, el  $^{137}\text{Cs}$  (y otros radionúclidos) se inyectaron en la estratosfera (1, 15) donde circula a nivel mundial. El  $^{137}\text{Cs}$  se mueve de la estratosfera a la troposfera y el reingreso desde la troposfera a la superficie terrestre (por precipitación radiactiva) está fuertemente relacionado con los patrones y tasas de precipitación local (1). Durante el accidente de Chernóbil la liberación de materiales radiactivos fue en la troposfera y a diferencia de las pruebas nucleares tuvo lugar en un único sitio en una época específica del año y la liberación de material radiactivo se dio durante varios días (15).

### **2.4. Deposición de $^{137}\text{Cs}$**

La deposición de productos radiactivos está asociada principalmente con la lluvia (fall out) y dado que la precipitación ocurrió muy esporádicamente en toda Europa durante el paso del aire contaminado, el patrón de deposición fue muy irregular. La mayor deposición de  $^{137}\text{Cs}$  fuera de la URSS se registró en Suecia, al norte de Estocolmo donde la densidad de deposición superó los 85 kBq/m<sup>2</sup>.

La Figura 2 muestra la relación entre la deposición de  $^{137}\text{Cs}$  y la distancia, basada en mediciones en los 33 países evaluados fuera de la URSS. Se observó una disminución relativamente uniforme en la densidad de deposición promedio de  $^{137}\text{Cs}$  con respecto a la distancia desde Chernóbil.

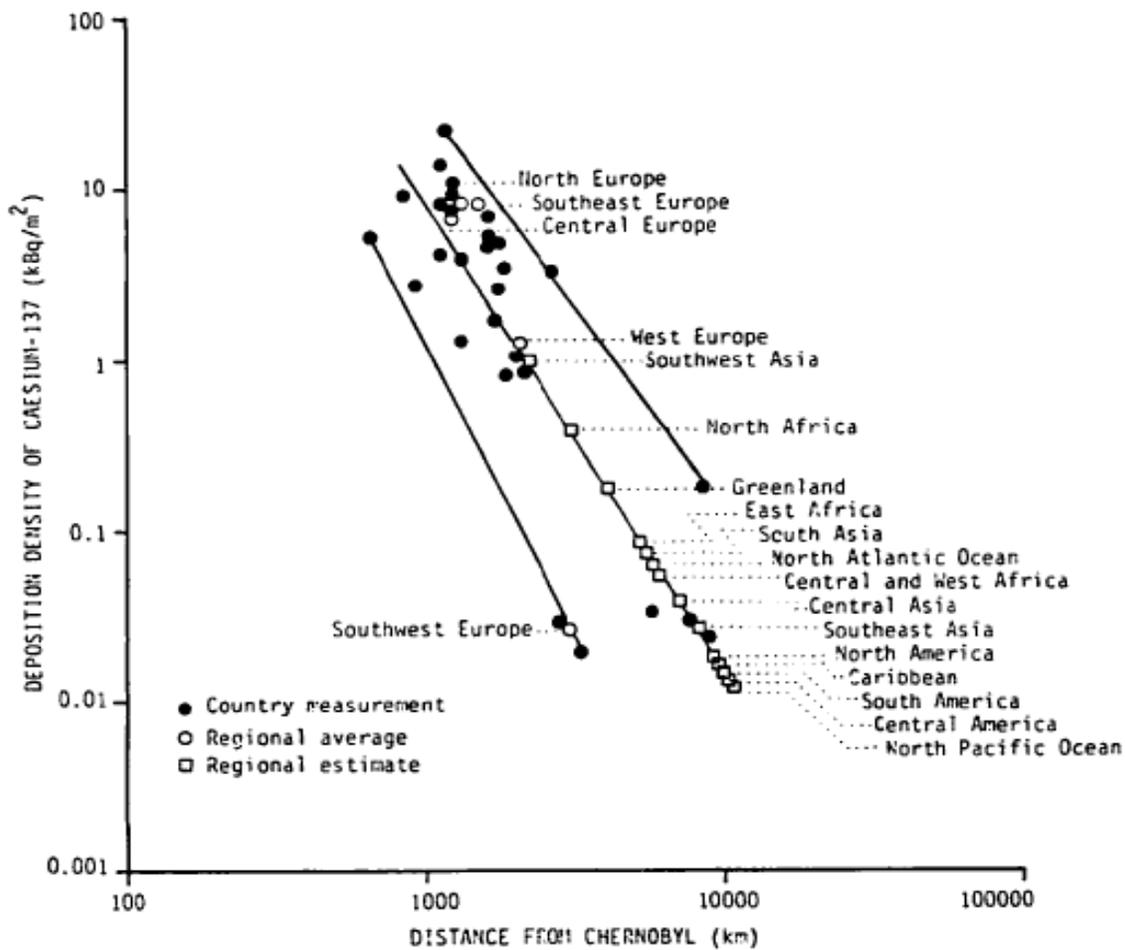


Figura 2. Densidad de deposición de  $^{137}\text{Cs}$  con la distancia desde el reactor Chernóbil \*

\* UNSCEAR. SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; 1988.

Se muestra una envolvente de puntos junto con la curva de función de potencia central, a partir de la cual se estiman las densidades de deposición de  $^{137}\text{Cs}$  en las diversas regiones. Se muestran las densidades de deposición de  $^{137}\text{Cs}$  promedio en las cinco regiones principales de Europa, basadas en mediciones (15). También se muestran estimaciones de Densidad de deposición para algunas regiones, Norte América, Centro América y Sudamérica por ejemplo se estima una densidad de deposición aproximada a  $0.01 \text{ kBq/m}^2$ .

## 2.5. Adsorción de $^{137}\text{Cs}$

En la literatura se encuentran reportes de numerosas investigaciones de laboratorio y de campo sobre la adsorción de  $^{137}\text{Cs}$  en el suelo. Los estudios sugieren que las proporciones de partículas finas que se encuentran comúnmente en los suelos minerales no limitan la adsorción de  $^{137}\text{Cs}$ . Livens y Baxter examinaron varios tipos de suelo y encontraron que el  $^{137}\text{Cs}$  fue adsorbido por todos los suelos minerales investigados. La fuerte adsorción se evidencia por la baja velocidad de migración vertical del  $^{137}\text{Cs}$  evidente para muchos tipos de suelo tanto en experimentos de campo como en experimentos de laboratorio.

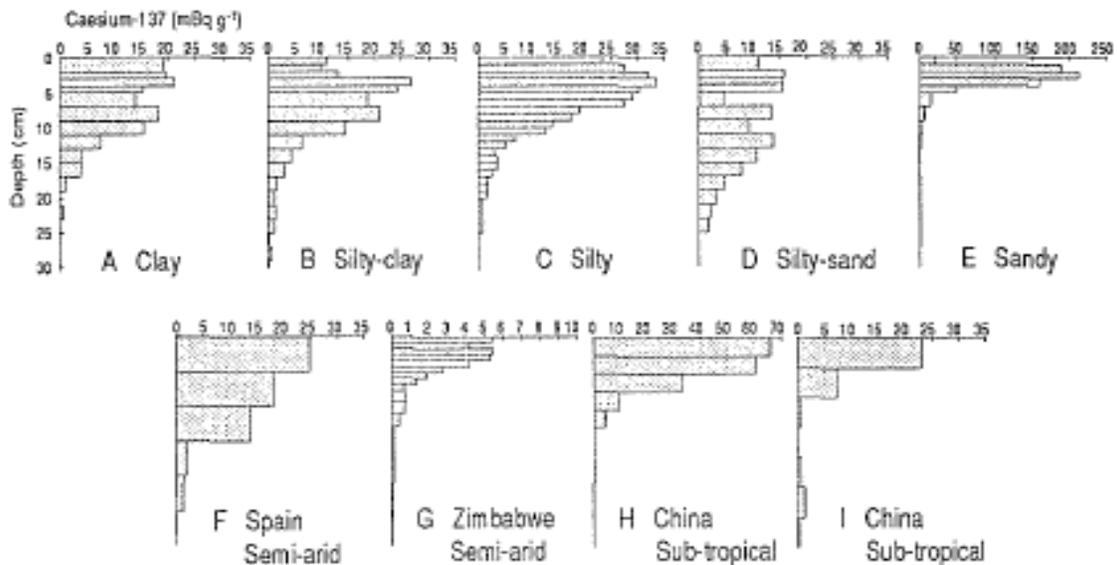


Figura 3. Ejemplo de perfiles típicos de  $^{137}\text{Cs}$  asociados con suelos inalterados. A-E: variación de textura del suelo en Reino Unido; F-I: variación ambiental, en todo el mundo\*.

\* Walling D, Quine T. The use of caesium-137 measurements in soil erosion surveys 1992.

Todos los perfiles de  $^{137}\text{Cs}$  de estos suelos que abarcan un rango de textura de arcilla a arena en Reino Unido (A-E) y un rango ambiental de semiárido a subtropical en todo el mundo (F-I) muestran una disminución en la actividad de  $^{137}\text{Cs}$  conforme aumenta la profundidad. En

cada caso, más del 75% del inventario total ocurre en los primeros 15 cm, lo que indica que el desplazamiento vertical del radionúclido es mínimo (2).

## **2.6. Radionúclidos en la biosfera.**

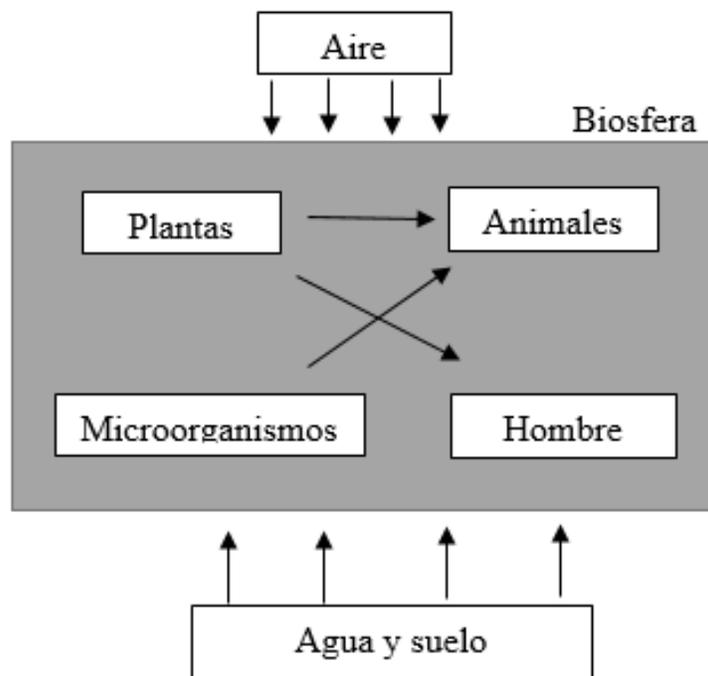
El transporte de  $^{137}\text{Cs}$  a través del paisaje involucra transferencias entre tres componentes principales: vegetación, suelo y agua. Este radioisótopo se puede depositar en la vegetación y tiene la capacidad de ser adsorbido o absorbido. La mayor parte de  $^{137}\text{Cs}$  adsorbido se lava de la vegetación y se mueve al suelo. El  $^{137}\text{Cs}$  absorbido se libera al suelo cuando la vegetación muere y se descompone.(1)

Los radionúclidos en la atmósfera, en las aguas superficiales y en la superficie de la tierra tienen acceso inmediato a la biosfera. Tanto de las aguas superficiales como las aguas subterráneas cercanas a la superficie, de los suelos y del aire, los radionúclidos pueden ser absorbidos por microorganismos, plantas, peces y otros animales y por lo tanto entran en las diversas vías de la cadena alimentaria. Las fracciones de radionúclidos transferidos a los seres vivos dependen de la forma química (especie) del radionúclido considerado y del metabolismo de los microorganismos, plantas y animales, por lo que pueden diferir en varios órdenes de magnitud. El estudio del comportamiento de los radionúclidos en los ecosistemas que comprenden aire, agua, suelo, microorganismos, plantas, animales y el hombre pertenece al campo de estudio de la radioecología.

Las rutas que toman los radionúclidos en los ecosistemas se ilustran en la Figura 4, las plantas absorben radionúclidos del aire por deposición en las hojas, o del suelo por las raíces. En esta etapa, las especies de los radionúclidos y su solubilidad son las más importantes. Los microorganismos incorporan radionúclidos presentes en el agua o en el suelo. Mientras tanto, los animales y el hombre pueden estar contaminados por inhalación o deposición en la piel debido a los radionúclidos que se encuentran en el aire (gases, aerosoles, polvo), o por absorción de agua y a través de la cadena alimentaria por la digestión.

El metabolismo que siguen los radionúclidos en las plantas, los animales y el hombre puede ser comparado con el de los elementos traza. Los radioisótopos de elementos traza esenciales,

como  $^{14}\text{C}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$  y  $^{65}\text{Zn}$  muestran el mismo comportamiento que los isótopos estables de estos elementos. Otros radionúclidos se comportan de forma similar a otros elementos (por ejemplo,  $^{90}\text{Sr} \approx \text{Ca}$ ,  $^{137}\text{Cs} \approx \text{K}$ ), y los radioisotopos de elementos pesados son comparables con otros elementos pesados.



*Figura 4. Ruta de los radionúclidos en los ecosistemas\*.*

\* Lieser KH. Nuclear and Radiochemistry. Second, Revised Edition ed2001

El metabolismo en el hombre, los animales y las plantas sigue los siguientes pasos:

- Reabsorción en el pulmón o en el tracto gastrointestinal (en hombres y animales) o por las hojas o raíces (en plantas).
- Distribución en el cuerpo o en la planta.
- Retención en el cuerpo o en la planta, a menudo en órganos o lugares especiales (13).

## 2.7. Migración vertical

Es importante considerar cómo la migración de radionúclidos cambia con el tiempo después de la precipitación. Para cuantificar la movilidad de los radionúclidos en los suelos, la práctica común es adaptar los modelos matemáticos al perfil de profundidad de la actividad de los radionúclidos. Los modelos se dividen en tres clases:

- Modelos basados en soluciones a la ecuación de advección-dispersión.
- Modelos basados en funciones de ajuste exponenciales
- Modelos compartimentales basados en tiempos de permanencia de diferentes núclidos en diferentes capas de suelo a menudo denominados modelos de “tiempo de permanencia” o “de caja”.

Estos modelos normalmente suponen implícitamente que las tasas de migración son constantes a lo largo del tiempo, ya que se calibran utilizando mediciones de perfiles de actividad-profundidad en un momento particular después de la precipitación. Sin embargo, no pueden necesariamente predecir con exactitud la migración futura de radionúclidos en los suelos ya que en muchos suelos las tasas de migración cambian significativamente con el tiempo (16).

La distribución vertical de los radionúclidos en el suelo se puede suponer que corresponde a uno de los dos casos más comunes:

- Homogénea con la profundidad (para los radionúclidos naturales en el suelo)
- Disminución cuasi-exponencial (característico de los radionúclidos depositados sobre la capa superficial del suelo y han migrado a capas más profundas, siempre y cuando el suelo no se haya alterado durante ese tiempo.) (17)

## **2.8. Tipos de distribución vertical natural de $^{137}\text{Cs}$**

Los procesos físicos (erosión y bioturbaciones) alteran la distribución de  $^{137}\text{Cs}$  en el perfil de suelo y producen formas típicas que muestran el tipo de los fenómenos involucrados.

La Bioturbación altera la distribución de  $^{137}\text{Cs}$  en la capa superior, pero en un sitio plano se puede considerar que el proceso combina las partículas del suelo sobre la capa afectada, sin

cambiar el valor total de  $^{137}\text{Cs}$ . Mientras tanto, la erosión es la pérdida de capas de suelo debido a fenómenos físicos naturales o propiciados por el hombre.

Perrin y colaboradores (2006) reportan 5 tipos diferentes de distribuciones verticales típicas de  $^{137}\text{Cs}$ : Estabilidad, denudación, acumulación, mezcla y no perturbado.

- Estable: Establece que los sitios no perturbados se caracterizan por un perfil de  $^{137}\text{Cs}$  con una ley exponencial decreciente. (bioturbación en los niveles superiores de 5-10 cm)
- Denudación: Se identifica cuando el suelo sometido a erosión tiene un contenido de  $^{137}\text{Cs}$  más bajo debido a la eliminación de las capas superiores más enriquecidas.
- Acumulación: Se define mediante enriquecimiento de la capa superior, pero siempre disminuyendo. La distribución tiene forma de panza, la cima corresponde al comienzo de la acumulación, inmediatamente después de la deposición de  $^{137}\text{Cs}$ .
- Mezcla: Indica una homogeneización bastante espesa de los niveles superficiales, el tipo de mezcla es predominante en los suelos cultivados, donde la capa de arado que se extiende hasta una profundidad de aproximadamente 30 cm corresponden a la zona fusionada del contenido de  $^{137}\text{Cs}$ .
- No perturbado: Es una distribución exponencial perfecta de la existencia de  $^{137}\text{Cs}$  donde no se produjo bioturbación, ni procesos de erosión (18).

La Figura 5 muestra los tipos de distribución de  $^{137}\text{Cs}$  modelados con MOCA en una investigación realizada por J. Perrin y colaboradores (18), las distribuciones se organizan por el tipo de perturbación que afecta a los suelos.

## **2.9. Erosión**

El mantenimiento y aumento del suministro mundial de alimentos depende básicamente de la productividad y calidad de todos los suelos agrícolas. Por lo tanto, la pérdida de suelo es inaceptable y se deben hacer todos los esfuerzos para evitar que este valioso recurso se pierda (19).

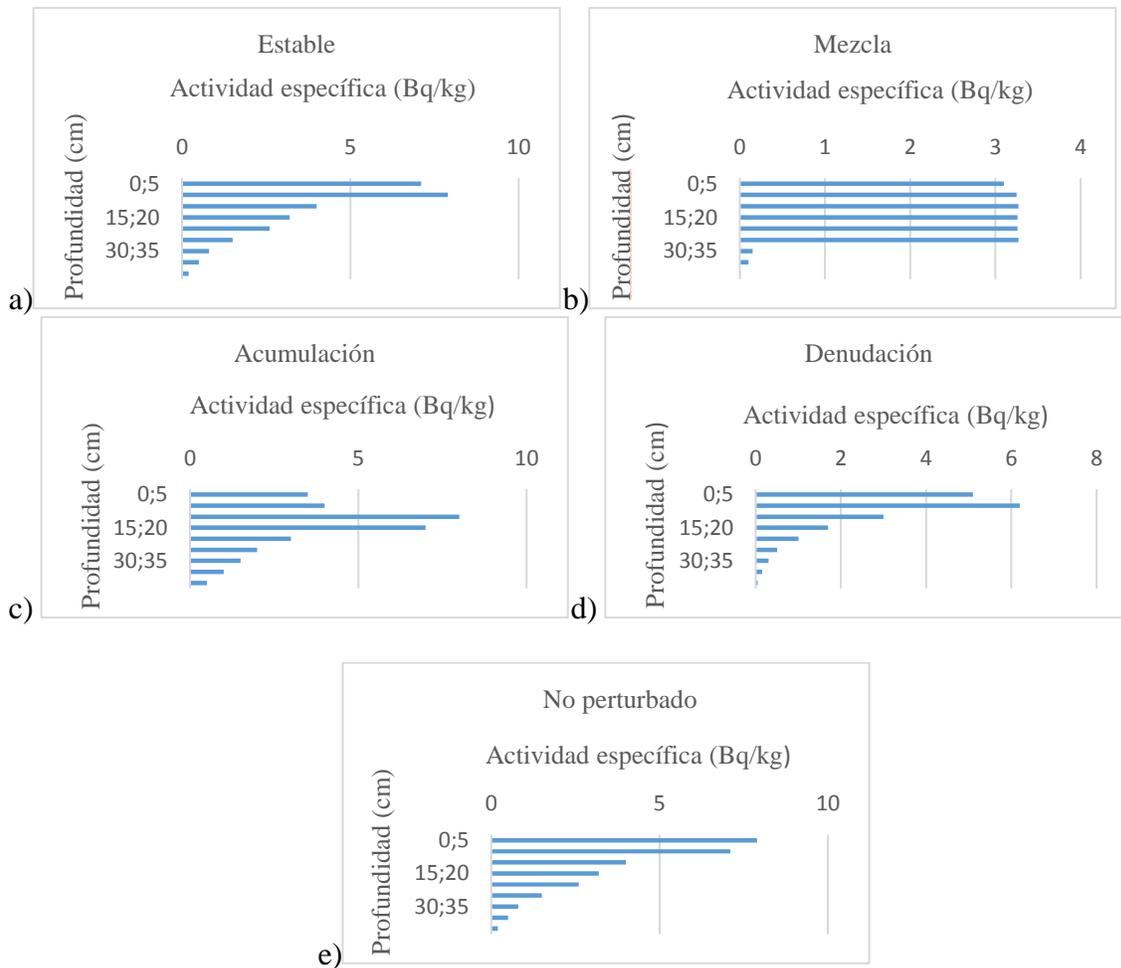


Figura 5. Distribución del  $^{137}\text{Cs}$  a lo largo del perfil, donde, a) corresponde a una distribución a) Estable, b) Mezcla, c) Acumulación, d) denudación y e) No perturbado\*.

\* Perrin J, Carrier F, Guillot L. Determination of the vertical distribution of radioelements (K, U, Th, Cs) in soils from portable HP-Ge spectrometer measurements: A tool for soil erosion studies.

Los estudios del uso de  $^{137}\text{Cs}$  para medir la erosión se remontan a principios de la década de 1960, estos estudios consisten en medir la relación entre la erosión del suelo y el movimiento de radionúclidos debido a la precipitación radiactiva. Rogowski y Tamura (1965,1970) aplicaron  $^{137}\text{Cs}$  en pequeñas parcelas de prueba con pasto en Tennessee y encontraron una relación logarítmica entre la pérdida medida del suelo y la pérdida de  $^{137}\text{Cs}$  (1).

Los suelos además de ofrecer la producción de alimentos, ofrecen otros servicios que incluyen el almacenamiento de carbono, filtración de agua, regulación climática y biodiversidad. Por esta razón se necesitan estimaciones confiables de la erosión del suelo no solo para evaluar los impactos y costos en términos de la degradación del funcionamiento y

los servicios del ecosistema, sino también para evaluar la pérdida de lo que mejor se considera un recurso no renovable (que proporciona la mayor parte de los alimentos del mundo). El mantenimiento y aumento del suministro mundial de alimentos depende básicamente de la productividad y calidad de todos los suelos agrícolas, por lo tanto la pérdida de suelo es inaceptable y se deben hacer todos los esfuerzos para evitar que este valioso recurso se pierda (19).

Aunque la erosión del suelo es un proceso natural, muchas actividades humanas han aumentado las tasas de erosión. Se han desarrollado y usado muchas técnicas cualitativas y cuantitativas para medir patrones y tasas de erosión (1). Las propiedades del  $^{137}\text{Cs}$  como su gran afinidad por las partículas finas, su tiempo de vida relativamente grande y su fácil detección lo hacen único como marcador para estudiar la erosión.

La base de la técnica de  $^{137}\text{Cs}$  para estudios de erosión está bien documentada y se deben tomar en cuenta varias suposiciones para su exitosa aplicación (2):

- Distribución uniforme de la lluvia local.
- Adsorción rápida de la precipitación del  $^{137}\text{Cs}$  sobre las partículas del suelo.
- La posterior redistribución del  $^{137}\text{Cs}$  refleja el movimiento de sedimentos.
- Las estimaciones de la tasa de pérdida de suelo pueden derivarse de las mediciones de los inventarios de  $^{137}\text{Cs}$  en el suelo.

## **2.10. Desintegración nuclear.**

Cuando los núcleos atómicos de algunos isótopos tienen un exceso de energía, son inestables y se desintegran para formar núcleos más estables de un isótopo diferente. Este proceso va acompañado de la emisión de partículas o energía, denominada radiación nuclear, a los nucleídos con esta característica se les conoce como radionúclidos (20).

### **2.10.1. Decaimiento alfa**

El decaimiento alfa está representado con la siguiente ecuación (21)



Casi todos los emisores alfa naturales son elementos pesados con  $Z \geq 83$ . Como ejemplo de desintegración alfa, consideremos el  ${}^{226}\text{Ra}$  (22):



Una partícula alfa es un núcleo de helio altamente energético que se emite desde el núcleo de un átomo inestable cuando la proporción de neutrones a protones es demasiado baja. Es una partícula con carga positiva que consiste en dos protones y dos neutrones. El resultado de la emisión alfa es una hija cuyo número atómico es dos menos que el del padre y cuyo número de masa atómica es cuatro menos que el del padre (23).

### 2.10.2. Decaimiento beta ( $\beta^-$ )

En la desintegración beta, un núcleo emite simultáneamente un electrón o una partícula beta negativa  $\beta^-$  y un antineutrino,  $\bar{\nu}$ . Ambas partículas se crean en el momento de la desintegración nuclear. El antineutrino, al igual que su antipartícula neutrino,  ${}^0_0\nu$ , no tiene carga y poca o ninguna masa (22, 24).

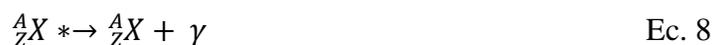


Ejemplo: Como ejemplo de desintegración beta, consideremos  ${}^{60}\text{Co}$



### 2.10.3. Decaimiento Gamma

En el decaimiento  $\gamma$ , un núcleo pasa de un estado excitado a un estado de menor energía y la diferencia de energía entre los dos estados se libera en forma de un fotón. La desintegración Gamma está representada por (21):



## 2.11. Rayos gamma

La energía de radiación es una forma de propagación de la energía en el espacio que no implica una masa medible (25). Los rayos gamma son radiaciones electromagnéticas altamente penetrantes. Durante un decaimiento (Alfa, Beta), un núcleo es dejado en un estado excitado, dicho núcleo generalmente emite inmediatamente su energía de excitación en forma de un rayo gamma, casi siempre en  $<10^{-12}$  segundos, sin afectar el número atómico (Z) o el número de masa atómica (A) del átomo (22), después de que ha ocurrido la emisión de la partícula cargada el rayo gamma parece provenir del núcleo padre, cuando en realidad es emitido por el núcleo hijo. Debido a que el rayo gamma parece haber aparecido simultáneamente con la partícula cargada, se dice que el padre es un emisor gamma (23).

### 2.11.1. Emisión de rayos gamma

Durante la emisión de rayos gamma uno o más fotones gamma pueden emitirse desde los estados excitados de los núcleos hijas después de la desintegración radiactiva. Los núclidos en los estados inicial y final se llaman isómeros.

Así como los espectros ópticos son característicos de los elementos químicos, un espectro de rayos gamma es característico de los radionúclidos particulares que están presentes en una muestra. Mediante la técnica de espectroscopia de rayos gamma, se pueden medir las intensidades de fotones a diversas energías para determinar la distribución de radionúclidos en una muestra. Por ejemplo, cuando está presente el  $^{60}\text{Co}$ , los fotones de energía 1.173 MeV y 1.332 MeV se observan con la misma intensidad (aunque estos se denominan "rayos gamma del  $^{60}\text{Co}$ ", en la Figura 6 se observa que en realidad son emitidos por el núcleo hijo  $^{60}\text{Ni}$ ).

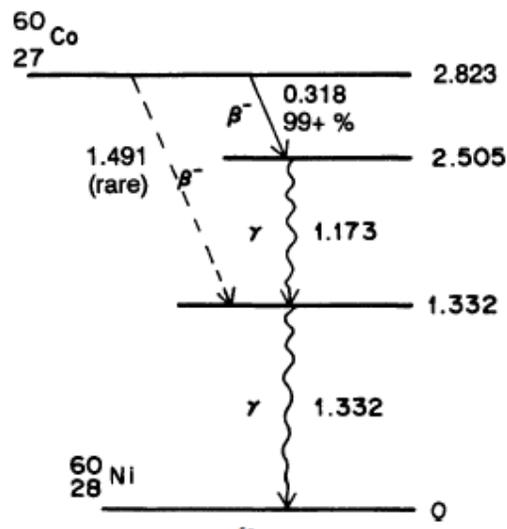
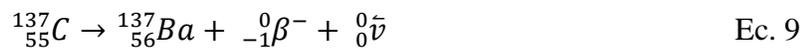


Figura 6. Esquema de decaimiento de  $^{60}\text{Co}$ .\*

\*Turner JE. Atoms, Radiation, and Radiation Protection: Wiley; 2008.

Al igual que  $^{60}\text{Co}$ , otra fuente importante de rayos gamma es el radioisótopo  $^{137}\text{Cs}$ . Ambos son emisores  $\beta^-$ . El decaimiento de  $^{137}\text{Cs}$  está representado por:



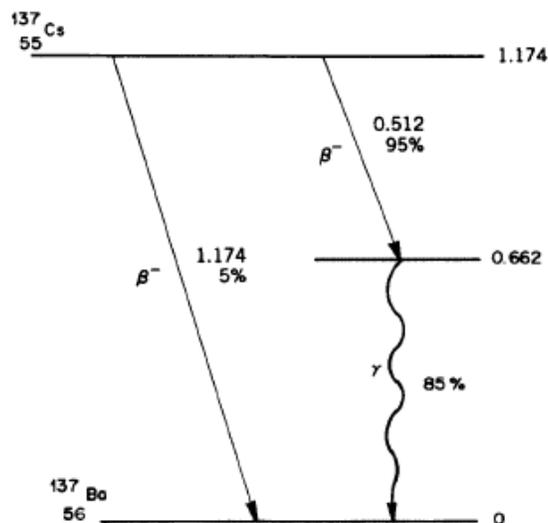


Figura 7. Esquema de decaimiento de  $^{137}\text{Cs}$ . \*  
 \*Turner JE. Atoms, Radiation, and Radiation Protection: Wiley; 2008.

La Figura 7 representa el esquema de decaimiento de  $^{137}\text{Cs}$ . Los rayos gamma generalmente se emiten rápidamente después de la desintegración radiactiva del  $^{137}\text{Cs}$  a un estado secundario que se denomina “excitado”. Después de la desintegración del  $^{137}\text{Cs}$  se forma  $^{137}\text{Ba}$  (en estado excitado) y tiene una vida media de 2.55 min. Tal estado nuclear se denomina meta estable y se designa con el símbolo m ( $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ) (22).

### 2.11.2. Fuentes de radiación gamma.

Las fuentes naturales de radiación se derivan de radioisótopos sintetizados durante la creación del sistema solar. Debido a sus largas vidas medias, todavía existen hoy. De éstos, el potasio ( $^{40}\text{K}$ ), el uranio ( $^{238}\text{U}$  y  $^{235}\text{U}$  y sus hijas) y el torio ( $^{232}\text{Th}$  y sus hijas) son los únicos núclidos que producen rayos gamma de alta energía de intensidad suficiente para ser utilizados en el mapeo de rayos gamma.

El desarrollo de la energía nuclear ha dado lugar a la creación de radionúclidos artificiales. Estos se crean durante explosiones de prueba de armas nucleares y en reactores de investigación para usos científicos e industriales. El  $^{137}\text{Cs}$  es el principal producto de emisión

de rayos gamma por explosiones y accidentes nucleares. Tiene un solo fotopico a 0.662 MeV y tiene una vida media de aproximadamente 30 años (20).

La radiación de fondo es la suma de las dosis de radiación externa que se acumulan a partir de fuentes de radiación naturales ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{14}\text{C}$ , etc.), radiación cósmica y fuentes antropogénicas, como residuos de pruebas de armas, consecuencias de accidentes liberaciones y liberaciones de las operaciones de rutina de los reactores y el ciclo del combustible nuclear. La tasa de dosis de fondo varía de un lugar a otro, dependiendo principalmente del contenido de minerales en el suelo y la intensidad de los rayos cósmicos (que a su vez depende de la altitud y la latitud) (23).

El radón atmosférico ( $^{222}\text{Rn}$ ) y sus productos secundarios son la principal fuente de radiación de fondo.  $^{222}\text{Rn}$  (gas de radón) es móvil y puede escapar de las rocas y los suelos y acumularse en la atmósfera inferior. Sus productos secundarios ( $^{214}\text{Bi}$  y  $^{214}\text{Pb}$ ) se unen a los aerosoles y partículas de polvo en el aire y emiten rayos gamma durante el decaimiento.

Los rayos gamma de alta energía y las partículas atómicas de origen cósmico reaccionan con átomos y moléculas en la atmósfera superior y generan una radiación secundaria compleja. Esta radiación secundaria reacciona con la materia circundante para producir un fondo de rayos gamma "cósmico". El fondo del instrumento se refiere a la radiación debida a trazas de K, U y Th en el detector y el equipo circundante. Esto incluirá la radiación del vehículo, en el caso de los estudios aerotransportados y por carretera, respectivamente. Este componente de fondo es constante (20).

## 2.12. Actividad

La ley de decaimiento radiactivo expresa la disminución en el número de átomos de un radionúclido con respecto al tiempo:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{Ec.10}$$

Donde:  $N_t$  = la cantidad de átomos presentes después cierto del tiempo  $t$  (s);

$N_0$  = la cantidad de átomos presentes en el tiempo  $t=0$ ;

$\lambda$  = constante de desintegración de un radionúclido ( $s^{-1}$ )

La vida media  $T_{1/2}$  (s) es una constante relacionada con el decaimiento radiactivo y se define como el tiempo que tarda la mitad de los radionúclidos en descomponerse:

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad \text{Ec. 11}$$

El producto  $\lambda \cdot N$  es conocido como la actividad o razón de desintegración por unidad de tiempo del radionúclido (20), cuya unidad SI es el Becquerel (Bq), que es igual a la desintegración de un átomo por segundo (23).

$$A = \lambda \cdot N \quad \text{Ec. 12}$$

### **2.13. Actividad específica**

Se debe tener presente que el Becquerel, aunque es utilizado como una unidad de actividad, no implica nada sobre la masa o el volumen del material radiactivo en el que se produce el número especificado de transformaciones. La concentración de radiactividad, o la relación entre la masa de material radiactivo y la actividad, se denomina actividad específica. La actividad específica es la cantidad de Bequerels por unidad de masa o volumen (Bq/kg) (23).

### **2.14. Detectores semiconductores**

Los detectores semiconductores a veces se denominan detectores de estado sólido para distinguirlos de los detectores llenos de gas, pero por sus propiedades semiconductoras

difieren de otros detectores de estado sólido, tales como detectores de centelleo sólido. Los detectores semiconductores han encontrado una amplia aplicación durante las últimas décadas, en particular para la espectrometría de rayos x, rayos  $\gamma$  y como detectores de partículas (13).

Podemos decir que el material ideal para el detector semiconductor es:

- Tener un coeficiente de absorción tan grande como sea posible (es decir, un alto número atómico)
- Proporcionar tantos pares de electrón-hueco como sea posible por unidad de energía (es decir, bajo  $\epsilon$ )
- Permitir una buena movilidad de los electrones y los huecos
- Estar disponible en alta pureza como cristales únicos perfectos
- Estar disponible en cantidades razonables a un costo razonable

Si se tienen en cuenta todos estos elementos, solo quedan unos pocos posibles candidatos. El candidato más obvio es el silicio, debido a los esfuerzos realizados en la preparación de material de alta pureza para la industria electrónica y que está disponible a un costo razonable. Pero tiene la desventaja de bajo número atómico, lo que significa que en la práctica solo se usa para la medición de fotones de baja energía. Los detectores basados en silicio son de uso rutinario en la espectrometría de rayos X (26) y por lo tanto no es conveniente utilizarlo en espectrometría de rayos gamma. El germanio es con mucho el material detector de rayos gamma más común. Su número atómico más alto que el silicio hace que sea práctico usarlo para la detección de radiación gamma de alta energía.

### **2.15. Detectores de Germanio (Ge)**

La producción de germanio de alta pureza (HPGe) para fungir como detectores tan solo contiene una concentración de impurezas de  $10^{16}$  átomos /  $\text{cm}^3$  o menos (21). Estos detectores ahora se designan como Ge, no HPGe, y simplemente se forman aplicando un voltaje a través

de una pieza de germanio. La profundidad sensible del detector depende de la concentración de impurezas y el voltaje aplicado.

Los detectores Ge se almacenan a temperatura ambiente y se enfría a una temperatura de nitrógeno líquido (77 K) solo cuando se usan. El enfriamiento del detector, cuando está en uso, es necesario porque el germanio tiene una brecha de energía relativamente estrecha, y a temperatura ambiente o superior una corriente de fuga debida a portadores de carga generados térmicamente induce tal ruido que la resolución de energía del dispositivo se destruye. Los detectores de germanio se fabrican en muchas geometrías diferentes, ofreciendo así dispositivos que se pueden adaptar a las necesidades específicas de la medición (21).

## **2.16. Respuesta del detector**

Los principales aspectos de la respuesta del detector son la eficiencia del detector, la sensibilidad direccional, la resolución de energía y el tiempo muerto.

Los detectores semiconductores de germanio utilizan los portadores electrónicos (pares de electrones y huecos de electrones) creados por la absorción de fotones de rayos gamma en el detector de germanio. Estos se acumulan directamente en los electrodos del detector, causando un flujo de corriente eléctrica a través del semiconductor y producen un pulso de voltaje de salida de amplitud proporcional a la energía del fotón de rayos gamma incidente. El detector consiste en un cristal de germanio montado en un criostato de vacío enfriado a  $-196^{\circ}\text{C}$ . El enfriamiento se realiza mediante la inserción del criostato en un recipiente dewar llenado con nitrógeno líquido o mediante refrigeradores criogénicos alimentados eléctricamente. Los detectores generalmente son de pequeño volumen y se utilizan en espectrometría de rayos gamma *In Situ*. La resolución de energía de estos detectores es muy alta, pero debido a su pequeño volumen, su sensibilidad es baja y puede tomar decenas de minutos grabar un espectro.

Independientemente del tipo de detector, los instrumentos radiométricos utilizados para la detección de rayos gamma difieren en su respuesta a la radiación gamma y en su capacidad

para distinguir los rayos gamma de diferentes energías. Los medidores de la tasa de conteo producen un voltaje o corriente eléctrica en la salida que es proporcional a la tasa de conteo. El voltaje o corriente generalmente se muestra en un medidor. El contador de pulsos da la cantidad de partículas detectadas y el tiempo de medición.

Los espectrómetros de rayos gamma utilizan la proporcionalidad directa entre la energía de un rayo gamma entrante y la amplitud del pulso a la salida del detector. Después de la amplificación y la digitalización, se analizan las amplitudes de pulso, y la salida del espectrómetro es un espectro de energía de radiación detectada. Como los radionúclidos individuales emiten energías específicas de rayos gamma, los espectros de rayos gamma se pueden usar para diagnosticar la fuente de la radiación (20).

## **2.17. Espectrometría gamma**

Cada fotón de rayos gamma tiene una energía discreta y esta energía es característica del radionúclido que emite el fotón. Esto forma la base de la espectrometría de rayos gamma: al medir las energías de los fotones de rayos gamma, podemos determinar la fuente de la radiación.

El método es inusual ya que requiere que se consideren varios factores: La intensidad de la fuente y la geometría del detector de fuente afectan las velocidades de fluencia del rayo gamma observadas. Los efectos ambientales y de otro tipo, como la humedad del suelo, la lluvia, la vegetación, la sobrecarga no radioactiva y la distribución de las fuentes de radiación en el aire, afectan todas las velocidades de fluencia medidas.

Se ha comprobado que el sistema de espectrometría gamma es una herramienta eficiente tanto para las mediciones de campo y las de laboratorio, estableciendo los procedimientos de calibración y operación del sistema para cada técnica (20).

### **2.17.1. Espectrometría de rayos gamma en Laboratorio**

En el análisis de laboratorio se usa un blindaje de plomo para proteger un detector de la radiación de fondo. Un analizador multicanal se utiliza para detectar, analizar y visualizar los rayos gamma emitidos por las muestras (de suelo o rocas). El análisis cuantitativo es esencialmente comparativo: la radiación de una muestra se compara con la radiación de estándares conocidos. La exactitud y precisión de los resultados depende de muchos factores: el tamaño, la resolución de energía del detector, la masa, la geometría de la muestra; el blindaje del fondo de laboratorio; contar el tiempo; procedimientos de procesamiento de datos y la calidad de los estándares radiactivos.

Los espectrómetros de laboratorio se pueden usar para la identificación de contaminación isotópica ambiental, la identificación de fuentes desconocidas de radiación gamma y estudios detallados de equilibrio radioactivo y la distribución de radionúclidos en muestras de suelo y roca.

Los espectrómetros de rayos gamma de laboratorio de semiconductores tienen la capacidad de identificar isótopos desconocidos en diversos materiales y muestras de rocas. La interpretación cualitativa de los espectros de rayos gamma con buena resolución de energía es mediante la comparación de los fotopicos observados con una biblioteca de energías de fuentes emisoras de rayos gamma conocidas. El área del pico neto está relacionada con la actividad o concentración del elemento (20).

Se ha comprobado que el sistema de espectrometría gamma es una herramienta eficiente tanto para las mediciones de campo y las de laboratorio, estableciendo los procedimientos de calibración y operación del sistema para cada técnica (20).

### **2.17.2. Espectrometría gamma *In Situ***

La espectrometría gamma es una técnica no destructiva y representa una poderosa herramienta para determinar las concentraciones de actividad de uno o más radionúclidos en el suelo. A pesar de que esta técnica consume menos tiempo y recursos que la espectrometría gamma convencional, tiene el inconveniente de que hay que asumir una serie de aproximaciones geométricas para modelar las características de la muestra. Entre ellas, se

debe suponer que la muestra es una superficie plana (sin obstáculos, en la que la distribución horizontal de los radionúclidos es prácticamente uniforme) (17).

Las calibraciones habituales de los espectrómetros gamma de campo suponen que el suelo es un medio semi infinito con propiedades físicas y químicas que presuponen variaciones verticales homogéneas, descuidando la distribución de las propiedades del suelo y la concentración de radionúclidos (18).

### **3. Materiales y Métodos**

#### **3.1 Sitios de medición.**

##### **3.1.1 Generalidades del Estado de Zacatecas.**

El estado de Zacatecas se localiza en la región centro-norte de la República Mexicana y representa el 3.8 % de la superficie del país. Las coordenadas geográficas extremas son: Al Norte  $25^{\circ}07'31''$ , al Sur  $21^{\circ}02'31''$ ; al Este  $100^{\circ}44'32''$ , al Oeste  $104^{\circ}21'13''$ .

El estado está integrado por 56 municipios. Los estados con los que colinda: al norte con Durango y Coahuila de Zaragoza; al este con Coahuila de Zaragoza, Nuevo León y San Luis Potosí; al sur con Guanajuato, Jalisco y Aguascalientes; al oeste con Jalisco, Nayarit y Durango (27), Figura 3.



*Figura 8. Estado de Zacatecas y su división municipal.*

En términos generales, el clima en el estado de Zacatecas es seco, con una temperatura media anual de 16°C (las variaciones extremas son: la máxima 35°C y la mínima 6°C) y una precipitación pluvial media de 510 mm (las variaciones son: la máxima 910 mm y la mínima 324 mm) En la Tabla 1 se muestra precipitación anual promedio a lo largo del territorio. Los climas semisecos se concentran en una región que abarca todo el centro y este de la entidad. Mientras tanto, en menor grado se distribuyen los climas templados, en la parte occidental, diseminados en las áreas altas de la sierra. Los climas semicálidos se restringen a pequeños fragmentos muy locales, en el extremo sur y suroeste, y no son dignos de considerarse por su reducida extensión (ver Figura 4). Aunque predomine en casi toda la entidad el clima seco, y éste represente una limitante para la agricultura, se desarrollan actividades agrícolas y frutícolas en las zonas de Rio Grande y Fresnillo, Cañón de Villanueva y en la de Tabasco, Huanusco y Jalpa. Dichas actividades se encuentran beneficiados por los ríos Aguanaval,

Juchipila y Lazos. Existe otra zona agrícola de importancia en la región de Tepechitlán, Momax y Tlaltenango, en donde rigen climas templados y semicálidos (28).

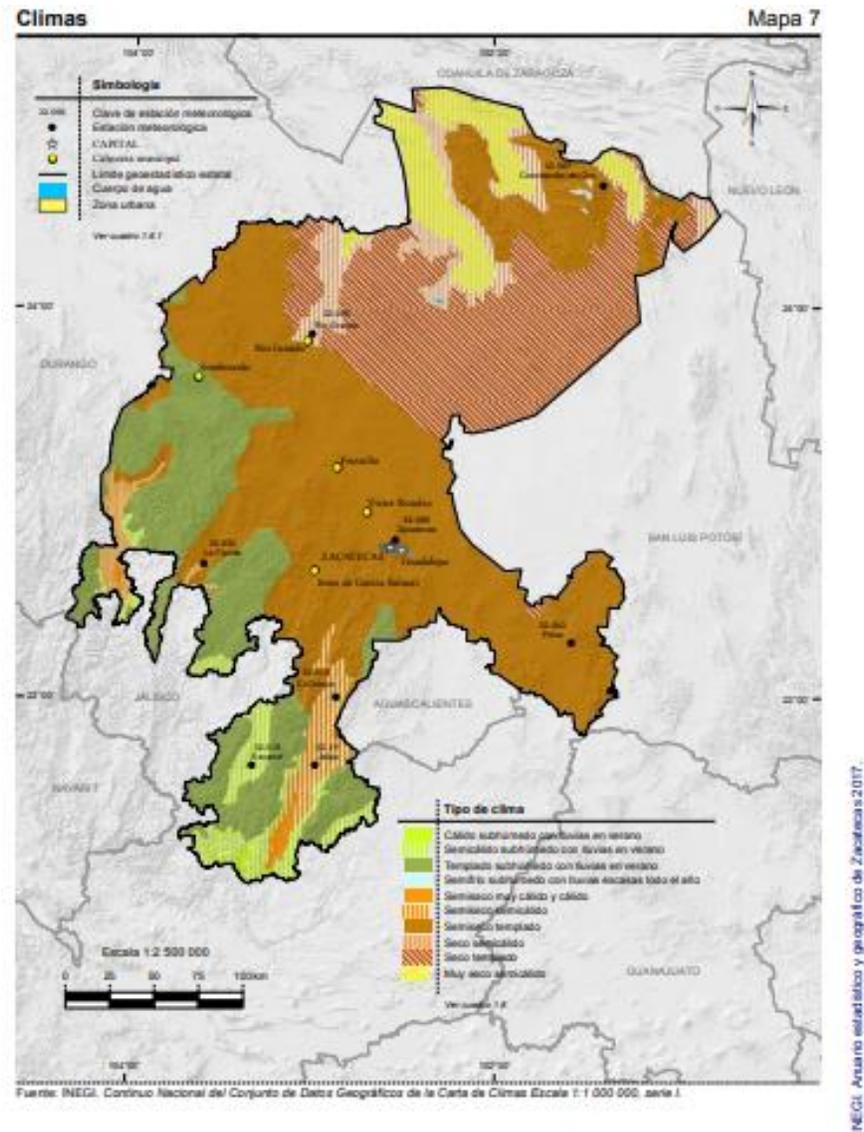


Figura 9. Clima que comprende el estado de Zacatecas.

### 3.1.2 Descripción de los sitios de medición

Los sitios a los que corresponden las mediciones *In Situ* y la toma de las muestras para las mediciones en el *Laboratorio* se eligieron de la siguiente manera: Se eligieron cuatro

localidades rurales del estado de zacatecas, en cada una de las localidades se hicieron dos mediciones *In Situ* en 2 sitios diferentes y en cada sitio se tomaron las muestras necesarias para la medición en *Laboratorio*.

*Tabla 1. Precipitación anual a lo largo del territorio (milímetros).\**

<b>Estación</b>	<b>Periodo</b>	<b>Precipitación promedio</b>	<b>Precipitación del año más seco</b>	<b>Precipitación del año más lluvioso</b>
Excamé	De 1946 a 2016	737.8	346.9	1073.3
El Chique	De 1951 a 2016	555.8	286.3	989.3
Jalpa	De 1978 a 2016	660.6	324.8	895.2
Concepción del Oro	De 1960 a 2016	429.7	95.7	990.3
Zacatecas	De 1953 a 2016	479.7	169.3	1019.0
Pinos	De 1947 a 2016	451.8	170.5	772.4
La Florida	De 1954 a 2016	592.2	278.0	919.2
Río Grande	De 1974 a 2016	399.4	206.7	624.0

\*Comisión Nacional del Agua. Registro Mensual de Precipitación Pluvial en mm. Inédito.

Es muy importante hacer mención sobre las propiedades o características que tienen el suelo y las rocas, esto con el fin de asociar la distribución vertical de  $^{137}\text{Cs}$  con el tipo de suelo y rocas. En la Tabla 2 se muestran las coordenadas de los sitios de medición, también se hace mención de la litología que corresponde a cada sitio.

Los materiales que constituyen la corteza terrestre se agrupan en 3 divisiones: suelos, fragmentos de roca y rocas. A continuación, se describen las principales características de cada tipo de suelo y roca según corresponda.

### 3.1.2.1. Riolita:

Es una roca volcánica félsica (>65% de sílice), el color de la riolita varía ampliamente, pero en general es blanco, amarillo claro, gris o rojo, es decir, es rica en minerales claros (cuarzo y feldespatos) y pobre en minerales oscuros (ferromagnesianos), composición que justifica su coloración (29). Compuesta principalmente de feldespato potásico, plagioclasa rica en sodio y cuarzo, con una textura de grano fino (30). La mayor parte de las riolitas tienen una estructura bandeada, es decir, muestran una serie de capas alineadas, que se formaron cuando el magma fluía pastoso antes de solidificarse.

*Tabla 2. Localización y tipo de suelo de cada sitio.*

Puntos de Medición	Sitio	Ubicación			Litología <sup>(31)</sup>
		Latitud	Longitud	Altura	
Santiago el Chique (Tabasco, Zac.)	Sitio 1	22°59'25.17"	-102°54'7.1"	1504	Riolita-Ignimbrita.
Santiago el Chique (Tabasco, Zac.)	Sitio 2	21°35'30.45"	-102°32'58.9"	1504	Toba riolítica
Loreto	Sitio 1	22°16'14.37"	-101°55'17.7"	2159	Riolita
Loreto	Sitio 2	22°16'8.75"	-101°56'17.3"	2122	Riolita
El Obraje (Pinos)	Sitio 1	22°10'57.09"	-101°36'24.3"	2470	Arena-Limo
El Obraje (Pinos)	Sitio 2	22°10'29.38"	-101°38'6.75"	2470	Arena-Limo
Rancho Grande. El Hancón (Fresnillo)	Sitio 1	23°28'9.87"	-102°57'55.0"	2010	Aluvion
Rancho Grande. El Hancón (Fresnillo)	Sitio 2	23°28'30.22"	-102°57'52.6"	2010	Arenisca Conglomerado Polimictico.

La máxima manifestación de las riolitas y sus tobas se hallan en las cumbres de la Sierra Madre Occidental, que comprende zonas de los estados de Nayarit, Zacatecas, Sinaloa, Durango y Chihuahua. (32)

#### **3.1.2.2. Ignimbrita:**

Es una toba endurecida que consiste en fragmentos de roca y cristal en una matriz de fragmentos de vidrio que generalmente se sueldan entre sí. En algunos casos, la soldadura es tan extrema que se pierde la textura original mostrada por los fragmentos de vidrio. La composición es generalmente ácida a intermedia (33).

#### **3.1.2.3. Aluviones:**

Cuando el lecho de un torrente se seca, se da el nombre de aluvión al cascajo, arena o lodo que queda depositado en el terreno (34).

#### **3.1.2.4. Arenisca:**

La arenisca es una roca detrítica formada por la compactación y cementación de la arena (35). Comprende granos de tamaño entre  $63\ \mu\text{m}$  y  $1.000\ \mu\text{m}$  unidos por una matriz fangosa y un cemento mineral formados durante la diagénesis por enterramiento. Los constituyentes principales son el cuarzo, feldespato, mica y fragmentos de rocas, las proporciones de éstos pueden variar ampliamente (36).

#### **3.1.2.5. Arena-Limo:**

Arena: Es un tipo de sedimento producido por la descomposición de varios tipos de rocas, varía en tamaño (partículas de un diámetro comprendido entre 4.76 mm y 0.074 mm) (32), color y composición. La composición de la arena depende en gran medida del material de origen (37).

Limo: El limo es más fino que la arena (0.06 y 0.002 mm) (30), tiene apariencia al talco (38). Un limo inorgánico sólo posee muy ligera resistencia, pero puede distinguirse por el tacto al pulverizar el espécimen seco. La arena fina se siente granular, mientras que el limo típico da la sensación suave de la harina (32).

#### **3.1.2.6. Conglomerado:**

El conglomerado es una roca formada por fragmentos de rocas diversas, granos minerales y grava unidos por un cemento (35). La grava es un depósito sin consolidar, compuesto principalmente de fragmentos arrastrados por los ríos. Estos fragmentos pueden ser de cualquier clase de roca o de mineral y de cualquier tamaño. La mayor parte de los conglomerados, especialmente los que han sido depositados por los ríos tienen mucha arena y otros materiales finos que llenan los espacios entre las gravas (32).

### **3.2 Mediciones *In Situ* y Laboratorio.**

#### **3.2.1. Sistema de detección**

Para las mediciones tanto *In Situ* como de *Laboratorio* se utilizó el sistema de Espectrometría Gamma (GeRe3522) que se encuentra en la Unidad Académica de Estudios Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas.

El sistema de detección utilizado para las mediciones realizadas *In Situ* se muestra en la Figura 10. Las líneas rojas indican el flujo de energía que alimenta el equipo, comienzan en las baterías, siguen al inversor, y este alimenta el equipo de cómputo y el gabinete NIM-BIN,

este último energiza el detector. Las líneas azules indican el viaje que realiza la señal, inicia cuando un fotón gamma incide en el detector, creando un pulso eléctrico, el cual se amplifica en el preamplificador, para que no se pierda, después va al amplificador, es transformada en el convertidor analógico-digital y después es analizada en el multicanal, para ser procesado y analizado por el software Genie-2000, versión 3.4.

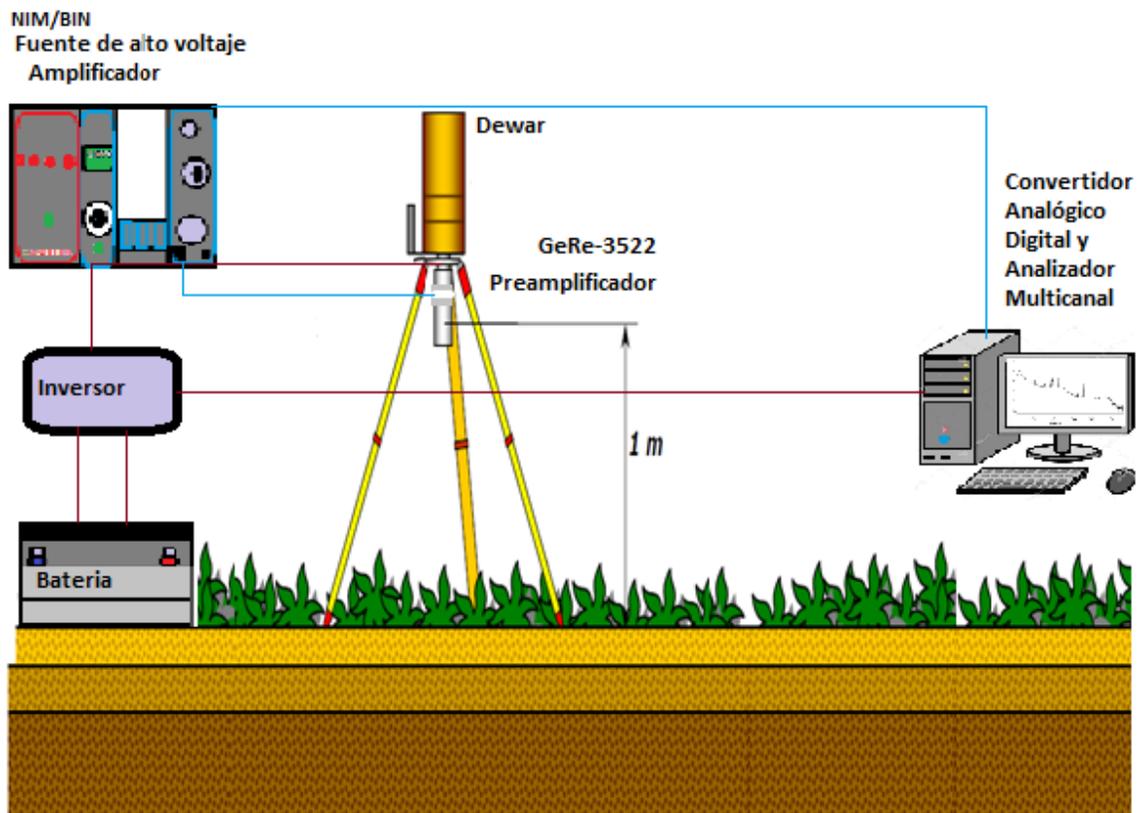


Figura 10. Diagrama del sistema de detección utilizado In Situ.

### 3.2.2. Desarrollo experimental

Para las mediciones *In Situ* el sistema de espectrometría se utilizó con las especificaciones indicadas en el trabajo realizado por Margarita Rivera Belmontes 2011 (3) y sigue la metodología que propone el reporte ICRU 53 (39).

En cada uno de los sitios ya mencionados se hizo una medición por espectrometría gamma *In Situ* (excepto en Loreto, en este lugar no fue posible realizar la medición del segundo sitio) y se recogieron muestras de perfil vertical de cada suelo para medir por espectrometría gamma en *Laboratorio*.

Para realizar las mediciones *In Situ* el detector fue montado en un tripie en posición vertical (ver Figura 11), asegurando un metro de distancia desde el suelo hasta el detector, de tal manera que el cristal de germanio se orienta verticalmente hacia abajo y las conexiones del equipo se hicieron como se muestra en las Figuras 10 y 12.



*Figura 11. Acomodo del detector para las mediciones In Situ.*



*Figura 12. Arreglo experimental.*

El sistema fue alimentado por dos baterías: una batería de gel y una líquida, el voltaje de salida fue de  $\approx 120$  Volts, el tiempo de medición para cada sitio fue 7200 segundos, de tal manera que el error del pico de potasio sea menor al 2%.

Después de realizar las mediciones *In Situ*, el detector se llevó al *Laboratorio* de la UAEN de la Universidad Autónoma de Zacatecas para continuar con las mediciones de las muestras recolectadas. Para este motivo el arreglo experimental cambia ligeramente, se adiciona un blindaje de plomo y el detector se coloca de forma vertical con el cristal de Germanio hacia arriba de manera que este quede dentro del blindaje. Se conecta el detector al NIM-BIN y este al equipo de cómputo utilizando (Ver Figura 13). Para mediciones en *Laboratorio* el equipo se calibra en eficiencia y energía utilizando las líneas existentes del estándar multinúcleo y una fuente puntual de Europio. Las líneas existentes del multinúcleo son  $^{241}\text{Am}$  (59.5 keV),  $^{137}\text{Cs}$  (661.66 keV) y  $^{60}\text{Co}$  (1173.24 y 1332.51 keV). El procedimiento de medición se llevó a cabo después de darle un tratamiento previo a las muestras de suelo. El conteo para cada muestra fue de 40000 segundos.



*Figura 13. Arreglo experimental del equipo de espectrometría gamma en el Laboratorio de la UAEN.*

### **3.2.3. Recolección y preparación de muestras**

El muestreo fue realizado durante el tiempo de adquisición del espectro de rayos gamma *In Situ*. En cada sitio se recolecto un perfil de suelo de 25 cm de profundidad a aproximadamente 10 m de distancia de donde se realizó cada medición *In Situ* y cada perfil se dividió en 5 submuestras (0-5 cm; 5-10 cm; 10-15 cm; 15-20 cm; 20-25 cm) (17, 18).

Las excavaciones se realizaron con el uso de una barra de acero, un zapapico, flexómetro y pala, cada estrato fue colocado en una bolsa de polietileno con cierre hermético para evitar la contaminación entre muestras (Figura 14).



*Figura 14. Toma de muestra.*

Las muestras fueron llevadas al *Laboratorio* de Radioquímica de la Unidad de Académica de Estudios Nucleares de la UAZ y se colocaron en charolas de aluminio, que luego fueron cubiertas con plástico film con pequeños orificios para eliminar el exceso de humedad, después se tamizaron a un tamaño de grano de  $25.4 \mu m$ , se pesaron las muestras ( $\approx 500$  gr) y colocaron en charolas limpias de aluminio para someterlas a un segundo secado pero esta vez en estufa, durante 2 horas a  $90^{\circ}C$ . Las muestras secas se pesaron nuevamente y se colocaron en su correspondiente marinelli (limpio, seco y con una etiqueta indicando el lugar donde fue extraída dicha muestra, la profundidad a la que corresponde, fecha y peso de la muestra). En la Figura 8 se ilustra el tratamiento dado a las muestras previo a la medición y la Tabla 3 muestran los valores de los pesos de las muestras.



*Figura 15. Tratamiento dado a las muestras previo a la medición (Eliminación del exceso de humedad, tamizado, secado en estufa, envasado y sellado).*

### **3.3. Adquisición de espectros**

Se utiliza el software Genie 2000 (versión 3.4) para realizar la adquisición de los espectros. Genie 2000 es un conjunto de habilidades para adquirir y analizar espectros de analizadores multicanal (MCA). Sus funciones incluyen control MCA, visualización espectral y manipulación, análisis de espectro básico y generación de informes. El trabajo de Fernando de la Torre Aguilar (2010) muestra un análisis óptimo para espectros de radiación gamma (40).

## **4. Resultados y discusión**

Las Figuras 16, 17 y 18 muestran los espectros de rayos gamma obtenidos de las mediciones *In Situ* en Loreto sitio 1, el Obraje sitio 2 y el Hancón sitio 2 respectivamente. Los fotopicos marcados corresponden a las líneas de las series radiactivas presentes en los sitios de medición. De los siete sitios donde se hicieron mediciones *In Situ* sólo en tres de esos sitios se encontró  $^{137}\text{Cs}$ .

*Tabla 3. Peso neto de las muestras.*

Sitio	Muestra	Peso de la muestra (gr)	Sitio	Muestra	Peso de la muestra (gr)
El Chique 1	1-1-1-1	463.7	Loreto 1	2-1-1-1	443.6
	1-1-1-2	431.7		2-1-1-2	435.9
	1-1-1-3	469.4		2-1-1-3	466.4
	1-1-1-4	429.5		2-1-1-4	560.7
	1-1-1-5	517.1		2-1-1-5	510.5
El Chique 2	1-2-1-1	412.8	Loreto 2	2-2-1-1	438.4
	1-2-1-2	389.5		2-2-1-2	441.2
	1-2-1-3	361.8		2-2-1-3	443
	1-2-1-4	360.9		2-2-1-4	421
	1-2-1-5	337.7		2-2-1-5	445.3
El Obraje 1	3-1-1-1	510.4	El Obraje 2	3-2-1-1	514
	3-1-1-2	507.9		3-2-1-2	490.7
	3-1-1-3	507.2		3-2-1-3	515.5
	3-1-1-4	501.8		3-2-1-4	512.9
	3-1-1-5	509.5		3-2-1-5	511.2
El Hancón 1	4-1-1-1	516.6	El Hancón 2	4-2-1-1	516.8
	4-1-1-2	511.4		4-2-1-2	512.8
	4-1-1-3	516.6		4-2-1-3	516.1
	4-1-1-4	513		4-2-1-4	517.2
	4-1-1-5	514.7		4-2-1-5	515.6

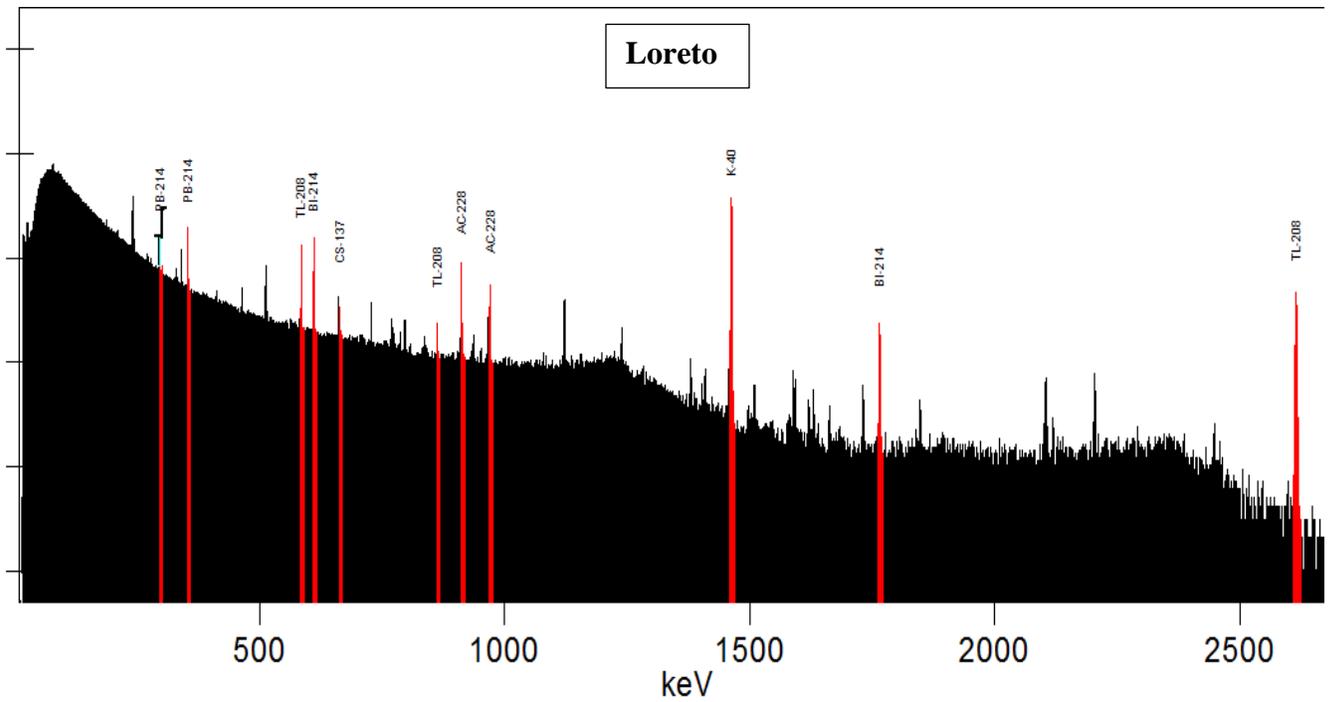


Figura 16. Espectro de rayos gamma correspondiente a medición In Situ en Loreto muestra la presencia de  $^{137}\text{Cs}$ .

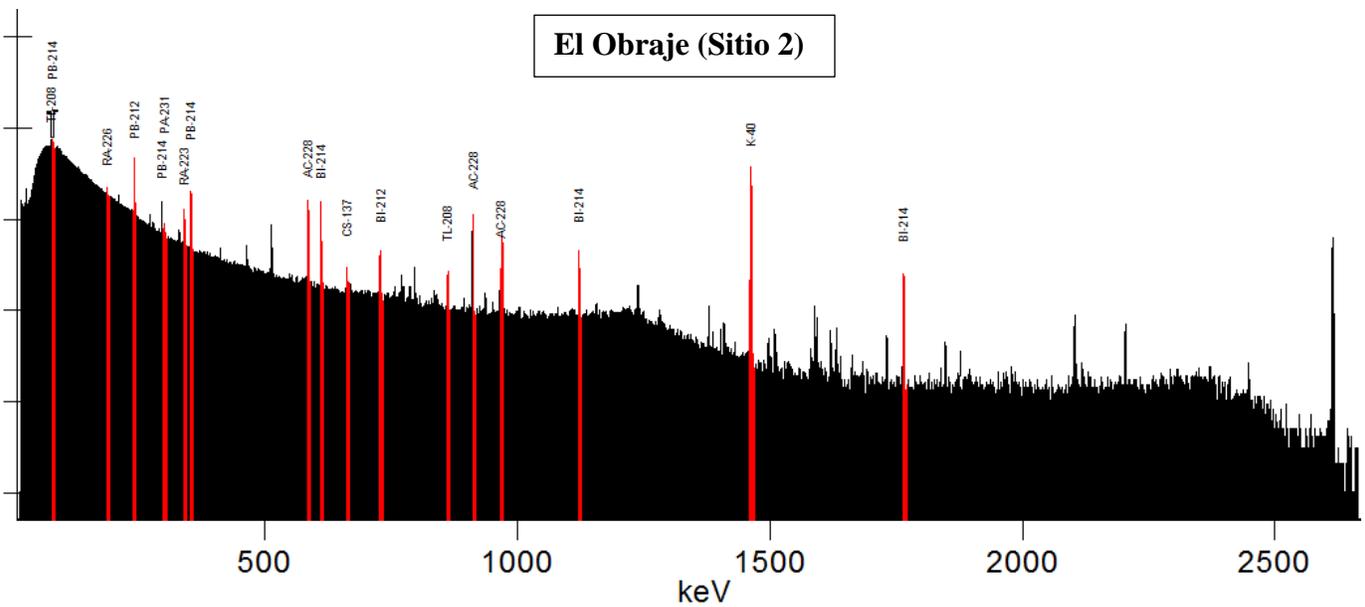


Figura 17. Espectro de rayos gamma correspondiente a mediciones In Situ en el Obraje (segundo sitio) muestra la presencia de  $^{137}\text{Cs}$ .

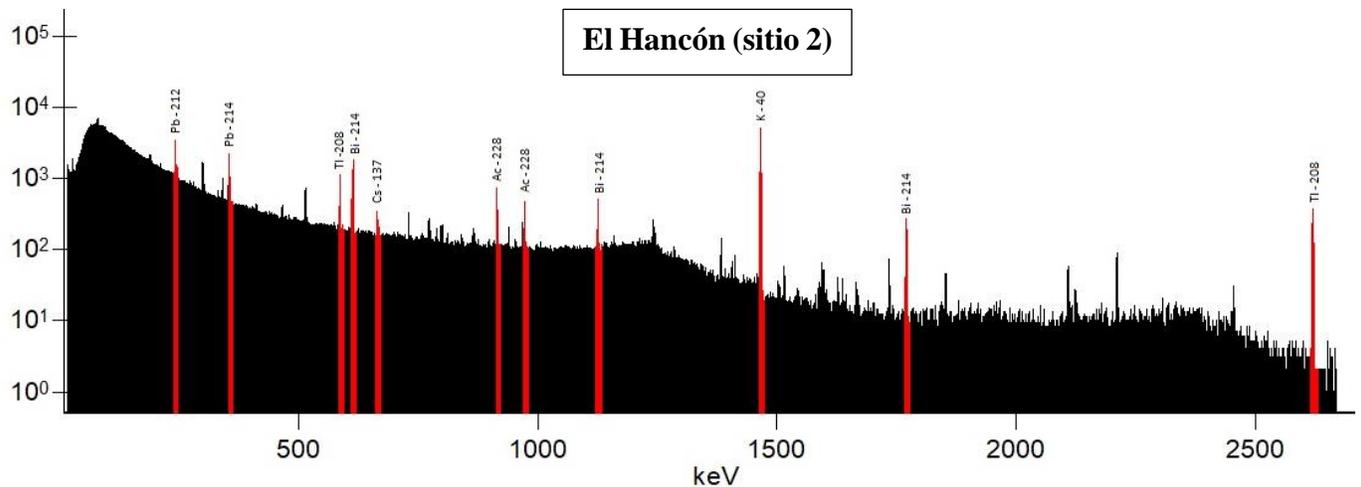


Figura 18. Espectro de rayos gamma correspondiente a medición *In Situ* en El Hancón (segundo sitio) muestra la presencia de  $^{137}\text{Cs}$ .

La actividad mínima detectable para mediciones *In Situ* resulto de 1.02 Bq/kg equivalente. Las actividades de  $^{137}\text{Cs}$  para cada sitio variaron de la siguiente manera, ver Tabla 4.

Tabla 4. Actividad en Bq/kg del  $^{137}\text{Cs}$ .

Sitio de medición	Actividad superficial (Bq/m <sup>2</sup> )	Actividad específica (Bq/kg)	Error (%)
Loreto 1	2.318	2.047	3.6
El Obraje 2	1.523	1.345	3.76
El Hancón 2	1.944	1.718	3.58

Los espectros de rayos gamma de las mediciones en el *Laboratorio* indican la presencia de  $^{137}\text{Cs}$  en 7 de los 8 sitios muestreados, su distribución a lo largo del perfil se da de la siguiente manera (Tabla 5).

Las actividades marcadas con rojo no son tomadas en cuenta debido a que el error reportado es mayor a 10%.

Tabla 5. Actividad específica en Bq/kg del radionúclido  $^{137}\text{Cs}$  para cada muestra en los diferentes sitios de medición.

Muestra (El Chique)	Profundidad (cm)	Cuentas fotopico	Actividad Bq/kg	Error (%)
1-1-1-1	0-5	702	1.53	7.89
1-1-1-2	5-10	920	2.16	6.58
1-1-1-3	10-15	1059	2.28	6.11
1-1-1-4	15-20	960	2.26	7.03
1-1-1-5	20-25	711	1.39	8.76

Muestra (El Chique)	Profundidad (cm)	Cuentas fotopico	Actividad Bq/kg	Error (%)
1-2-1-1	0-5	1337	3.21	5.71
1-2-1-2	5-10	1124	2.92	5.91
1-2-1-3	10-15	1034	2.89	7.12
1-2-1-4	15-20	883	2.48	7.73
1-2-1-5	20-25	838	2.51	7.46

Muestra (Loreto)	Profundidad (cm)	Cuentas fotopico	Actividad Bq/kg	Error (%)
2-1-1-1	0-5	1910	4.36	4.06
2-1-1-2	5-10	591	1.37	9.37
2-1-1-3	10-15	227	0.49	19.15
2-1-1-4	15-20	352	0.64	12.59
2-1-1-5	20-25	0	0	0

Muestra (Loreto)	Profundidad (cm)	Cuentas fotopico	Actividad Bq/kg	Error (%)
2-2-1-1	0-5	1877	4.33	4.14
2-2-1-2	5-10	1086	2.49	5.84
2-2-1-3	10-15	556	1.27	9.85
2-2-1-4	15-20	0	0	0
2-2-1-5	20-25	0	0	0

Muestra (El Obraje)	Profundidad (cm)	Cuentas fótópico	Actividad Bq/kg	Error (%)
3-1-1-1	0-5	2597	5.15	2.98
3-1-1-2	5-10	575	1.15	9.45
3-1-1-3	10-15	0	0	0
3-1-1-4	15-20	0	0	0
3-1-1-5	20-25	0	0	0

Muestra (El Obraje)	Profundidad (cm)	Cuentas fótópico	Actividad Bq/kg	Error (%)
3-2-1-1	0-5	925	1.82	6.61
3-2-1-2	5-10	0	0	0
3-2-1-3	10-15	0	0	0
3-2-1-4	15-20	0	0	0
3-2-1-5	20-25	0	0	0

Muestra (El Hancón)	Profundidad (cm)	Cuentas fótópico	Actividad Bq/kg	Error (%)
4-1-1-1	0-5	0	0	0
4-1-1-2	5-10	377	0.75	11.58
4-1-1-3	10-15	485	0.95	11.24
4-1-1-4	15-20	0	0	0
4-1-1-5	20-25	0	0	0

Muestra (El Hancón)	Profundidad (cm)	Cuentas fótópico	Actividad Bq/kg	Error (%)
4-2-1-1	0-5	818	1.60	7.56
4-2-1-2	5-10	0	0	0
4-2-1-3	10-15	0	0	0
4-2-1-4	15-20	0	0	0
4-2-1-5	20-25	0	0	0

La Figura 19 muestra la distribución vertical de cada perfil de suelo.

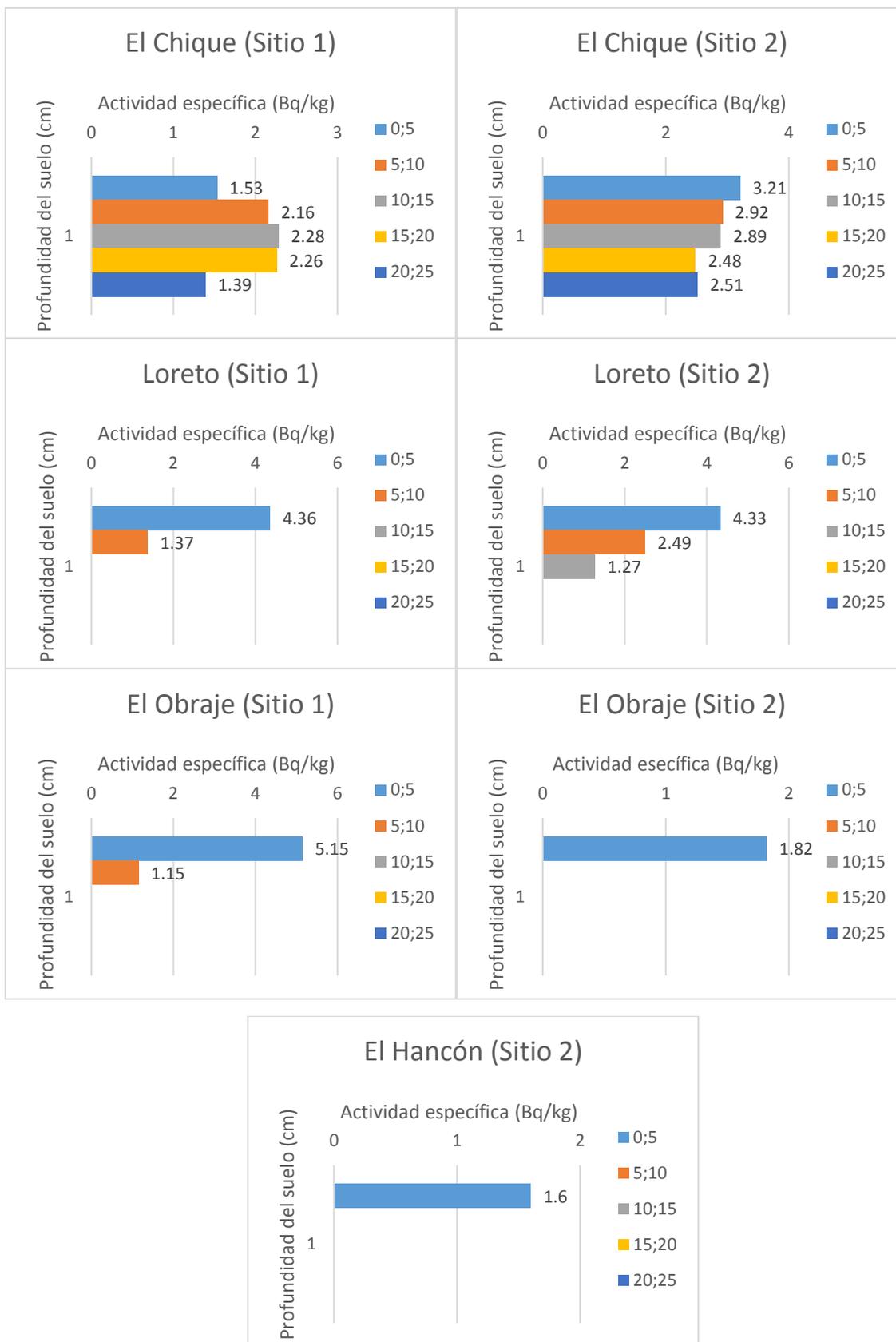


Figura 19. Distribución de  $^{137}\text{Cs}$  en los perfiles de suelo.

No existe una correlación entre la altura sobre el nivel del mar y la actividad del  $^{137}\text{Cs}$ , según se muestra en la Figura 20.

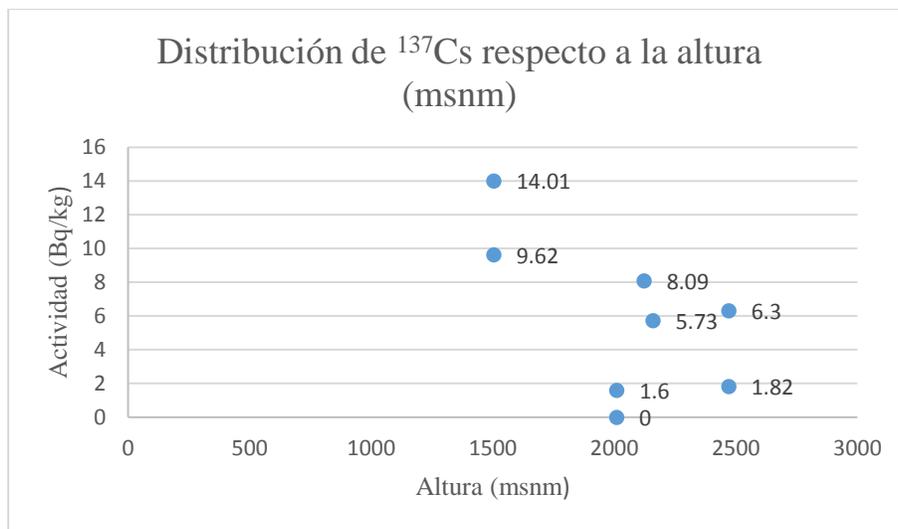


Figura 20. Actividad vs Altura (msnm)

## 5. Conclusiones

- La AMD para el  $^{137}\text{Cs}$  en mediciones *In Situ* es de 1.02 Bq/kg, mientras que para el Laboratorio es de 0.459 Bq/kg.
- De acuerdo a las mediciones *In Situ*, los sitios Loreto, El Obraje (sitio 2) y El Hancón (sitio 2) mostraron la presencia de  $^{137}\text{Cs}$  por arriba de la actividad mínima detectable (AMD)
- Las mediciones de *Laboratorio* mostraron la presencia de  $^{137}\text{Cs}$  por encima de la AMD en todos los sitios.
- Las mediciones de *Laboratorio* proporcionaron perfiles no uniformes. La mayor abundancia corresponde a los primeros estratos y se comportan de acuerdo a lo reportado en la literatura.
- La no existencia de  $^{137}\text{Cs}$  a profundidades mayores de 15 cm implica que no hay migración y su baja concentración impide utilizarlo para estudios de erosión.
- No hay correlación entre la actividad de  $^{137}\text{Cs}$  y la altura de los sitios medidos.
- Debido a la baja actividad de  $^{137}\text{Cs}$  no fue posible hacer una correlación entre las actividades medidas *In Situ* y las obtenidas en *Laboratorio*.

## Bibliografía

1. Jerry C. Ritchie., & J. Roger McHenry. *Application of Radioactive Fallout Cesium-137 for Measuring Soil Erosion and Sediment Accumulation Rates and Patterns: A Review* (1990). Published in *J. Environ. Qual.* 19:215-233.
2. D.E. Walling, & T.A. Quine. *The use of caesium-137 measurements in soil erosion surveys* (1992). IAHS Publ. no. 210. Department of Geography, University of Exeter, Exeter, UK.
3. Belmontes, R. M. (2011). *MAPEO IN SITU DE EMISORES GAMMA EN EL ESTADO DE ZACATECAS (FASE 1)* (Tesis de Maestria). UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS, Zacatecas.
4. Ríos Martínez, C., Mireles García, F., Saucedo Anaya, S., Dávila Rangel, I., Pinedo Vega, J.L., & Hernández R, D. *Mapeo Preliminar In Situ de Emisores Gamma en el Estado de Zacatecas*(2011).
5. Pittauerová, D., Kolb, William M., Rosenstiel, Jon C., Fischer, Helmut W. *Radioactivity in Trinitite-a review and new measurements* (2010). Proceedings of Third European IRPA Congress 2010 June 14–16, Helsinki, Finland. Recuperado de [http://www.harmjschoonhoven.com/Trinity/Pittauerova\\_P16\\_31.pdf](http://www.harmjschoonhoven.com/Trinity/Pittauerova_P16_31.pdf)
6. Walker, J.S. *Three Mile Island: A Nuclear Crisis in Historical Perspective*. University of California Press (2006). Berkeley/ Los Angeles/ London. Pp. 314.
7. Povinec, P., Hirose, K., & Aoyama, M. *Fukushima Accident: Radioactivity Impact on the Environment*. Elsevier Science (2013). Pp. 400. Recuperado de [https://books.google.com.mx/books?id=GW6i6pbzKgwC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=GW6i6pbzKgwC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
8. Kurnaz, A., Kucukomeroglu, B., Damla, N., & Cevik, U. *Radiological maps for Trabzon, Turkey*. *Journal of Environmental Radioactivity*. Elsevier. 393-399.

9. Nuccetelli, C. *In situ gamma spectroscopy in environmental research and monitoring*. Applied Radiation and Isotopes. Published by Elsevier. Volumen 66, Issue 11 (2008). Pp. 1615-18.
10. Delaware health and social services. *RADIATION FROM CESIUM-137 (Cs-137)*. (2008). Recuperado de <https://dhss.delaware.gov/dph/files/radces137med.pdf>
11. Sibello Hernández, R.Y. *Cuantificación de la erosión de los suelos en zonas de interés económico y ambiental de la provincia de Cienfuegos, Cuba, utilizando el Cesio-137 como radiotrazador*. (Tesis Doctoral). Cienfuegos: Universidad de Alicante (2013). Pp. 194.
12. Theodore L. Brown., H. Eugene LeMay, Jr., Bruce E. Bursten., & Julia R. Burdge. *QUÍMICA LA CIENCIA CENTRAL*. Novena edición. Pearson Educación, México (2004).
13. Karl Heinrich Lieser. *Nuclear and Radiochemistry Fundamentals and Applications*. WILEY-VCH. Second, Revised Edition (2001). Pp. 462.
14. Lothar Mueller., Askhad K. Sheudshen., & Frank Eulenstein. *Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia*. Springer International Publishing (2015).
15. UNSCEAR. *SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION*. New York (1988): United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, with annexes. UNITED NATIONS PUBLICATION.
16. Jim T. Smith., & Nicholas A. Beresford. *Chernobyl: Catastrophe and Consequences*. Springer- Verlag Berlin Heidelberg (2005).
17. Baeza, A. Corbacho, J.A. (2010) *In situ determination of low-level concentrations of <sup>137</sup>Cs in soils*. Applied Radiation and Isotopes 68 (4) 812-815. Spain, Elsevier.
18. Perrin, J., Carrier, F., Guillot, L. *Determination of the vertical distribution of radioelements (K, U, Th, Cs) in soils from portable HP-Ge spectrometer*

- measurements: A tool for soil erosion studies*. Applied Radiation and Isotopes. Elsevier (2006) Pp. 830-843.
19. Evans, R., Collins, A.L., Zhang, Y., Foster, I.D.L., Boardman, J., Sint, H., & Lee, M.R.F. *A comparison of conventional and <sup>137</sup>Cs-based estimates of soil erosion rates on arable and grassland across lowland England and Wales*. Published by Elsevier Earth-Science Reviews (2017). Pp. 49-64.
  20. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA- TECDOC- 1363). (2003). *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. Pp. 173. Vienna Austria.
  21. Tsoulfanidis N. *MEASUREMENT AND DETECTION OF RADIATION*. Second Edition (1995). Taylor & Francis. Printed in the United States of America. Pp. 614.
  22. James E. Turner. *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. Third, Completely Revised and Enlarged Edition. WILEY-VCH (2007).
  23. Herman Cember., & Thomas E. Johnson. *Introduction to Health Physics*, Fourth Edition, McGraw-Hill Education (2009).
  24. Harry J. Lipkin. *Beta Decay for Pedestrians*. This Dover edition, first published in 2004. New York.
  25. Adams, J.A.S., & Gasparini, P. (1970). *Gamma – Ray Spectrometry of Rocks*. AMSTERDAM/ LONDON/ NEW YORK. ELSEVIER PUBLISHING COMPANY.  
Recuperado de [https://books.google.com.mx/books?id=vxXgBAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=vxXgBAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
  26. Gilmore, G. *Practical Gamma-ray Spectrometry*. WILEY Second Edition (2008.) Pp. 408.
  27. INEGI. *Anuario estadístico y geográfico de Zacatecas* (2017). Mexico. Pp. 533
  28. INEGI. Secretaría de programación y presupuesto. *Síntesis Geográfica de Zacatecas* (1981). Mexico, D.F.

29. MANUEL POZO RODRÍGUEZ., MARIA BEATRIZ CARENAS FERNANDEZ., JORGE LUIS GINER ROBLES., JAVIER GONZALEZ YELAMOS. *GEOLOGÍA*. Paraninfo (2014).
30. MANUEL POZO RODRÍGUEZ., REED WICANDER., JAMES S. MONROE. *GEOLOGÍA. DINÁMICA Y EVOLUCIÓN DE LA TIERRA*. Ediciones Paraninfo (2008).
31. GeoInfoMex. *Servicio Geológico Mexicano*. <https://www.gob.mx/sgm>
32. Rico Rodríguez, A., Castillo H. *Ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Limusa (2006). Mexico.
33. Le Maitre., Streckeisen., Zanettin., Le Bas., Bonin., Bateman . *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*. Cambridge University Press. First published 2002.
34. Bouchardat, A., de la Paz Graells, M., Colmeiro, M., Toca, L.S., Calleja. *Tratado completo de historia natural*. Imprenta de Hilario Martínez (1847).
35. Aguilar Rodríguez A. *Geografía General*. Pearson Educación (2004) Segunda edición. Pp. 320
36. *Diccionario de ciencias de la tierra*: Editorial Complutense (2000). Impreso en España. Pp. 822. Recuperado de [https://books.google.com.mx/books?id=1XKXQqUGDnoC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=1XKXQqUGDnoC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
37. The Physics Factbook. *Mass Of A Grain Of Sand*. An encyclopedia of scientific essays. An educational, fair use website. Recuperado de <https://hypertextbook.com/facts/2003/MarinaTheodoris.shtml>
38. Stephen R. Gliessman. *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Impresión: LITOCAT, Turrialba, Costa Rica (2002).

39. Jacob, P., Debertin, K., Miller, K., Roed, J., Saito, K., Sanderson, D. *ICRU Report 53*. Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements. Volume 27, Issue 2, 1 December 1994, Pages NP (1994)27(2):NP-NP.
40. De la Torre Aguilar, F. (2010). *Conformación de una secuencia de análisis óptima para espectros de radiación gamma ambiental con el programa Genie 2000* (Tesis de Maestría). UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS, Zacatecas.