



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS

“Francisco García Salinas”

UNIDAD ACADÉMICA DE ESTUDIOS NUCLEARES



*ANÁLISIS MULTIVARIANTE DEL DESEQUILIBRIO RADIATIVO EN  
SUELOS DEL ESTADO DE ZACATECAS POR ESPECTROMETRIA  
GAMMA IN SITU*

*TESIS*

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

*MAESTRO EN CIENCIAS NUCLEARES*

*Con opción terminal: Técnicas Analíticas Nucleares*

*Presenta*

**Q.F.B Juan Fernando López Ibarra**

**ASESOR:**

**DR. Calos Ríos Martínez**

**Co-Asesores:**

**Dr. José Luis Pinedo Vega, Dr. Fernando Míreles García**

**Dr. J. Ignacio Dávila Rangel**

© Propiedad intelectual de Juan Fernando López Ibarra y

la Unidad Académica de Estudios Nucleares, 2017

todos los **derechos reservados**

[fernandolf498@gmail.com](mailto:fernandolf498@gmail.com)

[criosmtz@hotmail.com](mailto:criosmtz@hotmail.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.

## AGRADECIMIENTOS

## CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>VIII</b>
---------------------	-------------

<b>ABSTRACT.....</b>	<b>IX</b>
----------------------	-----------

<b>CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
-------------------------------------	----------

1.1 RADIATIVIDAD AMBIENTAL.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3 OBJETIVO.....	3
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	4
1.4 HIPÓTESIS.....	4

<b>CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
--------------------------------------	----------

2.1 DECAIMIENTO RADIATIVO.....	5
2.1.1 SERIES DE DECAIMIENTO.....	5
2.1.2 LEY DE DECAIMIENTO RADIATIVO ENERGÉTICO.....	5
2.1.3 EQUILIBRIO RADIATIVO.....	10
2.1.4 EQUILIBRIO SECULAR.....	12
2.1.5 EQUILIBRIO TRANSITORIO.....	13
2.2 DESEQUILIBRIO RADIATIVO.....	14
2.3 DESEQUILIBRIO ISOTÓPICO EN LAS SERIES DEL U Y TH.....	15
2.3.1 PROPIEDADES QUÍMICAS.....	16
2.3.2 COMPOSICIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	18
2.3.3 LIXIVIACIÓN.....	19
2.3.4 DIFUSIÓN.....	19
2.3.5 RETROCESO ALFA.....	20
2.4 RADIACIÓN GAMMA.....	21
2.5 ESPECTROMETRÍA.....	21
2.6 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA).....	22
2.6.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	23
2.7 ANÁLISIS DE CONGLOMERADOS (CLÚSTER).....	24
2.7.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	24
2.8 INTERPRETACIÓN PARA PRUEBAS ESTADÍSTICAS.....	25
2.8.1 PCA.....	25
2.8.2 ANÁLISIS CLÚSTER.....	28
2.8.3 PRUEBAS DE HIPÓTESIS, PRUEBA T PARA MUESTRAS INDEPENDIENTES.....	30

<b><u>CAPITULO 3 MATERIALES Y MÉTODO.....</u></b>	<b><u>32</u></b>
3.1 <i>MEDICIÓN DE LA ACTIVIDAD DE RADIACIÓN GAMMA IN SITU</i> .....	32
3.1.1 <i>SITIO DE ESTUDIO</i> .....	32
3.1.2 <i>ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA ADQUISICIÓN DE ESPECTROS</i> .....	34
3.1.3 <i>ADQUISICIÓN DE ESPECTROS</i> .....	35
3.1.4 <i>CALIBRACIÓN DEL SISTEMA</i> .....	36
3.2 <i>MANEJO DE ESPECTROS Y ANÁLISIS DE DATOS</i> .....	37
3.2.1 <i>IDENTIFICACIÓN DE RADIONÚCLIDOS DE ORIGEN NATURAL Y ANTROPOGÉNICO</i> .....	38
<b><u>CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</u></b>	<b><u>41</u></b>
4.1 <i>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</i> .....	41
4.1.1 <i>ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA</i> .....	41
4.1.2 <i>CORRELACIÓN DE PEARSON</i> .....	43
4.1.3 <i>PRUEBA KMO Y BARTLETT</i> .....	46
4.1.4 <i>ANÁLISIS DE COMPONENTES ROTADOS</i> .....	46
4.2 <i>ANÁLISIS CLÚSTER</i> .....	47
4.3 <i>HISTOGRAMAS Y GRÁFICOS Q-Q</i> .....	51
4.4 <i>RELACIÓN ENTRE LA CONCENTRACIÓN DE LA RADIACIÓN GAMMA NATURAL CON</i> <i>PARÁMETRO ESTADÍSTICOS DE COMPARACIÓN Y GEOGRÁFICO</i> .....	55
4.4.1 <sup>137</sup> Cs .....	56
4.4.2 <sup>40</sup> K.....	57
4.4.3 <sup>238</sup> U.....	58
4.4.4 <sup>232</sup> Th.....	60
4.4.5 <i>RELACIÓN DE CONCENTRACIÓN GAMMA NATURAL POR PARÁMETRO GEOGRÁFICO</i> .....	60
<b><u>CONCLUSIONES.....</u></b>	<b><u>64</u></b>
<b><u>TRABAJO A SEGUIR.....</u></b>	<b><u>65</u></b>
<b><u>BIBLIOGRAFÍA.....</u></b>	<b><u>66</u></b>
<b><u>ANEXOS.....</u></b>	<b><u>73</u></b>

## Índice de imágenes

Figura 1 Serie de decaimiento del $U^{238}$ .....	6
Figura 2 Serie de decaimiento del $Th^{223}$ .....	7
Figura 3 Equilibrio secular.....	13
Figura 4 Equilibrio transitorio.....	15
Figura 5 Componentes rotados.....	28
Figura 6 Dendrograma.....	30
Figura 7 Territorio y división municipal del estado de Zacatecas.....	33
Figura 8 Arreglo experimental in situ.....	35
Figura 9 Gabinete NIM portátil modelo 100.....	35
Figura 10 Curva de calibración en energía.....	36
Figura 11 Curva de calibración en eficiencia.....	37
Figura 12 Espectro de rayos gamma tomado en el municipio de Ojocaliente.....	42
Figura 13 Espectro de rayos gamma obtenido en Pánfilo Natera.....	44
Figura 14 Gráfico de componentes rotados.....	47
Figura 15 Dendrograma.....	50
Figura 16 Histograma del $^{238}U$ .....	51
Figura 17 Gráfico Q-Q Normal de $^{238}U$ .....	52
Figura 18 Histograma del $^{232}Th$ .....	53
Figura 19 Gráfico Q-Q Normal de $^{232}Th$ .....	53
Figura 20 Histograma del $^{40}K$ .....	54
Figura 21 Gráfico Q-Q Normal de $^{40}K$ .....	55
Figura 22 Sierra Madre Occidental.....	62
Figura 23 Localización de la Sierra Madre Occidental, Oriental y Mesa del centro.....	63
Figura 24 Patrón climático de viento y lluvia por la CONAGUA, 2017.....	64

## Índice de tablas

Tabla 1 Correlación Pearson. ....	26
Tabla 2 Prueba de KMO y Bartlett.....	27
Tabla 3 Matriz de componenterotados. ....	28
Tabla 4 Acomodo de clúster según su similitud. ....	29
Tabla 5 Finalización de conglomerados. ....	30
Tabla 6 Estadísticas de grupo calificaciones. ....	31
Tabla 7 Prueba t muestras independientes calificaciones. ....	31
Tabla 8 Localización y descripción de Municipios medidos. ....	39
Tabla 9 Localización y descripción de Municipios medidos. ....	40
Tabla 10 Matriz de correlaciones.....	43
Tabla 11 Estadística descriptiva. ....	45
Tabla 12 Prueba de KMO y Bartlett.....	46
Tabla 13 Matriz de componente rotados. ....	46
Tabla 14 Acomodo de clúster según su similitud. ....	48
Tabla 15 Grupos. ....	49
Tabla 16 Criterio de selección de los clúster en base a la actividad en Bq. ....	49
Tabla 17 Estadístico de $^{232}\text{Th}$ y $^{238}\text{U}$ .....	56
Tabla 18 Estadísticas del grupo $^{137}\text{Cs}$ .....	57
Tabla 19 Prueba t para $^{137}\text{Cs}$ . ....	57
Tabla 20 Estadísticas de grupo $^{40}\text{K}$ .....	58
Tabla 21 Prueba t para $^{40}\text{K}$ .....	58
Tabla 22 Estadísticas de grupo $^{238}\text{U}$ . ....	59
Tabla 23 Prueba t para $^{238}\text{U}$ .....	59
Tabla 24 Estadísticas de grupo $^{232}\text{Th}$ .....	60
Tabla 25 Prueba t para $^{232}\text{Th}$ . ....	60
Tabla 26 Concentraciones de $^{137}\text{Cs}$ de mayor a menor.....	61

# ***RESUMEN***

La Unidad Académica de Estudios Nucleares ha desarrollado un mapeo radiológico ambiental mediante espectrometría gamma in situ. En este mapeo se han incluido sitios conurbados, rurales y arqueológicos. Aún y cuando no se han encontrado valores que sobrepasen los límites radiológicos establecidos, se ha visto necesaria la realización de un análisis de correlaciones que nos muestren posibles regularidades entre los mismos o que permitan contrastarlos desde el punto de vista estadístico.

En esta tesis, se ha desarrollado el análisis estadístico de componentes principales (PCA), análisis de clúster, para las actividades medidas de los fotopicos característicos de  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{228}\text{Ac}$  y  $^{208}\text{Tl}$  correspondientes a la serie del Uranio y Torio, del  $^{40}\text{K}$  y del  $^{137}\text{Cs}$ . También se ha realizado el análisis por prueba de hipótesis para diferenciar entre las actividades correspondientes a zonas conurbadas y rurales.

Los resultados más importantes de este trabajo conducen a: una observación en la ruptura del equilibrio radioactivo de la serie del uranio a partir del PCA. En las diferentes localidades, la serie del Uranio muestra un comportamiento tendiente a una aparente distribución normal. De acuerdo con los mapas digitales del INEGI, resulta que el uranio tiene mayor actividad en lugares más secos. El gráfico de componentes rotados del PCA por indica que los radioisótopos procedentes del uranio no tienen correlación uno con el otro, indicando la ruptura del equilibrio en la serie del Uranio. Por otra parte, la serie del torio no muestra esta ruptura, mientras que el  $^{137}\text{Cs}$  tiene una tendencia a disminuir de norte a sur.

El análisis clúster indica las semejanzas entre los sitios medidos, formando 3 grupos que están relacionados de acuerdo a sus semejanzas, ya que mientras más unidos resulten, su semejanza es mayor. Las pruebas de contraste de hipótesis muestran que no hay diferencia entre las concentraciones de la serie del Torio y el  $^{40}\text{K}$ , mientras que indican una clara diferenciación para las actividades de la serie del Uranio y el  $^{137}\text{Cs}$ .

Palabras clave: Radioactividad ambiental, espectrometría gamma in situ, equilibrio radioactivo, análisis de componentes principales, análisis de clúster, pruebas de hipótesis.

# ***ABSTRACT***

A radiologic mapping is underway at the Unidad Academica de Estudios Nucleares based on in situ gamma-ray spectrometry, including urban, rural and archaeological sites. Although all data is under the maximum permitted limits, a correlation analysis has been done in order to find possible regularities among them or to find statistical contrast.

For this thesis, an statistical analysis of principal components (PCA), a cluster analysis has been developed for the measured activities of the characteristics peaks of  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{228}\text{Ac}$  and  $^{208}\text{Tl}$  corresponding to the Uranium and Thorium series,  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$ . Complementarily, hypothesis test analysis has been carried out to distinguish between urban and rural zones.

The highlighted results in the present work indicate: a breakdown radioactive equilibrium observation into the Uranium series from the PCA. Along the different localities, the Uranium series shows an apparent normal distribution. According to the INEGI digital maps, the Uranium activity is higher for dry places. The PCA rotated plot shows a no-relationship between the Uranium descendants, confirming the radioactive equilibrium breakdown in this series. On the other hand, the Thorium series does not show this rupture, while the  $^{137}\text{Cs}$  seems to have a tendency to be reduced from north to south. No evident conclusion can be found for the  $^{40}\text{K}$  activities.

Since the cluster analysis indicates similarities among the measured sites, three groups were found according to their similarities, since the closer they are, the similarity is higher. Regarding the type of the sites, the contrast hypothesis tests showed no difference for the activities of the Thorium series and the  $^{40}\text{K}$ , while the Uranium series and  $^{137}\text{Cs}$  activities are statistically different.

Key words: Environmental radioactivity, In-situ gamma-ray spectrometry, Radioactive equilibrium, Principal components analysis, Cluster Analysis, Hypothesis testing.

# ***CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN***

## ***1.1 Radiactividad Ambiental***

La radiación ionizante es omnipresente en el medio ambiente humano, los isótopos radiactivos que se originan de forma natural entran y permanecen en todos los seres vivos, es inevitable, de hecho, todas las especies de este planeta han evolucionado en presencia de la radiación ionizante. Las dosis de radiación natural recibidas por el hombre se vieron aumentadas por el desarrollo humano y nuevas fuentes de radiación artificial introducidas. Cuando el hombre primitivo decidió abandonar la intemperie y vivir en cavernas, por ese solo hecho aumento mucho su exposición a la radiación natural dado que se expuso a los materiales radioactivos naturales existentes en las rocas de su nuevo hábitat [1,2].

Para ello, la humanidad lo descubrió hasta finales del siglo XIX. Fue a partir de 1896 que la humanidad tomó conciencia de la existencia de las radiaciones y comenzó a comprender sus diversos orígenes. Las radiaciones se pueden clasificar en diversos grupos, destacando la distinción entre radiaciones naturales y radiaciones artificiales. Existen radionúclidos de origen artificial (antropogénicos) como el  $^{137}\text{Cs}$  y el  $^{90}\text{Sr}$ , todos de semivida larga, producto de los ensayos y accidentes nucleares. Estos radionúclidos son “responsables” del incremento en la dosis media anual [3,4].

La concentración de actividad natural en rocas primordiales varía de unos pocos Bq/kg hasta cientos de Bq/kg. Actualmente, la concentración de radionúclidos naturales normalmente no supera los pocos décimos de Bq/kg (unos pocos centenares en el caso de  $^{40}\text{K}$ ). En algunos lugares, sin embargo, se observan zonas de alta radiación de fondo (HBRA, por sus siglas en inglés) donde se concentran minerales ricos en Uranio o Torio debido a procesos geológicos o hidrogeológicos que no tienen nada que ver con la actividad humana. Según la protección radiológica de vanguardia, la exposición a la radiación ionizante procedente del medio ambiente no alterado por la actividad humana no está sujeta al control de la autoridad. Además, la misma actitud se aplica a la biota no humana expuesta en tales condiciones [5].

El Uranio y el Torio se producen en tres series de desintegración natural, encabezadas por  $U^{238}$ ,  $Th^{232}$  y  $U^{235}$  respectivamente. En la naturaleza, los radionúclidos de estas tres series están “aproximadamente” en un estado de equilibrio secular, en el cual las actividades de todos los radionúclidos dentro de cada serie son casi iguales. Dos condiciones son necesarias para el equilibrio secular. En primer lugar, el radionúclido padre debe tener una semivida mucho más larga que la de cualquier otro radionúclido de la serie. En segundo lugar, debe haber transcurrido un período de tiempo suficientemente largo, por ejemplo diez semividas del producto de desintegración que tiene la semivida más larga, para permitir el crecimiento de los productos de descomposición. Bajo el equilibrio secular, la actividad del radionúclido padre no experimenta cambios apreciables durante muchas semividas de sus productos de descomposición [6].

El desequilibrio es el resultado de las condiciones geoquímicas, mediante la cual un proceso actúa para mover a un padre o hija dentro o fuera de un sistema a una tasa que es significativa con relación a la semivida del hijo (Osmond y Cowart, 1982). Las cadenas de desintegración en materiales profundamente enterrados y no templados están generalmente en equilibrio. Sin embargo, los procesos de intemperización que se producen en o cerca de la superficie terrestre operan en una escala de tiempo lo suficientemente breve y como resultado se da un desequilibrio.

Los principales mecanismos por los cuales se establecen los desequilibrios en el ambiente superficial son:

1. Reacciones de solución y precipitación (debido a diferencias químicas de los elementos en las cadenas de decaimiento).
2. Difusión gaseosa de los isótopos del radón
3. Retroceso de partículas alfa.

Si posteriormente el sistema se cierra eficientemente y si el padre tiene más semivida que el hijo, el hijo se desintegrará o crecerá en equilibrio con su progenitor, dependiendo de si su concentración de actividad es mayor o menor que la de su progenitor. Un estado de equilibrio nunca puede ser alcanzado si el sistema permanece abierto [7].

## ***1.2 Planteamiento del problema***

El conocimiento de la radiación ambiental es fundamental para determinar la posible existencia de riesgos radiológicos y en su caso, su origen y naturaleza. Por consiguiente, la espectrometría de rayos gamma *in situ*, identifica y cuantifica los radionúclidos presentes provenientes del medio ambiente. A partir de los datos del Mapeo Radiológico desarrollado en la Unidad Académica de Estudios Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas UAEN-UAZ, se ha procedido a realizar un análisis estadístico global con el fin de reconocer similitudes entre las actividades de los diferentes emisores gamma ambientales con la finalidad de identificar el rompimiento de las condiciones de equilibrio radiactivo en las series de Uranio y Torio y las similitudes y diferencias de las actividades de las mencionadas series y el  $^{40}\text{K}$  y  $^{137}\text{Cs}$ , respecto a las localidades medidas.

## ***1.2 Justificación***

Diferentes suelos de municipios en el Estado de Zacatecas han sido mapeados y evaluados por Espectrometría gamma, sus espectros proporcionaron información exclusivamente de la radioactividad de la misma, sin embargo es necesario conocer y evaluar *in situ* los espectros gamma que proporcionan información detallada del desequilibrio radiactivo de los radioisótopos:  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{216}\text{Ta}$ ,  $^{224}\text{At}$ ,  $^{40}\text{K}$  y  $^{137}\text{Cs}$ , así mismo el análisis multivariante determina la relación de la radioactividad con los diferentes tipos y condiciones medioambientales de suelos nativos de zonas de estudio.

## ***1.3 Objetivo***

### ***1.3.1 Objetivo general***

Estudiar el desequilibrio radiactivo en suelos del Estado de Zacatecas mediante el Análisis multivariante de la espectrometría gamma in situ.

### ***1.3.2 Objetivos particulares***

1. Medir la actividad de radiación gamma in situ en suelos del Estado de Zacatecas.
2. Determinar y evaluar la relación isotópica de emisores gamma ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Tl}$  y  $^{40}\text{K}$ ) con ACP (Análisis de Componentes Principales).
3. Analizar y establecer correlaciones de la energía gamma para los espectros en análisis de conglomerados (clúster) por análisis multivariante en suelos nativos para el área de estudio general e individual.
4. Estimar la relación entre la concentración de la radiación gamma natural con el parámetro geográfico altitud para establecer algún riesgo ambiental en los seres vivos de las zonas de estudio.

## ***1.4 Hipótesis***

H0: El desequilibrio radiactivo en suelos zacatecanos de las series radioactivas naturales es producto de fluctuaciones estadísticas

H1: El desequilibrio radiactivo es generado por otro tipo de mecanismos

# ***CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO***

## ***2.1 Decaimiento Radiactivo***

### ***2.1.1 Series de decaimiento***

Los términos "transmutación radiactiva" y "decaimiento radiactivo" son sinónimos. En general, el término "desintegración radiactiva" se prefiere en la literatura inglesa. Después del descubrimiento de la radiactividad en 1896. Estos fueron nombrados radionúclidos UX1, UX2, . . . : 0 mesotario 1 ~ mesotario 2, . . . ; o actino, . . . , con el fin de indicar su génesis. Sus números atómicos y de masas se determinaron más tarde, después de que se había establecido el concepto de isótopos. Considerando que el torio tiene sólo un isótopo con una semivida muy larga ( $^{232}\text{Th}$ ), mientras el U tiene dos ( $^{238}\text{U}$  y  $^{235}\text{U}$ ), dando lugar a una cadena de decaimientos para Torio y dos para Uranio (Figuras 1 y 2) [8].

### ***2.1.2 Ley de decaimiento radiactivo energético***

Las series de decaimiento radiactivo del  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$  son un ejemplo de la serie de desintegración radiactiva natural. Las series de desintegración radiactiva (o cadena) a menudo se producen en un número de productos hijo, que también son radiactivos y termina en un isótopo estable [9].

La desintegración radiactiva sigue las leyes de la estadística. El número de átomos de cada miembro de una serie radiactiva en cualquier momento  $t$  puede obtenerse resolviendo un sistema de ecuaciones diferenciales que relaciona cada producto  $N_1, N_2, N_3, \dots, N_i$  con las correspondientes constantes de desintegración  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_i$ . Cada serie comienza con un nucleído padre  $N_1$ , que tiene una tasa de transformación, Ecuación 1 [10]

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (1)$$

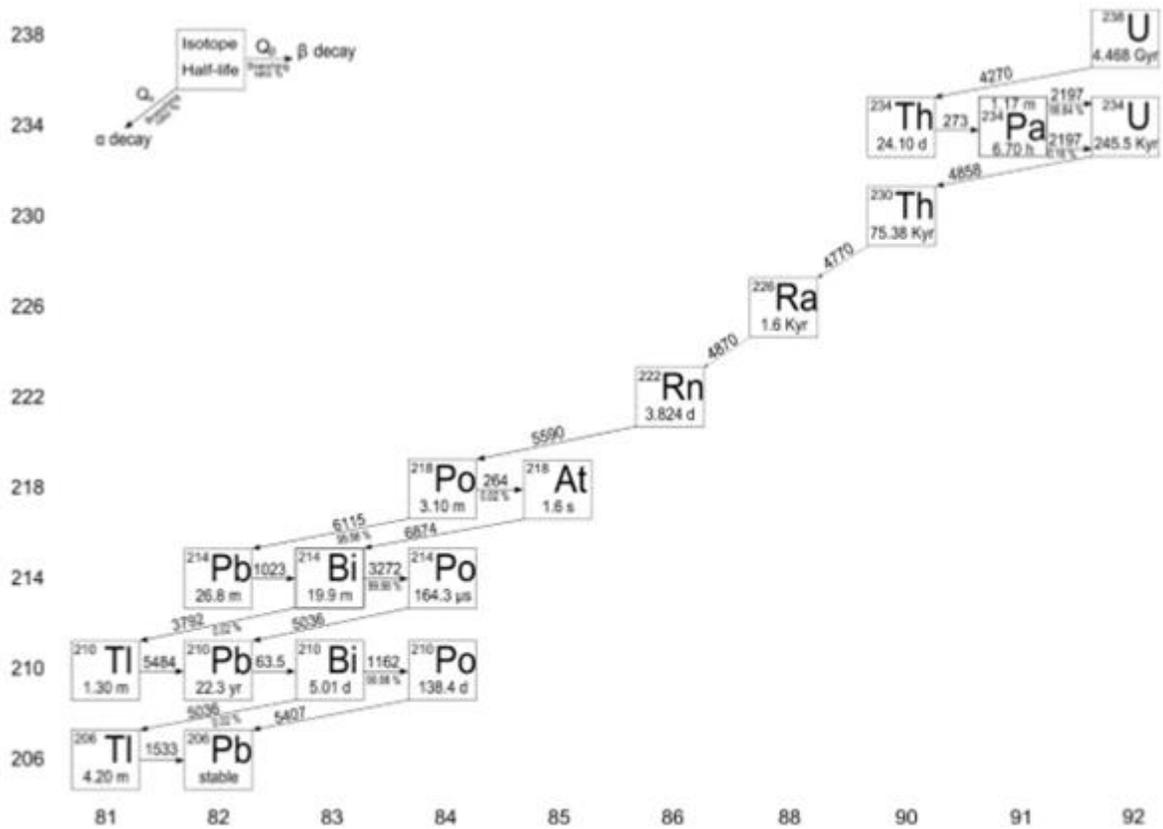
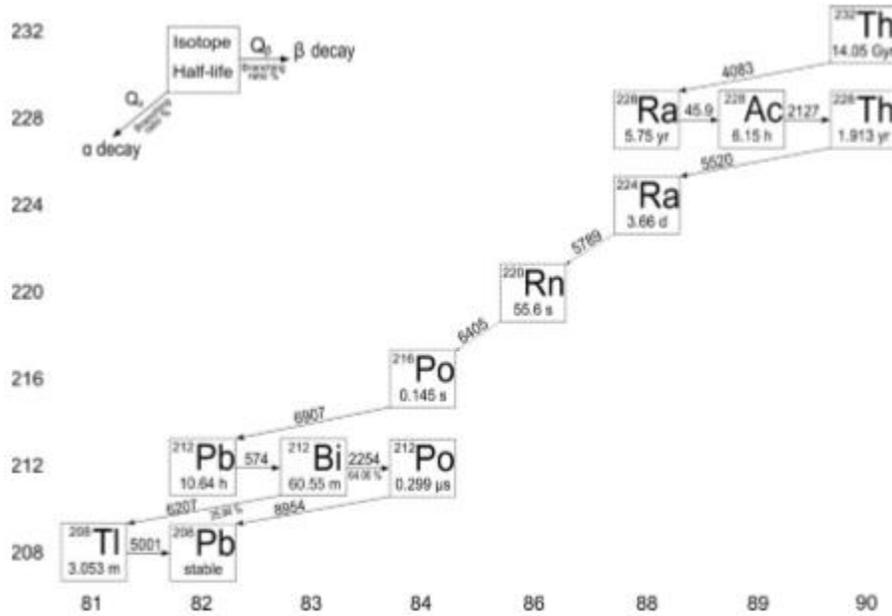


Figura 1 Serie de decaimiento del  $U^{238}$  (Gerti, 2012).

El segundo nucleído de una serie de radionúclidos se producirá a una velocidad de  $\lambda_2 N_2$  debido a la transformación de  $N_1$ , pero tan pronto como existan átomos de  $N_2$ , también pueden sufrir transformación si son radiactivos. Así, la tasa de cambio de átomos de  $N_2$  es la tasa de producción menos la velocidad de eliminación de los átomos de  $N_2$  Ecuación 2 [10].

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2)$$



**Figura 2** Serie de decaimiento del  $Th^{223}$  (Gerti, 2012).

De manera similar, para átomos de  $N_3$  que se producen por transformación de átomos de  $N_2$  Ecuación 3, sujetos a eliminación en función de la constante de desintegración  $\lambda_3$ ,

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad (3)$$

Y así sucesivamente hasta el miembro  $i$  de la serie, Ecuación 4:

$$\frac{dN_i}{dt} = \lambda_{i-1} N_{i-1} - \lambda_i N_i \quad (4)$$

Si el producto final es estable, los átomos del producto final estable aparecen a la velocidad del último precursor radioactivo, por supuesto, no se eliminan puesto que son estables.

Es útil resolver este sistema de ecuaciones para los primeros cuatro miembros de una serie radiactiva. El número de átomos de  $N_1$  se da en la Ecuación 5[10].

$$N_1(t) = N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (5)$$

Donde  $N_1^0$  es el número de átomos de padre en  $t=0$ . Esta expresión para  $N_1$  puede insertarse en la ecuación para  $dN_2/dt$  para dar la Ecuación 6

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2 \quad (6)$$

O, recogiendo términos en la Ecuación 7

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (7)$$

Este tipo de ecuación puede ser convertida en una que puede ser integrada directamente multiplicando por un factor de integración apropiado, que para esta forma es siempre exponencial con un exponente que es igual a la constante en el segundo término multiplicada por la variable en el Denominador del derivado, o en este caso  $e^{-\lambda_2 t}$ , Ecuación 8[10].

$$e^{\lambda_2 t} \frac{dN_2}{dt} + e^{\lambda_2 t} \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1^0 e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} \quad (8)$$

La multiplicación por  $e^{-\lambda_2 t}$  convierte el lado izquierdo de la ecuación en la derivada temporal de  $N_2 e^{-\lambda_2 t}$ , lo que se puede demostrar diferenciando la expresión (Ecuación 9). También produce una expresión exponencial multiplicada por una constante en el lado derecho, o

$$\frac{d}{dt} (N_2 e^{-\lambda_2 t}) = \lambda_1 N_1^0 e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} \quad (9)$$

que puede ser integrado directamente para dar la Ecuación 10

$$N_2 e^{-\lambda_2 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} + c \quad (10)$$

Donde C, la constante de integración, se determina estableciendo la condición de que cuando  $t=0$ ,  $N_2=0$ ; así Ecuación 11

$$c = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \quad (11)$$

Por lo tanto, la solución para  $N_2$  en función del tiempo es la Ecuación 12

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (12)$$

El número de átomos de la tercera clase se encuentra insertando esta expresión para  $N_2$  en la ecuación para la tasa de cambio de  $N_3$ , Ecuación 3. Después de que se realiza la integración y se evalúa la constante de integración, la ecuación para el número de átomos de  $N_3$  con el tiempo es Ecuación 13

$$N_3(t) = \lambda_1 \lambda_2 N_1^0 \left[ \frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1) + (\lambda_3 - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2) + (\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3) + (\lambda_2 - \lambda_3)} \right] \quad (13)$$

De manera similar, para el número de átomos del cuarto tipo, la expresión de  $N_3(t)$  se inserta en la ecuación de  $dN_4/dt$ , que se integra para obtener el número de átomos de  $N_4$  con el tiempo, Ecuación 14 [10]

$$\begin{aligned}
N_4(t) = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 N_1^0 & \left[ \frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1) + (\lambda_3 - \lambda_1) + (\lambda_4 - \lambda_1)} \right. \\
& + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2) + (\lambda_3 - \lambda_2) + (\lambda_4 - \lambda_2)} \\
& + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3) + (\lambda_2 - \lambda_3) + (\lambda_4 - \lambda_3)} \\
& \left. + \frac{e^{-\lambda_4 t}}{(\lambda_1 - \lambda_4) + (\lambda_2 - \lambda_4) + (\lambda_3 - \lambda_4)} \right] \tag{14}
\end{aligned}$$

Estas ecuaciones proporcionan el número de átomos de cada uno de los cuatro primeros miembros de una serie radiactiva que comienza con un progenitor puro radiactivo, es decir, no hay productos de transformación en  $t=0$ .

Una serie radiactiva termina típicamente en un nucleído estable o uno con una semivida muy grande tal que no es irrazonable terminar la producción de átomos radiactivos. En este caso, la constante de desintegración  $\lambda_i$  para el producto final será cero, o al menos muy pequeña. Por ejemplo, si el tercer elemento de una serie es estable (es decir,  $\lambda_3 = 0$ ), entonces el número de átomos de  $N_3$  será como se muestra en la Ecuación 15 [10].

$$N_3(t) = N_1^0 \left( 1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} \right) \tag{15}$$

Las soluciones para los números de átomos en los primeros cuatro miembros de una serie radiactiva producen una recursión de términos similares, que se ha generalizado en una serie de expresiones conocidas como ecuaciones de Bateman [10].

### ***2.1.3 Equilibrio radiactivo***

Las actividades relativas de un padre radiactivo y su producto radiactivo, se pueden determinar a partir de la ecuación para el número de átomos para el segundo miembro de una serie multiplicando ambos lados por  $\lambda_2$ , con el siguiente resultado, Ecuación 16 [10].

$$A_2(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (16)$$

Los cálculos con esta ecuación pueden hacerse algo más simples mediante el uso de la identidad, Ecuación 17

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (17)$$

Así da la Ecuación 18

$$A_2(t) = \frac{T_1}{T_1 - T_2} A_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (18)$$

El tiempo de actividad máxima de  $A_0(t)$  puede ser determinado exactamente para todos los casos diferenciando la ecuación para  $A_2(t)$ , poniéndola igual a cero, y resolviendo para  $t_m$  como sigue en la Ecuación 19:

$$\frac{d(A_2)}{dt} = -\lambda_1 e^{-\lambda_1 T_m} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 T_m} = 0 \quad (19)$$

O más claro en la Ecuación 20

$$T_m = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (20)$$

Donde  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  deben expresarse en las mismas unidades. El valor de  $t_m$  también puede expresarse en términos de semividas como Ecuación 21

$$t_m = 1.4427 \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2} \quad (21)$$

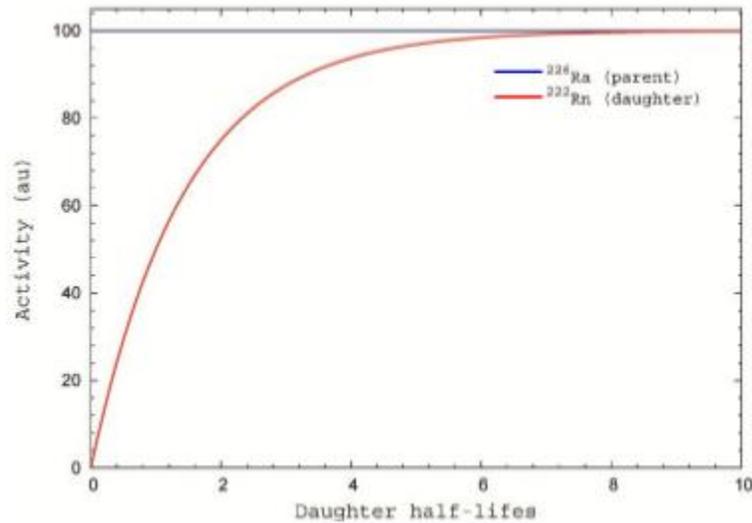
El tiempo de actividad máxima ocurre al mismo tiempo que las actividades del padre y el hijo son iguales si, y sólo si, el padre tiene solamente un producto radioactivo. Como regla general,  $t_m$  ocurre en 7-10 semividas para un padre de larga semivida y un producto de relativamente corta duración; Sin embargo, la mejor práctica es calcularlo. Una vez que se conoce el tiempo de actividad máxima, puede utilizarse a su vez en la ecuación de actividad de la segunda especie para determinar la máxima actividad del producto [10].

### ***2.1.4 Equilibrio secular***

Si el período de observación (o cálculo) es tal que la actividad del nucleído padre permanece esencialmente sin cambios, entonces la actividad del producto radiactivo, la ecuación para el segundo miembro de una serie radiactiva puede Simplificarse como sigue en la Ecuación 22:

$$A(t) = A_1^0(1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (22)$$

Debe ser observado que esto es exacto solamente si el padre tiene más vida que el producto. Cuando esta condición se satisface, la actividad del producto crecerá hasta un nivel que es esencialmente idéntico al del padre, como se muestra en la Figura 3, las actividades del padre y del producto no muestran un cambio apreciable durante muchas semividas del producto. Esta condición se llama equilibrio secular. La acumulación de  $^{90}\text{Y}$  a partir de la transformación de  $^{90}\text{Sr}$  es un buen ejemplo de equilibrio secular como lo es el crecimiento interno de  $^{222}\text{Rn}$  a partir de la transformación de  $^{226}\text{Ra}$ . En ambos casos, la actividad del producto aumentará hasta que sea la misma que la del progenitor (es decir, está en equilibrio con el progenitor). La actividad del producto alcanza un valor del 99% de la actividad del padre después de aproximadamente 6,7 semividas del producto nucleído hijo y está efectivamente en equilibrio con el progenitor en este momento y en los posteriores [10].



**Figura 3** Equilibrio secular (J.E. Amaro, 2006) de un hijo de muy corta duración ( $^{222}\text{Rn}$  de semivida de 3.824 días) a partir de una larga semivida de los padres ( $^{226}\text{Ra}$  de semivida de 1600 años). La actividad (unidad arbitraria) de la matriz se mantiene constante, mientras que la actividad del hijo alcanza el equilibrio secular (más de 99%) justo después de siete semividas.

La ecuación simplificada para el equilibrio secular es muy conveniente y fácil de usar, pero es necesario asegurar que se cumplen las condiciones para su uso apropiado. Si existe alguna incertidumbre, entonces la solución general para el segundo miembro de una serie siempre dará el resultado incorrecto para un padre radiactivo que se transforma en un producto radiactivo [10].

### 2.1.5 Equilibrio transitorio

Una condición llamada equilibrio transitorio resulta entre un padre radiactivo y un producto radiactivo, si el padre tiene una vida más larga que el producto ( $\lambda_1 < \lambda_2$ ), pero la semivida del padre es tal que su actividad disminuye apreciablemente durante el período de consideración y no existe actividad del producto a  $t = 0$ , la actividad del producto viene dada por Ecuación 23:

$$A_2(t) = \frac{T_1}{T_1 - T_2} A_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (23)$$

Para valores de  $t$  superiores a 6-7 semividas aproximadamente,  $e^{-\lambda_2 t}$  llega a ser insignificante en comparación con  $e^{-\lambda_1 t}$  y la actividad del producto es esencial, Ecuación 24:

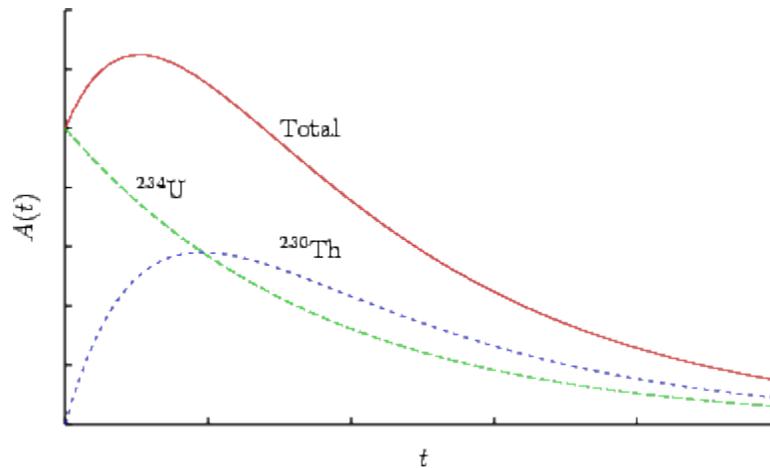
$$A_2(t) = \frac{T_1}{T_1 - T_2} A_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (24)$$

El producto eventualmente disminuye con la misma semivida que el padre. Cuando esta condición existe, se dice que los dos nucleídos están en equilibrio transitorio, y la actividad del producto es mayor que la del progenitor por el factor  $T_1/(T_1 - T_2)$ . Dado que  $A_1^0 e^{-\lambda_1 t}$  es sólo la actividad del padre en el instante  $t$ , la actividad del producto puede obtenerse fácilmente determinando la actividad del padre  $A_1(t)$  en el tiempo  $t$  y multiplicándola por  $T_1/(T_1 - T_2)$  [11]. Es sabido que se ha establecido un equilibrio transitorio, Figura 4. Esto se hace determinando que el tiempo de crecimiento ha excedido el tiempo cuando la actividad del producto ha alcanzado su valor máximo. Cuando el padre tiene una semivida más corta que el producto ( $\lambda_1 > \lambda_2$ ), no se alcanza ningún estado de equilibrio. Si el padre y el producto se separan inicialmente, entonces como el padre sufre la transformación el número de átomos del producto aumentará, pasará a través de un máximo y la actividad del producto será eventual una función de su propia semivida [12].

## ***2.2 Desequilibrio radiactivo***

En sistemas cerrados, los radionúclidos hijos se encuentran presentes en concentraciones de actividad determinadas por la del radionúclido padre y por el tiempo desde el cual el sistema se cerró a la migración. Si éste se cerró en un tiempo suficientemente grande en comparación

con el tiempo de semivida del radionúclido padre, las concentraciones de actividad de los radionúclidos hijos deben ser iguales a los de su progenitor, es decir, deberán encontrarse en equilibrio secular. Sin embargo, en el medio ambiente superficial, dichos radionúclidos están sujetos a numerosas migraciones por procesos físicos y químicos [13].



**Figura 4** Equilibrio transitorio (J.E. Amaro, 2006).

Los procesos de diferenciación que dan lugar a la pérdida de equilibrio secular pueden ser tanto físicos como químicos y tanto isotópicos como elementales. En general, se producen por las interfaces líquido/sólido, gas/sólido y sólido/sólido. Sin embargo, disolución y precipitación son con mucho la diferencia, los procesos de adsorción más importantes, siendo la interface líquido/sólido la más interesante desde el punto de vista geológico en los estudios de desequilibrio [13].

### ***2.3 Desequilibrio isotópico en las series del U y Th***

Cuando se consideran los diferentes factores que pueden influir en los procesos de desequilibrio isotópico entre los miembros de las series radiactivas naturales, la mayoría de los autores llegan a la conclusión de que los de mayor relevancia son los siguientes [14]:

- Las propiedades químicas elementales.
- La composición de las aguas subterráneas.

- Lixiviación.
- Difusión.
- Retroceso Alfa.

### ***2.3.1 Propiedades químicas***

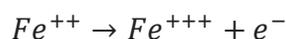
El decaimiento radiactivo es un proceso paulatino, lento o muy rápido, según el isótopo. El  $^{238}\text{U}$  posee un 100% de posibilidad de desintegración a través de una emisión alfa. El elemento Uranio, está formado por un total de 92 protones y 146 neutrones. En el Uranio un decaimiento con emisión alfa supone la pérdida de 2 protones, así como también de dos neutrones, lo que hace que el isótopo llegue a quedarse con 90 protones y un total de 144 neutrones, por lo que pasará de ser  $^{238}\text{U}$  a ser  $^{234}\text{Th}$ . Los elementos cambian porque sus números de protones cambian también, siendo esto algo determinante, pues las propiedades químicas difieren de acuerdo a cada decaimiento [15].

#### ***2.3.1.1 Propiedades químicas del U***

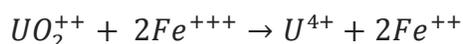
El comportamiento geoquímico está caracterizado por la facilidad con que este elemento pasa de un estado ionizado IV a otro estado ionizado VI de acuerdo con la siguiente reacción:



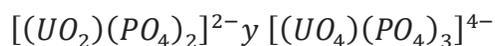
En el que se desarrolla un potencial de  $E^\circ = -0.334$  voltios. Este bajo potencial de oxidación hace que el tetravalente pase a hexavalente en una solución normal de iones hidrogeno y que igualmente pueda ser reducida por la presencia de muchos iones. Si se compara el potencial de oxidación del Uranio con el del Hierro vemos que este es mucho mayor según la reacción:



En la oxidación del Hierro se libera un potencial de  $E^\circ = -0.771$  Voltios, por lo que el simple ion Férrico puede ser un agente precipitante por reducción del ion Uranilo de acuerdo con la reacción:



El comportamiento geoquímico del  $U^{6+}$  es muy distinto al del  $U^{4+}$ . El tetravalente es muy poco soluble por lo que tiene escasa actividad química; mientras que el hexavalente es muy soluble, especialmente en la forma del ion Uranilo,  $UO_2^{++}$ , y tiene una gran movilidad y dispersión. El ión Uranilo es únicamente estable en medios ácidos por lo que fácilmente precipita por cambios de pH; sin embargo, en medios próximos a pH: 7 tiende a formar iones complejos del tipo:



Estos complejos, especialmente los sulfúricos y los carbónicos, son bastante estables y muy solubles, pero son sensibles a las variaciones del potencial redox. Únicamente los complejos de ion uranilo y ion fosfórico son insolubles, a esto se debe la abundancia de los minerales de las series de la torbernita y metatorbernita. En general caracteriza su inmovilidad en medios reductores [12].

### ***2.3.1.2 Propiedades químicas del Th***

El Torio sólo acepta un estado de oxidación. El ion  $Th^{4+}$  se comporta de modo análogo al  $U^{4+}$ . Mientras que en los procesos supergénicos el Uranio se moviliza en forma de  $U^{6+}$ , el Torio permanece inmóvil en las redes cristalinas de los minerales que le contienen.

El Torio se asocia por sustitución diadocia en los minerales que se forman en la primera parte del ciclo geoquímico, yacimientos petrogenéticos. Pero en los yacimientos hidrogénicos, como el torio es insoluble los minerales uraníferos prácticamente no contienen torio [12].

### ***2.3.1.3 Propiedades químicas del Ra***

Las propiedades químicas del Radio son muy distintas a las sales de Uranilo. El Sulfato y el Carbonato de Radio son muy insolubles, por lo que el Uranio y el Radio se separan cuando son movilizados en forma de solución. El radio se moviliza en condiciones reductoras, por las cuales se puede precipitar. Debido a la gran solubilidad al Cloruro de Radio, este elemento pasa a incrementar el contenido de las aguas oceánicas, o se encuentra en las salmueras petrolíferas. Pequeñas cantidades pueden ser fijadas por adsorción y dar lugar a depósitos radíferos [12].

### ***2.3.1.4 Propiedades químicas del Rn***

Por su naturaleza gaseosa el radón tiene un comportamiento totalmente diferente. Químicamente inerte, se difunde con facilidad en el aire y se encuentra disperso en toda la superficie de la tierra. Procede siempre de los minerales de los que se separa con facilidad, por las dislocaciones cristalinas y por las fisuras de las rocas. El Radón es soluble en agua y transportado por las aguas subterráneas a grandes distancias de la fuente Uranífera. La radiactividad de la mayor parte de las aguas termales se debe a su contenido en Radón [12].

### ***2.3.2 Composición de aguas subterráneas***

El papel del agua en dicho desequilibrio parece ser fundamental, pues análisis de muestras superficiales provenientes de la Luna no muestran desequilibrio entre  $^{234}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$ . Para explicar tal observación, se propuso un mecanismo no excluyente, basado en la conservación de la cantidad de movimiento durante la emisión de partículas  $\alpha$  por el decaimiento del  $^{238}\text{U}$ : Basado en el estudio de la disolución de isótopos de Uranio en Circones en 1971 propuso que el exceso de  $^{234}\text{U}$  en aguas subterráneas puede ser explicado por la expulsión de  $^{234}\text{Th}$  por retroimpacto- $\alpha$  (“ $\alpha$ -recoil”) durante los eventos de decaimiento que suceden en un espacio de 55 nm de la superficie del cristal. El  $^{234}\text{Th}$  expulsado, decaerá rápidamente para formar  $^{234}\text{U}$ , el cual puede ser movilizado fácilmente por el agua [16].

Tal sistema es el depósito sedimentario en Tono, Japón, estudiado por Nohara. El agua subterránea se mueve a través del área con una velocidad de 0.001 a 1 metro/año. Las relaciones de actividad específicas, medidas por espectrometría  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , de  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  se representan frente a  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  (a) y  $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$  contra  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  (b) para un gran número de muestras de roca. Si existiera equilibrio radiactivo, todas las proporciones deberían ser 1,0 [7].

La observación de desviaciones de 0.5 a 1.5 en (a) y hasta 5 en (b) indican que U, Th, Ra y Pb han emigrado a velocidades diferentes en los últimos tiempos. Un análisis detallado arroja la edad del depósito U y las tasas de migración de los elementos hijos: El U y Th no han

emigrado durante los últimos cientos de miles de años (esto es probablemente también la edad del depósito U); Ra ha emigrado unos metros en los últimos 10 000 años [17].

### 2.3.3 Lixiviación

La pérdida de por lixiviación es un hecho comprobado en todos los minerales estudiados, principalmente en los yacimientos hidrogenéticos cuyo contenido en piritas es significativo [12]. La lixiviación puede ser muy intensa en los minerales, en las zonas de alteración de los yacimientos. En estas zonas profundas también existe pérdida de acuerdo a (Kulp, Phair y Levine, stieff y Stern) la cual se estima que es de aproximadamente en un 5% del Unario total.

El desequilibrio depende de una velocidad de lixiviación  $\epsilon'$  si suponemos que esta es constante y sigue una ley exponencial; es decir, que el número de átomos lixiviados es proporcional al número de átomos existentes en el instante inicial. La pérdida seguirá la Ecuación 25:

$$N_t = N_U^0 e^{-\epsilon' t} \quad (25)$$

A esta pérdida habrá que sumar la pérdida por desintegración, por lo que el número de átomos de en el instante t será la Ecuación 26:

$$N_t = N^0 e^{-(\epsilon'+\lambda t)} \quad (26)$$

Por lo tanto, la ecuación de equilibrio que vimos en el subcapítulo 2.1.2, vendrán efectuadas por la nueva constante  $(\epsilon-\lambda)$ . Si como estima Durand  $\epsilon_u$  es del orden de 2 a 10 veces el valor de  $\lambda_u$ , el estado de equilibrio será poco afectado [12].

### 2.3.4 Difusión

Otra causa del desequilibrio radiactivo puede deberse a la difusión del radón, radionúclido de vida corta descendiente de las series radiactivas del Torio y Uranio [12]. Aunque el radón se encuentra a la mitad de cada serie de decaimiento estos son  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  y  $^{219}\text{Rn}$ . Debido a que estos elementos son gaseosos, se pueden liberar fácilmente de la muestra o del suelo.

Este escape se ve favorecido en materiales porosos. Si por ejemplo, escapa el 25% de radón, entonces no solamente la actividad del radón baja sino también la actividad de todos sus descendientes en la misma proporción. Es más probable que el  $^{222}\text{Rn}$  se libere de la muestra ya que los otros dos isótopos por tener semivida muy corta de 55 y 4 segundos respectivamente, tienen mayor probabilidad de quedar dentro de la muestra[13].

### ***2.3.5 Retroceso alfa***

Otro de los mecanismos que puede causar desequilibrio en cualquier interface es el retroceso de los descendientes en el proceso de decaimiento alfa. Dado que las partículas alfa de las tres series naturales tienen energías comprendidas entre 4 y 9MeV, la conservación de la cantidad de movimiento requiere que el radionúclido hijo retroceda con una energía inversamente proporcional a la razón de su masa y la de la partícula alfa.

En sistemas geológicos donde la fase dominante es de pequeño tamaño, los procesos por retroceso alfa pueden ser una importante causa de desequilibrio radiactivo. Es lo que ocurre en suelos arcillosos o donde los gradientes de concentración entre las fases adyacentes son grandes, como el caso de granos de mineral en contacto con acuífero.

Los minerales presentan, por lo general, una concentración más alta que la correspondiente a las fases disueltas. Así, la transferencia de radionúclidos descendientes desde la fase sólida a la líquida excederá a la transferencia inversa. Si sólo se consideran las probabilidades de desplazamiento por retroceso alfa, las actividades relativas de los sucesivos descendientes en el sólido (cerca de la interface) se espera que disminuyan, mientras que las actividades relativas en la fase líquida deberán aumentar. Esto explica la baja relación y actividades  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  encontradas en rocas de grano fino y sedimentos.

Es difícil aislar los procesos de retroceso alfa como mecanismo causante del desequilibrio en los procesos naturales, debido al papel competitivo de los procesos de disolución. Sin embargo, el papel que tiene el retroceso alfa debe ser importante. El desequilibrio del  $^{234}\text{U}$  relativo al  $^{238}\text{U}$  es difícil de explicar de otra forma. El padre y el hijo tienen el mismo comportamiento químico y, además, los radionúclidos intermedios ( $^{234}\text{Th}$  y  $^{234}\text{Pa}$ ) son

relativamente insolubles y tienen un tiempo de semivida muy corto, por lo que la disolución de éstos es poco probable [18].

## ***2.4 Radiación gamma***

La radiación gamma o rayos gamma ( $\gamma$ ) es un tipo de radiación electromagnética, (como las ondas de radio, las microondas y la luz visible) y por tanto formada por fotones, producida generalmente por elementos radiactivos o procesos subatómicos como la aniquilación de un par positrón-electrón. Debido a las altas energías que poseen, los rayos gamma constituyen un tipo de radiación ionizante capaz de penetrar en la materia más profundamente que la radiación alfa o beta [19]. Los rayos gamma se diferencian de los rayos X en su origen, el término rayos X se aplica a fotones que son producidos en transiciones atómicas como excitación o ionización y también por Bremsstrahlung.

Los rayos gamma se producen en la desexcitación de un núcleo de un nivel o estado excitado a otro de menor energía, producidos por desintegración radiactiva o reacciones nucleares. La desintegración o decaimiento radiactivo es un cambio espontáneo dentro del núcleo de un átomo que generalmente resulta en la emisión de partículas. La mayoría de los rayos gamma son una consecuencia del decaimiento beta y las probabilidades de emisión gamma no son necesariamente iguales a las probabilidades de decaimiento beta debido a la conversión interna (CI). La CI es otro proceso posible para la desexcitación de un núcleo.

En este proceso, la energía disponible es transferida a un electrón fuera del núcleo el cual es expulsado del átomo. La conversión interna compite con la emisión de rayos gamma como proceso de desexcitación nuclear, la cantidad de rayos gamma de cierta energía emitidos por un núcleo en cien desintegraciones es representada por la probabilidad de emisión gamma. La probabilidad de emisión gamma toma en cuenta la probabilidad de que se emitan rayos gamma al desexcitarse un núcleo en lugar de que se lleve a cabo la CI [19].

## ***2.5 Espectrometría***

La espectrometría definida por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) es la medición de radiación electro magnética cuyo fin es obtener información acerca del sistema y sus componentes (IUPAC, 2009). Esta medición está enfocada a la distribución de energía de las partículas emitidas por una fuente radiactiva o partículas producidas por una reacción nuclear. Un espectro de energía de partículas es una función que proporciona la distribución de las partículas en términos de su energía [19].

El espectro de energía diferencial es la distribución comúnmente más utilizada y es una función de  $n(E)$  lo que significa:

$n(E)$  = número de partículas con energía  $E$  por unidad de intervalo de energía.

$n(E)dE$  = número de partículas con energías entre  $E$  y  $E + dE$ .

Para medir un espectro diferencial de energía de partículas emitidas por una fuente, se almacena la distribución de altura de pulsos generada en un detector mediante la electrónica apropiada. Los requisitos fundamentales para el detector y la electrónica son los siguientes:

- La partícula debe depositar toda o una fracción conocida de energía en el detector.
- El pulso de voltaje producido por el detector, debe ser proporcional a la energía de las partículas disipadas en él; deberá existir una relación conocida entre la energía disipada y la altura del pulso.
- La amplificación electrónica deberá ser la misma para todas las alturas de pulso (linealidad).

El almacenamiento de la distribución de la altura de pulsos se lleva a cabo por un instrumento llamado Analizador Multicanal (MCA, por sus siglas en inglés). La función del MCA es ordenar los pulsos de entrada de acuerdo a su altura y almacenar en número de pulsos con una altura particular en una dirección de memoria correspondiente del MCA llamada número de canal [20].

## ***2.6 Análisis de Componentes Principales (PCA)***

Es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo será reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible.

Los nuevos componentes principales o factores serán una combinación lineal de las variables originales, y además serán independientes entre sí.

Un aspecto clave en ACP es la interpretación de los factores, ya que ésta no viene dada a priori, sino que será deducida tras observar la relación de los factores con las variables iniciales (habrá, pues, que estudiar tanto el signo como la magnitud de las correlaciones). Esto no siempre es fácil, y será de vital importancia el conocimiento que el experto tenga sobre la materia de investigación [21].

### ***2.6.1 Conceptos fundamentales***

Fases de un análisis de componentes principales

- Análisis de la matriz de correlaciones

Un análisis de componentes principales tiene sentido si existen altas correlaciones entre las variables, ya que esto es indicativo de que existe información redundante y por tanto pocos factores explicarán gran parte de la variabilidad total.

- Selección de los factores

La elección de los factores se realiza de tal forma que el primero recoja la mayor proporción posible de la variabilidad original; el segundo factor debe recoger la máxima variabilidad posible no recogida por el primero, y así sucesivamente. Del total de factores se elegirán aquéllos que recojan el porcentaje de variabilidad que se considere suficiente. A éstos se les denominará componentes principales.

- Análisis de la matriz factorial

Una vez seleccionados los componentes principales, se representan en forma de matriz. Cada elemento de ésta representa los coeficientes factoriales de las variables (las correlaciones entre las variables y los componentes principales). La matriz tendrá tantas columnas como componentes principales y tantas filas como variables [21].

## ***2.7 Análisis de conglomerados (clúster)***

Es una técnica multivariante que busca agrupar elementos (o variables) tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencias entre los grupos. Nos basaremos en los algoritmos jerárquicos acumulativos (forman grupos haciendo conglomerados cada vez más grandes), aunque no son los únicos posibles. El dendograma es la representación gráfica que mejor ayuda a interpretar el resultado de un análisis clúster [22].

El análisis de conglomerados se puede combinar con el Análisis de Componentes Principales, ya que mediante PCA se puede homogeneizar los datos, lo cual permite realizar posteriormente un análisis clúster sobre los componentes obtenidos.

### ***2.7.1 Conceptos fundamentales***

Medidas de disimilitud. Partimos de una matriz de información que contiene las observaciones de todas las variables sobre los diferentes elementos considerados, y calculamos las diferencias entre dichos elementos mediante alguna de las medidas de disimilitud habituales: la distancia euclidiana ( $\sqrt{\sum_{j=1}^j (X_{rj} - X_{sj})^2}$ ), su cuadrado, la distancia de City-Block ( $\sum_{j=1}^j |X_{rj} - X_{sj}|$ ), la de Mahalanobis, la de Minkowski, la de Tchebycheff, etc. Todas ellas proporcionan ordenaciones muy similares de las distancias en casi todos los casos.

Algoritmos de clasificación

Para clasificar los elementos en clusters utilizaremos algoritmos jerárquicos, que pueden ser acumulativos (se forman grupos haciendo clusters cada vez más grandes) o diminutivos (partiendo de un solo grupo se separan los elementos en clusters cada vez más pequeños).

Entre los algoritmos jerárquicos acumulativos destacan los siguientes métodos:

- Método de las distancias mínimas: se busca la mayor semejanza entre los elementos o grupos más cercanos.
- Método de las distancias máximas: se calcula la mínima distancia entre los elementos más alejados.
- Método de las distancias medias: se calcula la media de las distancias entre elementos.

Presentación de los resultados

Para representar la estructura jerárquica de la formación de los conglomerados se utiliza el dendograma, un gráfico que tiene forma de árbol invertido.

Así, a partir de los  $K$  elementos observados podemos identificar desde 1 hasta  $K$  clusters, según el número de grupo que queramos obtener, sin más que realizar la segmentación horizontal adecuada. Es recomendable trabajar con datos estandarizados, para eliminar el efecto de la escala de medida, y así poder aplicar el análisis sobre variables que presentan similares valores medios y desviaciones estándar, lo cual facilita la interpretación [22].

## ***2.8 Interpretación para Pruebas Estadísticas***

### ***2.8.1 PCA***

El primer paso del análisis consiste en el estudio de las correlaciones entre todos los pares de variables consideradas eje. Temperaturas, suelos, concentración de radionúclidos y climas. El análisis de componentes principales desarrolla un análisis estadístico descriptivo para después desarrollar una tabla de correlaciones.

**Tabla 1** Correlación Pearson.

		DA	DB	CM	CB
Correlación	DA	1.00	0.00	-0.08	0.84
	DB	0.00	1.00	0.47	-0.16
	CM	-0.08	0.47	1.00	-0.15
	CB	0.84	-0.16	-0.15	1.00

La Tabla 1 indica que hay variables que correlacionan muy alto entre sí (DA con CB), otras que correlacionan de forma moderada (por encima de 0.30, CM y DB) y que el resto de correlaciones son muy bajas. Cuando el número de variables es elevado (muy habitual) no es adecuada una inserción visual de la matriz de correlaciones, es necesario utilizar diversos índices que permitan saber si hay correlaciones altas en la matriz para extraer factores. Existe varios contrastes que pueden realizarse para evaluar si el modelo factorial (o la extracción de los factores) en su conjunto es significativo [23].

**El test KMO** (Kaiser, Meyer y Olkin).- Relaciona los coeficientes de correlación, observados entre las variables, son los coeficientes de correlación parcial entre las variables. Cuanto más cerca de 1 tenga el valor obtenido del test KMO, implica que la relación entre las variables es alta. Si  $KMO \geq 0.9$ , el test es muy bueno; notable para  $KMO \geq 0.8$ ; mediano para  $KMO \geq 0.7$ ; bajo para  $KMO \geq 0.6$ ; y muy bajo para  $KMO < 0.5$  [23].

**Test de esfericidad de Barlett.-** Para comprobar que las correlaciones entre las variables son distintas de cero de modo significativo, se comprueba si el determinante de la matriz es distinto de uno, es decir, si la matriz de correlaciones es distinta de la matriz unidad.

Si las variables están correlacionadas hay muchos valores altos en valor absoluto fuera de la diagonal principal de la matriz de correlaciones, además, el determinante es menor que 1 (el máximo valor del determinante es 1 si las variables están incorreladas) [24].

**El test de Barlett.-** Realiza el contraste: aceptación de hipótesis o rechazo de esta misma.

El determinante de la matriz da una idea de la correlación generalizada entre todas las variables. El test se basa en la distribución  $X^2$  de Pearson donde los valores altos llevan a rechazar la hipótesis nula  $H_0$ , así, la prueba de esfericidad de Barlett contrasta si la matriz de correlaciones es una matriz identidad, que indicaría que el modelo factorial es inadecuado.

**Tabla 2** Prueba de KMO y Bartlett.

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		0.912
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	92.031
	Gl	15
	Sig.	0.000

En la Tabla 2 observamos que los datos se ajustan bien al estadístico con 0.912, el valor de  $X^2$  es un valor alto lo que indica que se descarta la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, la significación de 0.000 es adecuada al análisis de componentes principales [24].

**Rotación de los componentes.**- El PCA se define como un nuevo conjunto de variables, combinación lineal de las originales, denominadas componentes. Mediante esta definición, y su formalismo matricial, estos componentes se pueden considerar como unos nuevos ejes que representan la nube de puntos que forman las variables originales. Así la proyección de la nube de puntos sobre los componentes sirve para interpretar la relación entre las diferentes variables. Sin embargo, su interpretación, a veces, puede llegar a ser muy compleja, por lo que se puede recurrir a la rotación de los componentes [25].

Existen varias formas de rotar los ejes: VARIMAX, QUARTIMAX, rotaciones oblicuas, EQUAMAX, PROMAX, etc. La más utilizada en geoquímica es la rotación VARIMAX, la cual consigue que cada componente rotado presente correlaciones sólo con unas cuantas variables. Esta rotación es la más frecuentemente utilizada, y es adecuada cuando el número de componentes es reducido [25].

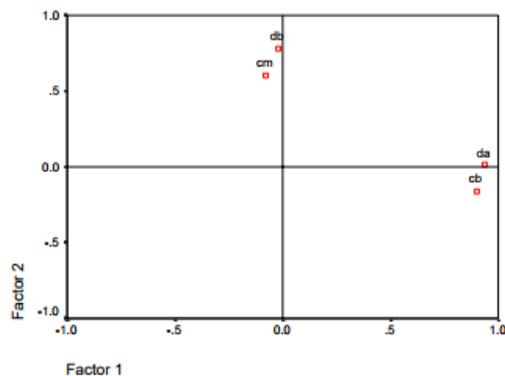
Análisis de componentes rotados. Muestra las correlaciones residuales (la diferencia entre la correlación observada y la reproducida). Como se observa en la Tabla 3.

**Tabla 3** Matriz de componentes rotados.

Componentes		
DA	0.72	-0.64
DB	0.74	-0.07
DM	0.94	0.19
DC	0.95	0.18

Método de rotación: Varimax con normalización Kaiser.<sup>a</sup>

Representación bidimensional de las saturaciones factoriales para los 4 primeros componentes, Figura 5 [26].



**Figura 5** Componentes rotados.

### 2.8.2 Análisis clúster

Para dejar en claro la interpretación del análisis clúster, el ejemplo nos ayudara a comprender esta técnica estadística.

Un científico social desea estudiar los efectos del número de medios de comunicación en Universidades y la tasa de alfabetización en la admisión de la población a la educación superior. Para diez ciudades de todo el mundo, el científico determina el número de ejemplares de periódicos, radios y televisores por cada 1,000 personas. El científico también

registra la tasa de alfabetización y si hay una universidad en cada ciudad. El científico desea reducir el número total de variables mediante la combinación de las variables que tienen características similares [27].

Interpretación de resultados.

La Tabla 4 muestra los conglomerados que se unieron en cada paso, la distancia entre los conglomerados y la similitud de los conglomerados.

El nivel de similitud disminuye ligeramente del paso 1 (93.9666) al paso 2 (93.1548), luego disminuye abruptamente en el paso 3 (87.3150), cuando el número de conglomerados cambia de 3 a 2, Figura 6.

La distancia entre los conglomerados unidos aumenta ligeramente en alrededor de 0.017 del paso 1 al paso 2, luego aumenta más rápido en el paso 3, cuando el número de conglomerados cambie de 3 a 2.

Los resultados de distancia y similitud indican que 3 conglomerados son razonablemente suficientes para la partición final. Si el sociólogo considera que esta agrupación tiene sentido intuitivo, entonces es probable que sea una elección adecuada. El dendrograma (Figura 6) muestra la información de la tabla en forma de un diagrama de árbol.

**Tabla 4** Acomodo de clúster según su similitud.

Paso	Numero de conglomerados	Nivel de semejanza	Nivel de distancia	Conglomerados incorporados	Nuevos conglomerado
1	4	93.97	0.12	2	3
2	3	93.15	0.13	4	5
3	2	87.31	0.25	1	4
4	1	79.811	0.4	1	2

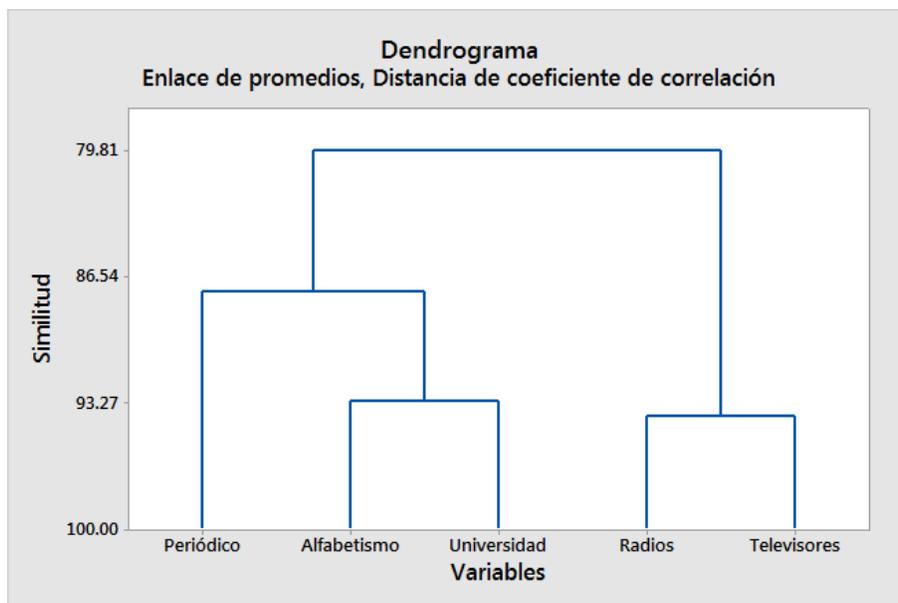
El sociólogo debe volver a ejecutar el análisis y especificar 3 conglomerados en la partición final. Cuando se especifica una partición final, SPSS (*Statistical Product and Service*

*Solutions*) software utilizado para el tratamiento de datos y análisis estadístico, muestra Tablas adicionales que describen las características de cada conglomerado incluido en la partición final, Tabla 5 [27].

**Tabla 5 Finalización de conglomerados.**

partición final	
	variable
conglomerado 1	periódico
conglomerado 2	radios y televisores
conglomerado 3	alfabetismo y Universidad

Más información en el enlace: <http://blog.minitab.com/blog/quality-data-analysis-and-statistics/cluster-analysis-tips>



**Figura 6 Dendrograma.**

### **2.8.3 Pruebas de hipótesis, prueba t para muestras independientes**

En términos generales, las pruebas de hipótesis se utilizan cuando se quiere determinar, a través de una muestra, la totalidad de la población posee una característica determinada, además de aquellas ocasiones en que esto no es así. La tabla 6 muestra las medias, desviaciones estándar y el número de muestras.

La prueba de hipótesis consta de dos afirmaciones: Una hipótesis del investigador (que se identifica como H1) y una hipótesis nula (identificada como H0). Cada una de estas afirmaciones puede escribir en términos normales, pero también se debe identificar como notación matemática [28].

**Tabla 6 Estadísticas de grupo calificaciones.**

zonas	N	Media Bq	Desviación estándar	Media de error estándar
Hombre	30	48.17	49.06	11.65
Mujer	45	53.53	42.81	11.44

**Tabla 7 Prueba t muestras independientes calificaciones.**

	Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias		
	F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)
Varianzas iguales	.687	.452	-.857	22	.401
Varianzas diferentes			-.879	21.126	.389

Las calificaciones tienen una varianza igual ya que el valor Sig, es mayor a 0.05, dado este valor tenemos que pasar a la columna de igualdad de medias en la parte superior al sig. (bilateral) para ver que también las medias son iguales ya que posee un valor mayor de 0.05. Tabla 7.

## ***CAPITULO 3 MATERIALES Y MÉTODO***

### ***3.1 Medición de la actividad de radiación gamma in situ***

La mayoría de los espectros fueron realizados en el trabajo de Mapeo preliminar in situ de emisores gamma en el Estado de Zacatecas, trabajo desarrollado por (Rivera, Ríos et al. 2011) [29].- los espectros del Municipio de Ojocaliente y Panfilo Natera fueron obtenidos en el 2016, la medición gamma *in situ* se realizo colocando el detector 2:00 horas, a una altura de 1 metro en el lugar de medición, el detector comienza a detecta la radiación de isotopos presentes en el terreno a partir de un radio de 10 metros con 30 centímetros de profundidad, Figura 8 [30].

#### ***3.1.1 Sitio de estudio***

El estado de Zacatecas se localiza en la región Centro-Norte de la República Mexicana, colindante de los estados de: Jalisco y Aguascalientes al Sur, San Luís Potosí al Oriente, Coahuila al Norte, y Durango al Noreste y Oeste, Figura 7. Cuenta con una superficie de 75,040 km<sup>2</sup> que corresponden al 3.9% de la extensión territorial de todo el país y una división política de 58 municipios. La altura promedio en el estado es de 2,100 msnm (metros sobre el nivel del mar), pero la ciudad de Zacatecas se encuentra a 2,496 msnm. Sus coordenadas

extremas son 25°09' (25.15) al Norte, 21°04' (21.066) al Sur de latitud 5Norte; al Este 100°49' (100.82) y al Oeste 104°19' (104.31) de longitud Oeste [31].

En el territorio predomina generalmente el clima seco, aunque en las regiones del sur se puede disfrutar de un clima más generoso, puesto que oscila entre templado y subhúmedo. A pesar de estas excepciones regionales, en el estado predomina una temperatura promedio anual de 16° C [32].



**Figura 7** Territorio y división municipal del estado de Zacatecas.

Tres cuartas partes del territorio zacatecano corresponden a zonas áridas y semiáridas. En la parte central del estado se localizan los suelos castaños, abundantes en las zonas semiáridas y que se caracterizan por tener una capa de caliche o cal suelta. Este tipo de suelo es favorable para el desarrollo de la agricultura y de la ganadería. Hacia el Noreste de Zacatecas se encuentran los suelos característicos de las zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México [33].

Además, la composición principal de la superficie es como sigue: el 39.06% pertenece a la era Cenozoico, periodo Cuaternario, compuesta por rocas de origen sedimentarias (Aluvias); el 38.66 % pertenece también a la era Cenozoico, periodo Terciario, y está compuesta por rocas de origen Ígnea Extrusiva (Riolita-Toba ácida); y el 11.42 % pertenece a la era

Mesozoico, periodo Triásico, compuesta por rocas de origen Metamórficas (Esquisto). Los Suelos dominantes en el territorio corresponden a las siguientes unidades y subunidades respectivamente: Castañozem-Lúvico (35.12 % de la superficie), Regosol- Calcárico (7.74 % de la superficie.), Regosol- Eútrico (53.36 % de la superficie.), y Xerosol-Lúvico (3.78 % de la superficie.), todos de una clase textura media.

En el estado de Zacatecas se presentan una gran diversidad de tipos de yacimientos metálicos (depósitos de plata, plomo, zinc, oro y cobre), y no metálicos (fosforitas) [34].

### ***3.1.1.1 Criterios de evaluación y características de las mediciones in situ***

Los municipios fueron seleccionados en 3 categorías con el fin de evaluar la actividad de cada lugar, para ello se decidió medir la concentración de la radiación gamma natural en zonas conurbadas, arqueológicas y rurales de diferentes Municipios del Estado de Zacatecas. Los lugares de medición se encuentran registrados en las Tablas 8 y 9 donde se presenta la información específica de cada sitio de muestreo.

### ***3.1.2 Arreglo experimental para la adquisición de espectros***

Para la adquisición de los espectros gamma in situ, el arreglo experimental se estructuró de la siguiente manera: se utilizó un detector de Germanio Hiperpuro de la Compañía Canberra, Modelo 3522 montado sobre el trípode, tomando la referencia a 1 metro sobre el nivel del suelo, Figura 8. Además, el detector fue colocado en posición vertical con la cara del cristal hacia el suelo, haciendo las conexiones necesarias del detector al NIM/BIM (fuente de alto voltaje y amplificador), alimentada mediante batería de gel OptimaD75/25 y se conectó al inversor de poder electrónico Invercom, proporcionando una salida regulada de 120 Volts AC. Para alimentar todos las herramientas (equipo electrónico) del sistema. Como lo muestra la Figura 9.



*Figura 8 Arreglo experimental in situ.*



*Figura 9 Gabinete NIM portátil modelo 100. Batería de gel Optima D75/25, inversor de poder electrónico Invercom y soporte electrónico regulado Micro SR 480.*

### ***3.1.3 Adquisición de espectros.***

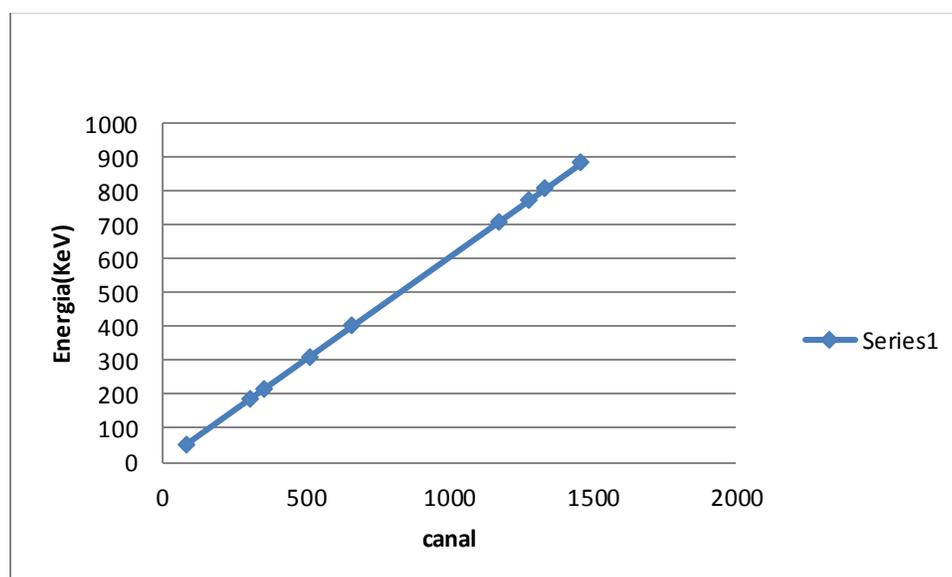
La adquisición de los espectros se estableció bajo las siguientes condiciones operacionales del sistema: El voltaje suministrado al detector fue de -3900 Volts, polaridad negativa. Las condiciones de amplificación fueron para la ganancia gruesa 2 y para la ganancia fina 2.7, el tiempo de formación de pulsos 4  $\mu$ s, el tiempo de adquisición para cada uno de los espectros fue de 2 horas y una altura de 1 metro del detector al suelo, tiempo requerido para obtener un error relativo menor al 2% para el pico del  $^{40}\text{K}$  tomando como referencia (Tyler and Coplestone 2007) [30].

### 3.1.4 Calibración del Sistema

Para medir la energía e intensidad de los fotones gamma emitidos por fuentes o muestras radiactivas es necesario que el detector este calibrado en energía y eficiencia.

#### 3.1.4.1 Energía

La Figura 10 reporta la calibración del sistema en energía cuyo valor de la  $\chi^2$  fue de  $\chi^2 - 7.181e^{-010}$  y su FWHM de  $4.297e^{-002}$  estos datos estableció el sistema como óptimos para las subsecuentes mediciones en el desarrollo del trabajo, Figura 10.

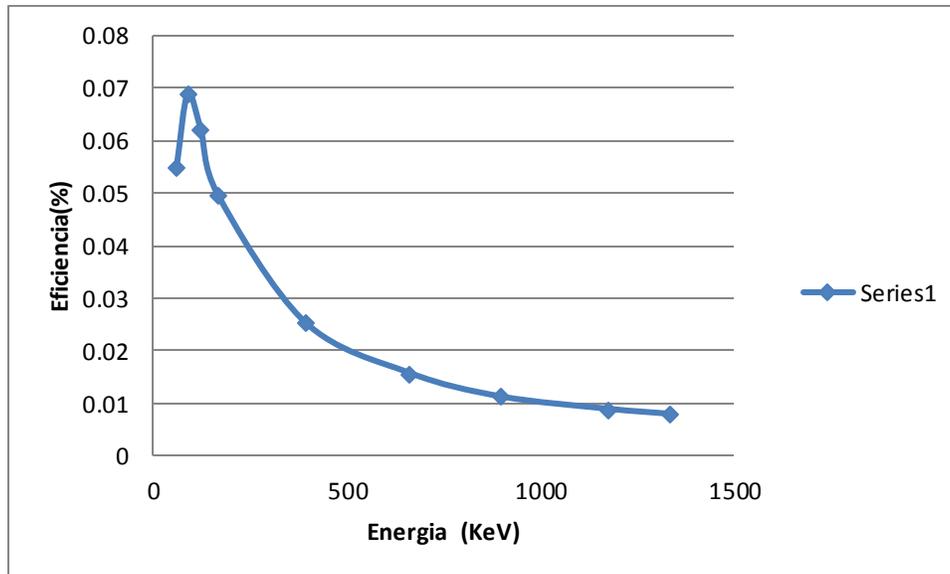


*Figura 10* Curva de calibración en energía.

#### 3.1.4.2 Eficiencia

Otro parámetro importante para la calibración del sistema es la eficiencia. la siguiente Tabla muestra la curva de calibración en eficiencia.

Nuestro valor de comportamiento de la curva de calibración es diferente a la de “S. Landsberger et al., 2016” [38]. Aunque este dato fue utilizado para medir NORM Y TENORM. La Figura 11 ejemplifica la curva de calibración que se utilizó para eficiencia.



*Figura 11 Curva de calibración en eficiencia.*

### ***3.2 Manejo de Espectros y Análisis de Datos.***

La adquisición de espectros se realiza con una tarjeta AccuSpec A, montada en un computador personal y el programa Genie 2000 que controla la adquisición y el análisis de espectros. El análisis de los espectros se realizó mediante una secuencia de análisis óptima para espectros de radiación gamma ambiental elaborada ex profeso para el tratamiento de los espectros [35,36].

La actividad de la radiación gamma ambiental por lo general es de baja intensidad, por lo que se requiere de un sistema de espectrometría de rayos gamma basado en un detector de Ge HP con la mayor eficiencia posible, para estar en la capacidad de obtener mediciones de actividad con un alto grado de confianza. Los espectros de radiación gamma natural presentan un gran número de fotopicos, de los cuales se pone especial atención en aquellos que nos permitan conocer la actividad de los radionúclidos de interés que para nosotros son:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  y  $^{137}\text{Cs}$ .

Convencionalmente, el  $^{238}\text{U}$  se determina a partir de los fotopicos de sus descendientes  $^{214}\text{Pb}$  con energías de 295.22 y 351.93 keV y  $^{214}\text{Bi}$  con la energía 609.31 keV. Igualmente, el  $^{232}\text{Th}$  se determina por la medición de los fotopicos 583.19 y 860.56 keV del  $^{208}\text{Tl}$ , así como los

fotopicos 911.2 y 968.96 keV del  $^{228}\text{Ac}$ ; bajo la consideración de la existencia de equilibrio secular entre los isótopos padres y sus descendientes, ver Figuras 1 y 2. El  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{40}\text{K}$  se obtienen en forma directa con los fotopicos de energías 661.66 y 1460.82 keV, respectivamente. La distribución de radionúclidos obtenidos se asemeja a la reportada en el trabajo de (SureshGandhi, M., et al.2014) [37].

### ***3.2.1 Identificación de radionúclidos de origen natural y antropogénico***

El manejo de los distintos radionúclidos obtenidos a partir de la monitorización *in situ*. Se utilizó el software SPSS.23 para realizar el análisis estadístico pertinente de los datos. Con el cual se realizo un análisis estadístico descriptivo, comparación de medias y varianzas. Los datos fueron procesados por el método Varimax normalizado para la evaluación de PCA. Tomando en consideración el área neta de los picos como un parámetro de selección. Los espectros obtenidos de los dos sitios de muestreo *in situ* se representan en las siguientes Figuras 12 y 13, cada uno de estos espectros muestran los distintos radio isotopos hijos de la serie de decaimiento del  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$  presentes en los suelos de estos dos municipios.

**Tabla 8** Localización y descripción de Municipios medidos.

Sitio de Medición	Localización (Coordenadas geográficas)			Descripción General	Tipo
	Longitud	Latitud	Altura (msnm)		
<b>Las Lajas</b>	-102.8455	22.6838	2151	Sitio localizado en el municipio Jerez, ubicado en el centro del Estado, zona pecuaria.	Rural
<b>San Benito</b>	-101.7213	23.9030	1957	Sitio localizado en el municipio Mazapil, situado en la región Noreste del Estado.	
<b>San Ramón</b>	-102.525	22.6765	2312	Sitio localizado, en la periferia del municipio de Guadalupe, de fácil acceso, constituido principalmente por tierras de cultivo.	
<b>Sombrete</b>	-103.6606	23.6570	2440	Municipio localizado en la parte Noroeste del Estado.	
<b>Villa de Cos</b>	-102.3592	23.3026	1979	Municipio localizado al lado Noreste del Estado.	
<b>Ojocaliente</b>	-102.5835	22.5835	2108	Municipio localizado en la región centro del Estado.	
<b>Pánfilo Natera</b>	-102.5571	22.3899	2090	Municipio localizado al sureste del Estado.	

**Tabla 9** Localización y descripción de Municipios medidos.

Sitio de Medición	Localización (Coordenadas geográficas)			Descripción General	Tipo
	Longitud	Latitud	Altura (msnm)		
<b>Cerro de la Virgen</b>	-102.5695	22.7417	2666	Sitio localizado en la periferia de la ciudad de Zacatecas, zona rocosa y de pastizales.	Conurbada Zac-Gpe
<b>Condesa</b>	-102.4669	22.7602	2275	Sitio localizado en la zona conurbada del municipio de Guadalupe, se considera zona habitacional urbana.	
<b>La Zacatecana</b>	-102.4865	22.7224	2236	Sitio localizado, en la periferia del municipio de Guadalupe, constituido por tierras de cultivo.	
<b>Siglo XXI</b>	-102.644	22.7739	2307	Sitio localizado en la zona conurbada de la capital del Estado.	
<b>Vetagrande</b>	-102.5523	22.8255	2632	Municipio ubicado en la región central del Estado, zona rocosa.	
<b>La Quemada</b>	-102.8209	22.4553	2121	Sitio arqueológico situado en el municipio de Villanueva, de acceso restringido, con el permiso obtenido, la medición se pudo llevar a cabo dentro del mismo.	Arqueológica
<b>AltaVista</b>	-103.9447	23.4780	2172	Sitio arqueológico situado en el municipio de Chalchihuites.	

# ***CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN***

## ***4.1 Análisis Estadístico***

### ***4.1.1 Estadística descriptiva***

Los datos obtenidos de los 14 municipios del Estado de Zacatecas se realizó un análisis estadístico descriptivo el cual se presenta en la Tabla 11. La media está en unidades de Bq para todos los radioisótopos presentes en los suelos del Estado. El  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Tl}$  y  $^{40}\text{K}$  poseen mediana mayor a la media indicando que la distribución viene siendo asimétrica con cola a la izquierda mientras que el  $^{228}\text{Ac}$  y  $^{137}\text{Cs}$  al contrario de los radioisótopos ya mencionados estos poseen una media mayor a la mediana por lo cual la distribución es asimétrica con cola a la derecha. Dado a que la mayoría de radioisótopos son asimétricos el  $^{228}\text{Ac}$  y  $^{137}\text{Cs}$  radionúclidos que poseen un mayor rango de asimetría pues su valor es de 1.086 y 1.235 respectivamente, estos valores son mayores a cero indicando que estos radionúclidos se alejan de una distribución simétrica.



El error estándar de la media indica la propagación de las mediciones dentro de una muestra, el  $^{228}\text{Ac}$  posee un valor alto indicando que no existe mucha propagación en sus mediciones. El error estándar es inversamente proporcional al tamaño de la muestra, la desviación estándar es menor a las medias dándonos un menor rango de dispersión de los radionúclidos de estudio. La curtosis es una medida que sirve para analizar el grado de concentración que presentan los valores de una variable analizada alrededor de la zona central de la distribución de frecuencias  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  y  $^{137}\text{Cs}$  poseen una distribución normal mientras que el  $^{40}\text{K}$  tiene poca concentración de datos en la media presentando una forma muy achatada (Leptocúrtica),  $^{228}\text{Ac}$  y  $^{208}\text{Tl}$  no tiene una buena concentración de datos en la media, a diferencia del  $^{40}\text{K}$  estos radionúclidos poseen una forma muy achatada (Platicúrtica).

#### 4.1.2 Correlación de Pearson

Se calculó la matriz de correlación entre cada uno de los radioisótopos identificados y se determinó que el  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  y  $^{214}\text{Bi}$  no tienen relación significativa con ningún radioisótopo como lo muestra la Tabla 1. En la Tabla 10 de correlación se muestra que el  $^{228}\text{Ac}$  y  $^{208}\text{Tl}$  son altamente significativo el uno con el otro indicando para nosotros un equilibrio secular en la cadena del  $^{232}\text{Th}$  en los distintos suelos medidos del estado de Zacatecas, en el caso de los radioisótopos de la cadena de desintegración del  $^{238}\text{U}$  ( $^{214}\text{Bi}$  y  $^{214}\text{Pb}$ ) no se relacionan significativamente entre ellos.

**Tabla 10** Matriz de correlaciones.

		$^{214}\text{Bi}$	$^{214}\text{Pb}$	$^{228}\text{Ac}$	$^{208}\text{Tl}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$
Correlación	$^{214}\text{Bi}$	1.00	0.45	0.54	0.55	0.06	-0.18
	$^{214}\text{Pb}$	0.45	1.00	0.55	0.55	0.01	0.38
	$^{228}\text{Ac}$	0.54	0.55	1.00	0.99	-0.05	0.53
	$^{208}\text{Tl}$	0.55	0.55	0.99	1.00	-0.03	0.53
	$^{137}\text{Cs}$	0.06	0.01	-0.06	-0.03	1.00	0.16
	$^{40}\text{K}$	-0.18	0.38	0.53	0.52	0.16	1.00



*Tabla 11 Estadística descriptiva.*

		<sup>214</sup> Bi	<sup>214</sup> Pb	<sup>228</sup> Ac	<sup>208</sup> Tl	<sup>137</sup> Cs	<sup>40</sup> K
N	Válido	14	14	14	14	14	14
Media en Bq		51.14	63.71	89.52	25.99	4.63	2269.15
Error estándar de la media		5.45	7.55	15.01	4.02	0.71	279.31
Mediana		53.03	68.26	85.58	26.88	3.41	2367.41
Moda		11.98 <sup>a</sup>	13.91 <sup>a</sup>	9.32 <sup>a</sup>	2.85 <sup>a</sup>	2.05 <sup>a</sup>	445.46 <sup>a</sup>
Desviación estándar		20.38	28.26	56.15	15.05	2.65	1045.10
Varianza		415.57	798.81	3153.31	226.49	7.03	1092243.54
Asimetría		0.011	0.29	1.09	0.67	1.24	-0.01
Error estándar de asimetría		0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59
Curtosis		0.19	0.25	2.24	1.24	0.93	-0.78
Error estándar de curtosis		1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
Rango		76.23	103.62	223.39	58.89	8.87	3587.46
Mínimo		11.98	13.91	9.32	2.85	2.05	445.46
Máximo		88.21	117.53	232.71	61.73	10.92	4032.92

### 4.1.3 Prueba KMO y Bartlett

La prueba de KMO y Bartlett ofrece datos para ver si se ajustan al PCA, por consiguiente el valor calculado fue de 0.735 lo que establece que el modelo matemático es ajustable. Por otra parte, el valor de la prueba Bartlett fue de 0.000, mismo que establece que se descarta la hipótesis nula establecida en el proyecto, por consiguiente se acepta la hipótesis alternativa. Como se observa en la Tabla 12.

**Tabla 12 Prueba de KMO y Bartlett.**

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		0.735
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	89.679
	Gl	15
	Sig.	0.000

### 4.1.4 Análisis de componentes rotados

Para el cálculo del PCA los valores obtenidos se representan en la siguiente Tabla 13. La interpretación de la relación entre las diferentes variables se proyectan en una nube de puntos en el cual indica que el  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  y  $^{214}\text{Pb}$  se encuentran dispersos y rotados mientras que el  $^{228}\text{Ac}$  y  $^{208}\text{Tl}$  se encuentran sobrepuestos, esto determina un comportamiento para el equilibrio secular en la cadena del  $^{232}\text{Th}$  y un desequilibrio secular para la cadena del  $^{238}\text{U}$ . “SureshGandhi et al., 2014” [37], hizo el análisis con el mismo análisis de componentes.

La Tabla 13 está en componentes X, Y y Z y en la Figura 14 observamos la distribución en un eje de tres dimensiones.

**Tabla 13 Matriz de componente rotados.**

	Componente
--	------------

	1	2	3
$^{214}\text{Bi}$	0.72	-0.64	0.12
$^{214}\text{Pb}$	0.74	0.07	0.06
$^{228}\text{Ac}$	0.94	0.19	-0.07
$^{208}\text{Tl}$	0.95	0.18	-0.05
$^{137}\text{Cs}$	-0.02	0.05	0.99
$^{40}\text{K}$	0.43	0.86	0.13

Método de rotación: Varimax con normalización Kaiser.<sup>a</sup>

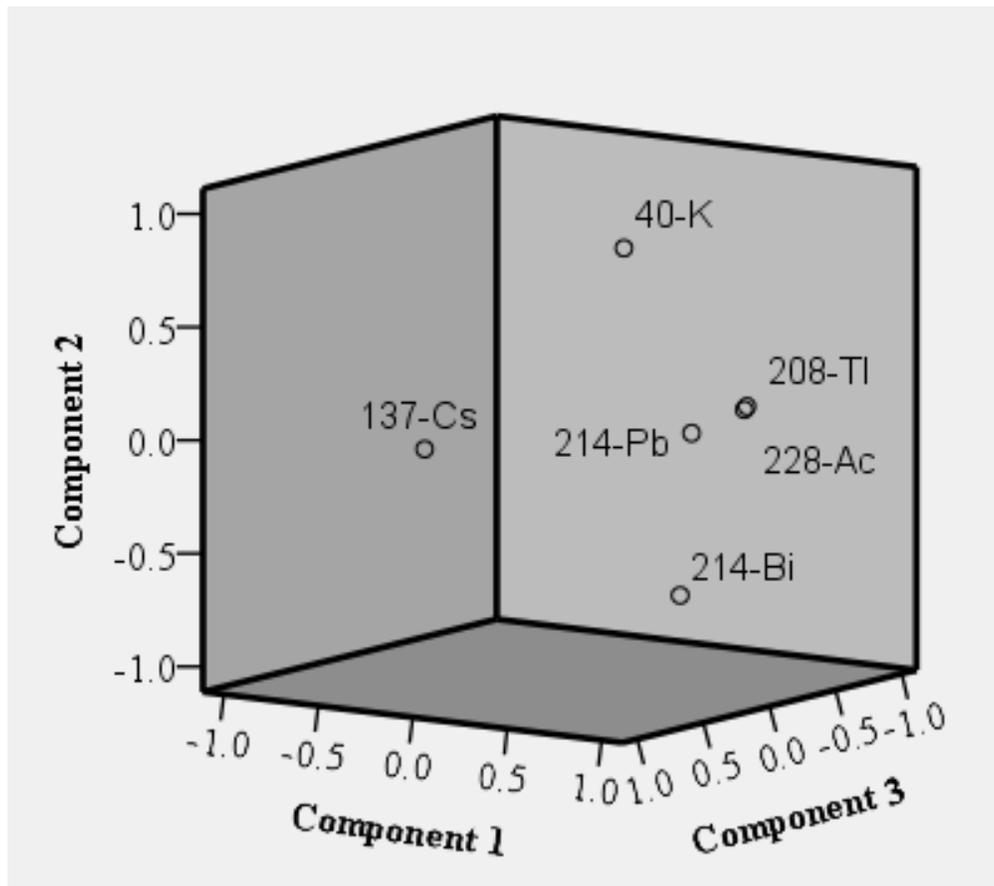


Figura 14 Gráfico de componentes rotados.

## 4.2 Análisis Clúster

Este análisis nos permitió agrupar las zonas de estudio de acuerdo a sus similitudes en cuestión de las actividades de radionúclidos estudiados, la Tabla 14 nos muestra las similitudes en porciento

**Tabla 14** Acomodo de clúster según su similitud.

Pasos	Numero de clúster	Nivel de similitud	Nivel de distancia	Clusters unidos	Nuevo cluster	Clúster	Clúster
1	13	95.36	0.32	2	5	2	2
2	12	91.33	0.61	8	10	8	2
3	11	88.87	0.78	2	8	2	4
4	10	88.83	0.78	1	6	1	2
5	9	86.33	0.95	9	11	9	2
6	8	78.19	1.52	2	9	2	6
7	7	75.34	1.72	2	3	2	7
8	6	73.57	1.85	1	14	1	3
9	5	64.43	2.48	1	4	1	4
10	4	41.67	4.08	2	7	2	8
11	3	25.95	5.18	12	13	12	2
12	2	13.47	6.05	2	12	2	10
13	1	0	6.99	1	2	1	14

Dadas las similitudes el Análisis Clúster se divide en tres grupos de los cuales la Tabla 15 muestra La división se realizo de acuerdo al grado de semejanza que existe entre los datos de los radionúclidos y las zonas donde fueron obtenidos.

La Tabla 16 muestra los criterios de selección para agrupar a los grupos de acuerdo a las actividades obtenidas de los suelos estudiados.

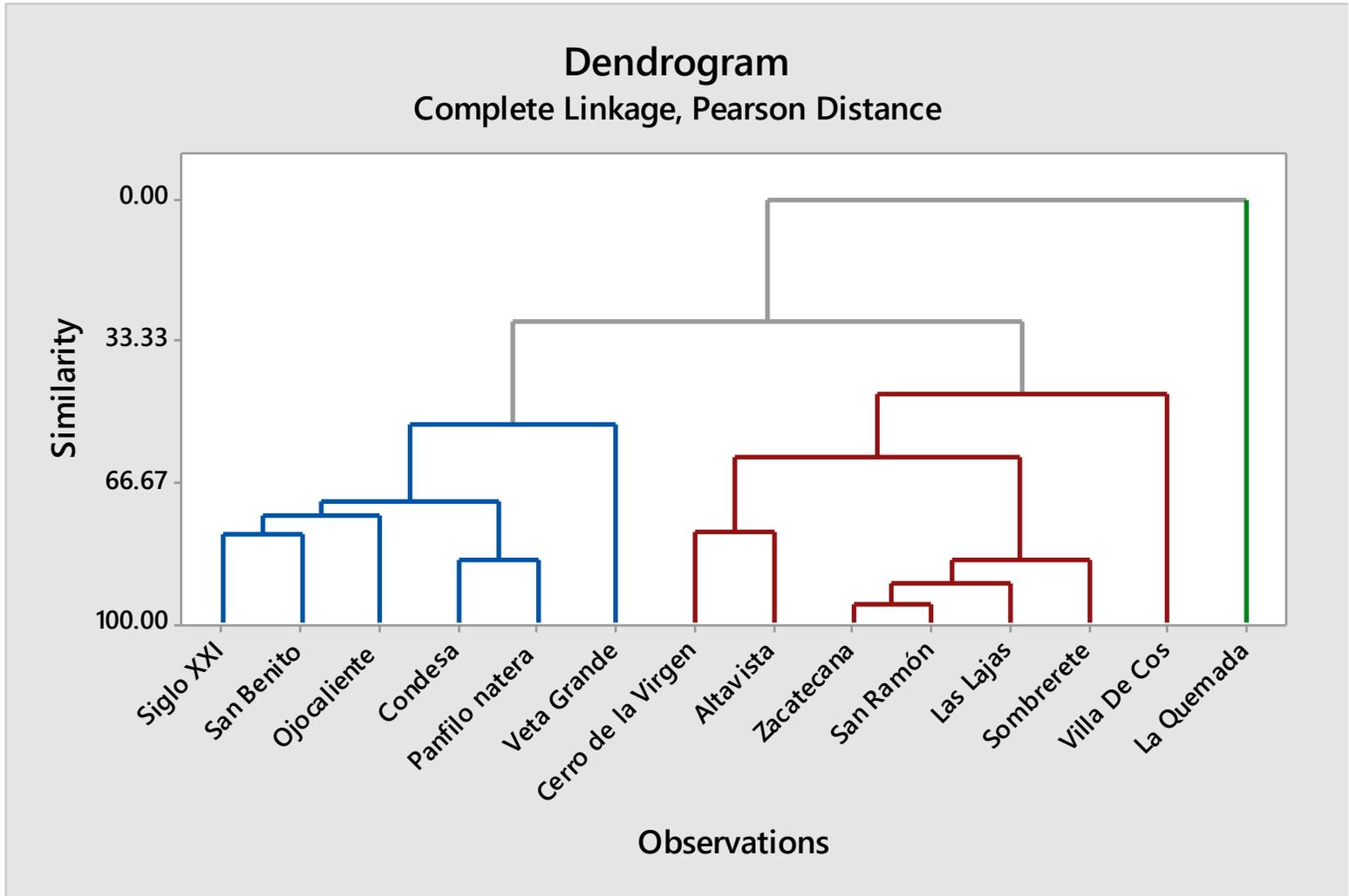
**Tabla 15 Grupos.**

	Numero de observaciones	Dentro de suma de cuadrados de clúster	Distancia media del centroide	Distancia máxima del centroide
cluster1	6	1882295	449.527	916.73
Cluster2	7	4452389	548.355	1597
Cluster3	1	0	0	0

**Tabla 16 Criterio de selección de los clúster en base a la actividad en Bq.**

Variable	Cluster1	Cluster2	Cluster3	centroide
<sup>137</sup> Cs	4.35	5.24	22.05	4.63
<sup>40</sup> K	1440.82	2780.33	3660.85	2269.15
<sup>214</sup> Bi	33.64	61.74	81.90	51.14
<sup>214</sup> Pb	35.04	78.03	110.47	61.93
<sup>228</sup> Ac	49.17	100.8	232.71	88.10
<sup>208</sup> Tl	17.57	28.11	61.74	26.00

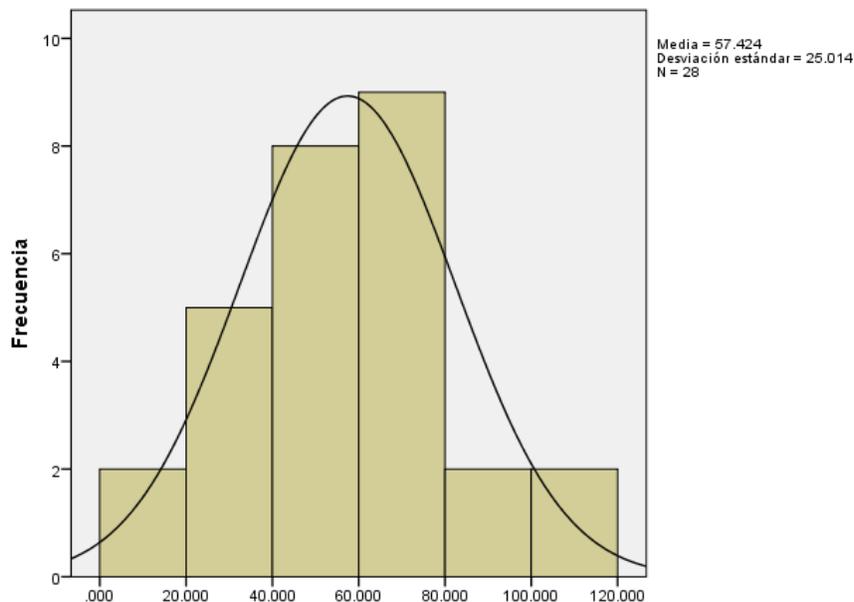
Juntando las Tablas 14, 15 y 16, obtenemos la Figura 15 donde los municipios de la Zacatecana y San Ramón poseen un 95% de similitud en segundo lugar se encuentran las Lajas con un 91%, cada vez las similitudes son más bajas hasta el punto donde comparamos a el sitio Arqueológico la Quemada dando una similitud del 0% en todos los suelos, si se quitase del dendrograma la similitud de los 13 suelos solo tendrán un 30% de similitud por lo cual rechazamos a la hipótesis nula y aceptamos la alternativa, aunque los suelos poseen similitudes no basta para decir que todos los suelos estudiados contienen concentración de radionúclidos artificiales y naturales emisores gamma en mismas concentraciones, se muestra los mapas en los anexos, algunos sitios poseen corrientes de agua subterráneas que podrían favorecer a la lixiviación del Uranio mientras que otros están secos, los lugares con mayor altitud o menor altitud no representa ninguna variable pues la actividad de estos radionúclidos en el Estado de Zacatecas viéndola en la tabla 26 y el la Figura 15 se homogenizan los distintos Municipios y las zonas estudiadas.



*Figura 15 Dendrograma.*

### 4.3 Histogramas y Gráficos Q-Q

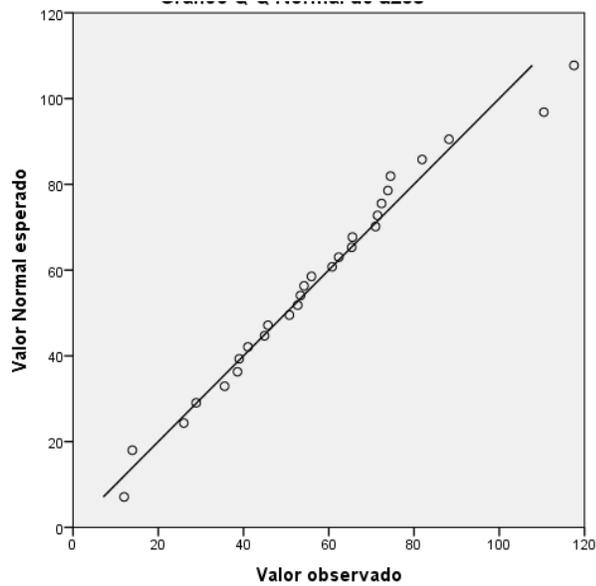
Las Figuras 17, 19 y 21, representan el comportamiento de distribución de frecuencias (radioisótopos medidos). Para obtener la distribución del  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$  se juntaron los dos radioisótopos descendientes emisores gamma registrados en los suelos del Estado de Zacatecas, ponderándolos respectivamente. El  $^{238}\text{U}$  sigue una distribución normal (Figura 16) similar a la reportada por (RAVISANKAR, R., et al. 2014 y M., Adam, A. M. A., &Eltayeb, M. A. H. 2012.SureshGandhi 2014)[37,40,41], solo en cuanto respecta al tipo de distribución presente, el gráfico Q-Q posee tendencia lineal por su valor de asimetría de 0.43 es cercano a cero, Figura 17, Tabla 17, por otra parte de acuerdo a la Tabla 11 los valores de asimetría están cercanos a cero por los radionúclidos de  $^{214}\text{Bi}$  y  $^{214}\text{Pb}$ , teniendo en común una distribución con tendencia a la izquierda contrario a los radionúclidos descendientes del  $^{232}\text{Th}$ .



**Figura 16** Histograma del  $^{238}\text{U}$ .

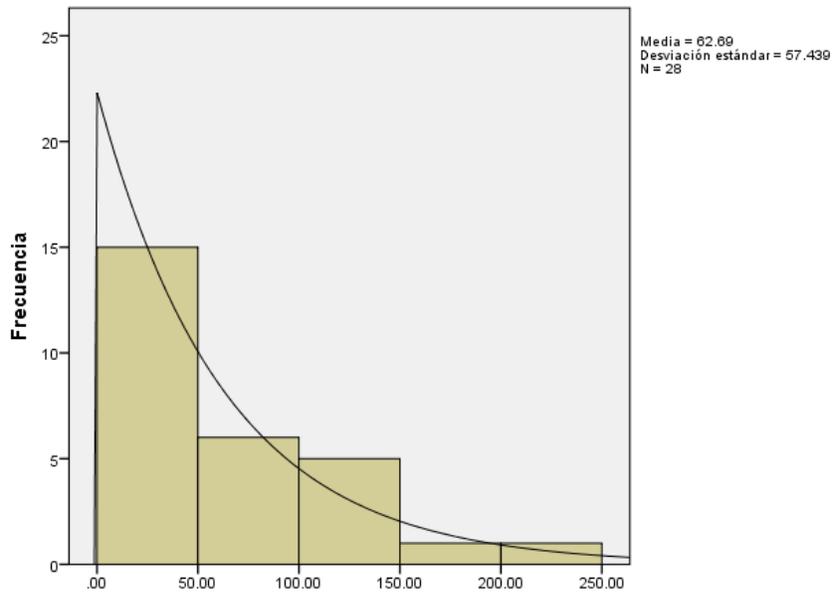
El  $^{232}\text{Th}$  difiere del  $^{238}\text{U}$  dado que este presenta una distribución exponencial Figura 18, esta distribución es muy diferente a la reportada por (SureshGandhi 2014 [37]), este

comportamiento pudiese deberse a la naturaleza implementada en el estudio del presente trabajo, las características son importantes debido por la variabilidad de la composición fisicoquímica de los suelos y zonas de estudio, lo que influye significativamente en los resultados reportados.



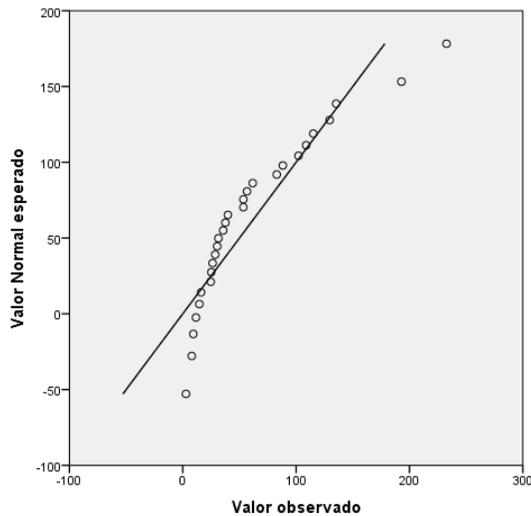
**Figura 17** Gráfico Q-Q Normal de  $^{238}\text{U}$ .

El gráfico Q-Q Figura 19 muestra que no sigue un comportamiento lineal, revisando valor de asimetría es de 1.678 muy alejado al cero.



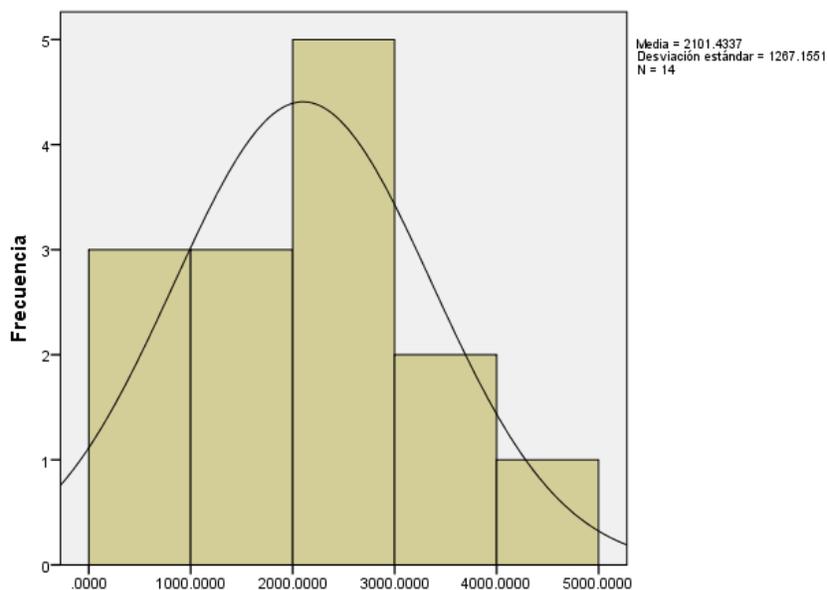
**Figura 18** Histograma del  $^{232}\text{Th}$ .

Esto podría deberse a que el  $^{228}\text{Ac}$  y  $^{208}\text{Tl}$  no son tan cercanos a cero y con respecto a las distribuciones el  $^{228}\text{Ac}$  tiende a la derecha mientras que el  $^{208}\text{Tl}$  a la izquierda, a pesar de que el  $^{232}\text{Th}$  está en equilibrio secular su distribución no es lineal.



**Figura 19** Gráfico Q-Q Normal de  $^{232}\text{Th}$ .

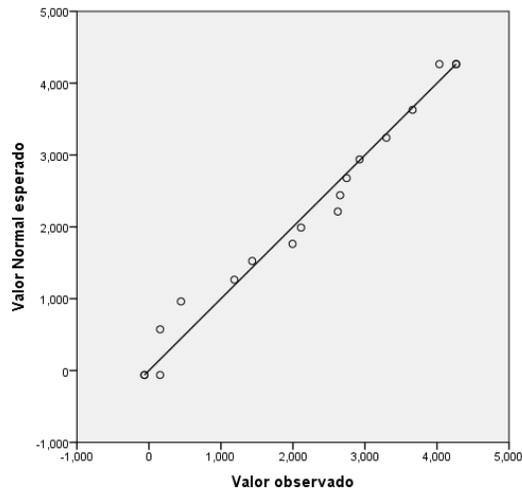
El gráfico posee similitud con la reportada por (Adam, A. M. A., &Eltayeb, M. A. H. 2012 [41]).



**Figura 20** Histograma del  $^{40}\text{K}$ .

Desde un punto de vista el  $^{214}\text{Bi}$  junto con  $^{214}\text{Pb}$  poseen tiempos de semivida similares y están cercanos puesto que el  $^{218}\text{Po}$  decae por  $\alpha$  a  $^{214}\text{Pb}$  y este a su vez por  $\beta$  llegando al  $^{214}\text{Bi}$  ambos cercanos y con valores similares de asimetría y con distribución ala izquierda. El  $^{228}\text{Ac}$  y  $^{208}\text{Tl}$  tienen tiempos de semividas de diferentes tiempos uno en horas y el otro en minutos respectivamente, estos radionúclidos se encuentran muy distantes en el decaimiento del  $^{232}\text{Th}$  por ello su asimetría y distribución tiende a ir a diferentes lados.

Otra explicación de estas diferencias podría darse por el radón, el  $^{222}\text{Rn}$  tiene un tiempo de semivida más grande al  $^{220}\text{Rn}$  lo cual permite que se difunda con mayor facilidad al  $^{220}\text{Rn}$ , dando mayor concentración de radionúclidos al decaer.



**Figura 21** Gráfico Q-Q Normal de <sup>40</sup>K.

Para el <sup>40</sup>K sigue una distribución normal, Figura 20 y una tendencia lineal según el gráfico Q-Q, Figura 21 los trabajos de (RAVISANKAR, R., et al. 2014 y M., Adam, A. M. A., &Eltayeb, M. A. H. 2012.M. SureshGandhi 2014) [37, 40, 41] muestran histogramas similares a los reportados en este trabajo pero solo con el <sup>238</sup>Uy <sup>40</sup>K, el <sup>232</sup>Th no posee mucha similitud con ninguno de estos trabajos debido a la distribución exponencial encontrada.

Los trabajos con lo que se compara son de lugares provenientes del continente Asiático y Africano observando similitudes en algunos histogramas y diferencias en otros aun que los detectores fueron diferentes e iguales al nuestro los trabajos de espectrometría gamma *in situ* poseen diferencias en cuanto al <sup>232</sup>Th acorde al tipo de suelo y clima, Zacatecas pose climas diferentes pues al Sur es más húmedo mientras que la parte del norte es más seco, el trabajo se realizó contemplando la mayor concentración del Estado.

#### ***4.4 Relación Entre La Concentración De La Radiación Gamma Natural Con Parámetro Estadísticos De Comparación y Geográfico***

Los análisis de comparación de resultados, permiten ver cómo es el comportamiento de estos radionúclidos en las diversas zonas estudiadas. La comparación de medias con desviaciones estándar indica si en verdad hay correlaciones estadísticas altamente significativa o poco significativa.

**Tabla 17** Estadístico de  $^{232}\text{Th}$  y  $^{238}\text{U}$ .

		$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$
N	Válidos	28	28
	Perdidos	0	0
Media		57.76	57.42
Error estándar de la media		9.77	4.73
Mediana		36.60	55.08
Moda		2.85 <sup>a</sup>	11.97 <sup>a</sup>
Desviación estándar		51.71	25.01
Varianza		2673.68	625.69
Asimetría		1.67	0.43
Error estándar de asimetría		0.44	0.44
Curtosis		3.49	0.49

La evaluación de los suelos de acuerdo a la serie del  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  y  $^{137}\text{Cs}$  se realiza por el estadístico *t student* para muestras independientes.

La comparación de medias se realizó para las zonas conurbadas y rurales puesto que las arqueológicas solo son dos.

#### 4.4.1 $^{137}\text{Cs}$

La Tabla 18 representa las medias del  $^{137}\text{Cs}$ , la Tabla 19 nos muestra la prueba de *t student* para la comparación de varianzas y la comparación de medias, un grado del 99% no solo para en  $^{137}\text{Cs}$  sino también para  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$ .

Las medias y desviaciones estándar son muy cercanas, aunque el  $^{137}\text{Cs}$  sigue una distribución normal, no se realizó ANOVA puesto que el  $^{232}\text{Th}$  no sigue una distribución igual.

**Tabla 18 Estadísticas del grupo  $^{137}\text{Cs}$ .**

zonas	N	Media Bq	Desviación estándar	Media de error estándar
Conurbada	5	4.6	2.73	1.31
Rural	7	4.81	1.22	0.46

**Tabla 19 Prueba *t* para  $^{137}\text{Cs}$ .**

	Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba <i>t</i> para la igualdad de medias		
	F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)
Varianzas iguales	21.639	0.001	0.396	10	0.700
Varianzas diferentes			0.347	5.002	0.743

Las Tablas 18 y 19 nos dicen que las varianzas son diferentes pero las medias iguales, a pesar de ello no podemos ser concluyentes con el  $^{137}\text{Cs}$  pues se encuentra en los límites de detección, el  $^{137}\text{Cs}$  puede desplazarse a la población humana mediante absorción de raíces por plantas o aguas subterráneas [43]. El  $^{137}\text{Cs}$  tienen mayor probabilidad de ser encontrado en suelos arcillosos pues estos le provén protección física con microagregados. En otros casos la pérdida de  $^{137}\text{Cs}$  se da más por erosión de los suelos que por lixiviación [44].

#### 4.1.2 $^{40}\text{K}$

El  $^{40}\text{K}$  de acuerdo a las Tablas 20 y 21 indican que la varianza y media son iguales en ambas zonas por lo cual podremos decir que no importa el tipo de suelo medido entre zona rural como conurbada encontraremos  $^{40}\text{K}$  en las mismas concentraciones de actividad.

**Tabla 20 Estadísticas de grupo  $^{40}\text{K}$ .**

Zonas	N	Media Bq	Desviación estándar	Media de error estándar
Conurbada	5	2135.93	1343.3	600.74
Rural	7	1762.03	1290.82	487.89

**Tabla 21 Prueba t para  $^{40}\text{K}$ .**

	Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias		
	F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)
Varianzas iguales	0.091	0.769	0.487	10	0.637
Varianzas diferentes			0.483	8.540	0.641

Al  $^{40}\text{K}$  donde se mida siempre está presente y no solo en los suelos del Estado de Zacatecas sino de todo el mundo por ello no es sorpresa encontrarlo con medias y varianzas similares Tabla 21. La significancia en la prueba de Levene y de igualdad de varianza dan un valor mayor a 0.01 indicando que ambos poseen medias y varianzas iguales.

#### 4.4.3 $^{238}\text{U}$

El  $^{238}\text{U}$  sigue distribución normal, aunque la Figura 16 es general en todo tipo de suelo pues se formó con los datos de los 14 municipios, los 5 sitios conurbados y los 7 rurales también muestran histogramas con distribución normal. La Tabla 22 muestra media y desviación estándar.

**Tabla 22 Estadísticas de grupo $^{238}\text{U}$ .**

zonas	N	Media Bq	Desviación estándar	Media de error estándar
Conurbada	10	45.51	21.58	6.83
Rural	14	72.0	38.0	5.77

El  $^{238}\text{U}$  muestran un comportamiento difiere como lo muestra la Tabla 23 la prueba de Levene y de igualdad de media tiene un valor menor a 0.01 indicando que medias y varianzas son diferentes.

**Tabla 23 Prueba t para  $^{238}\text{U}$ .**

	Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias		
	F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)
Varianzas iguales	0.011	0.008	-2.518	22	0.002
Varianzas diferentes			-2.517	19.538	0.002

El uranio no sigue un equilibrio secular tal como lo demostró el PCA en el cual gracias a la Figura 14 y Tabla 10 vemos que los radionúclidos descendientes del  $^{238}\text{U}$  no presentan relación entre ellos y esto se podría deber a que en las diferentes zonas medidas el  $^{238}\text{U}$ , tampoco muestra similitudes y su desequilibrio sigue siendo evidente. Los tipos de suelos al igual que las aguas subterráneas que poseen juegan papel importante como lo veremos en el apartado 4.5.5.

#### 4.4.4 $^{232}\text{Th}$

Se ha mencionado anteriormente por parte del ACP que el  $^{232}\text{Th}$  guarda un equilibrio secular gracias a la Figura 14 y Tabla 10, a diferencia del  $^{238}\text{U}$  que no muestra este equilibrio, la Tabla 24 muestra medias y desviaciones.

**Tabla 24 Estadísticas de grupo  $^{232}\text{Th}$ .**

Zonas	N	Media Bq	Desviación estándar	Media de error estándar
Conurbada	10	39.17479	36.845524	11.651578
Rural	14	53.53270	42.810592	11.441612

El  $^{232}\text{Th}$  según la Figura 18 muestra una distribución exponencial, desacuerdo a la prueba de Levene y de igualdad de medias el  $^{232}\text{Th}$  se encuentra con un valor más alto al 0.01 demostrando que  $^{232}\text{Th}$  se encuentra en equilibrio en ambas zonas.

**Tabla 25 Prueba t para  $^{232}\text{Th}$ .**

	Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias		
	F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)
Varianzas iguales	0.588	0.452	0.857	22	0.401
Varianzas diferentes			0.870	21.126	0.389

#### 4.4.5 Relación de concentración gamma natural por parámetro geográfico

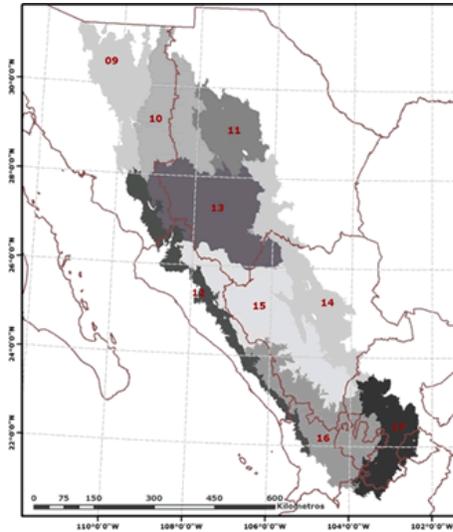
El  $^{137}\text{Cs}$  es un radioisótopo antropogénico del cual creemos que pudo haber migrado de New México a partir de las detonaciones de bombas atómicas de pruebas realizadas por los

Estados Unidos de América en las décadas de los 40, 50 y 60. La Sierra Madre Occidental sigue un eje que corre del Noroeste al sureste llegando al Estado de Zacatecas, Figura 22, como se observa en la Tabla 26, las mayores actividades van de la Sierra Madre Occidental (SMO) del Norte del Estado de Zacatecas y las bajas actividades en ella terminan al Sur.

**Tabla 26** Concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  de mayor a menor.

Municipios	Actividad en Bq	Altitude	sierra	zona
ALTAVISTA	10.92	23.478	SMO	Arqueológica
C. DE LA VIEGEN	8.23	22.742	SMO	Conurbada
CAMPUS SIGLO XXI	7.32	22.774	SMO	Conurbada
SAN BENITO	5.85	23.903	ST	Rural
SOMBRERETE	4.9	23.657	SMC	Rural
VILLA DE COS	3.27	23.303	SMC	Rural
LAS LAJAS	3.1	22.683	SMO	Rural
SAN RAMON	3.03	22.676	SMC	Rural
PANFILO NATERA	2.89	20.987	SMC	Rural
ZACATECANA	2.75	22.722	SMC	Conurbada
OJOCALINTE	2.68	21.081	SMC	Rural
VETAGRANDE	2.49	22.825	SMC	Conurbada
LA CONDESA	2.19	22.761	SMO	Conurbada
LA QUEMADA	2.05	22.455	SMO	Arqueológica

Las altitudes no parecen tener un papel importante ya que estas siguen una tendencia zigzagueante al graficar altitud vs actividad en Bq. En la Figura 23 observamos las 4 Sierras que tiene Zacatecas.



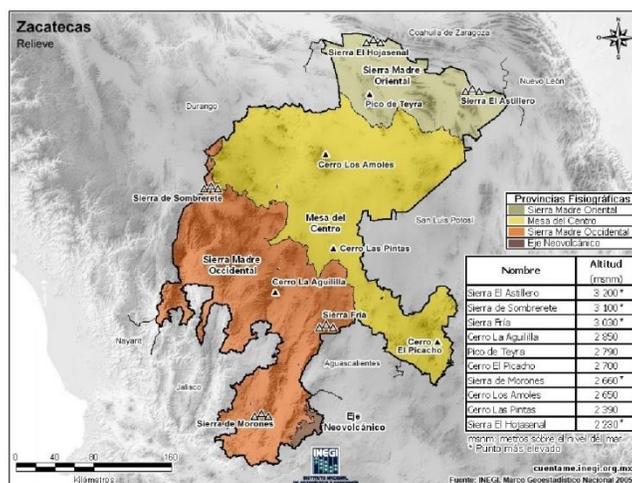
**Figura 22** Sierra Madre Occidental (Copyriht, 2015).

En la región norte de la SMO que pasa por zacatecas, tiene la mayor medición de  $^{137}\text{Cs}$ , en cuanto al sur estas mediciones van bajando, respecto a las mediciones obtenidas en la meseta central la mayoría son mediciones cercanas unas de otras, Tabla 26. En la parte correspondiente al a Sierra transversal (ST) se obtiene también una medida alta lo que viene siendo el municipio de San Benito pero no como las registradas en la SMO en la cual las mediciones de  $^{137}\text{Cs}$  al Norte son altas pero al Sur ya son bajas.

Los patrones climáticos pudiesen ser un factor importante para dar una explicación a la existencia de  $^{137}\text{Cs}$  en el Estado de Zacatecas. Como las imágenes muestran se pude observar rachas de viento y lluvia proveniente de lo que viene siendo la mayor parte de New México y parte de Texas con una trayectoria que pasa a Chihuahua, Durango y terminando en Zacatecas, de acuerdo con la Figura 24.

El  $^{137}\text{Cs}$  se encuentra en niveles de detección de acuerdo al trabajo de (Nava Maldonado Flavio et al 2012) [45]. El desequilibrio radioactivo de la cadena de desintegración del  $^{238}\text{U}$  está dada por parámetros geográficos en el Estado de Zacatecas uno de estos factores podría deberse a la emanación de Radón por los suelos, (Reddizina tiene una emanación promedio de 8.964 E, Bq/m<sup>2</sup>·h, Xerosol 5.112 E, Bq/m<sup>2</sup>·h y Litosol 4.207 E, Bq/m<sup>2</sup>·h) descrito en el trabajo de (Gomes Quiñones Iris Selene et al 2016) [46], otro estudio dice que el radón

generado en la parte externa de la litósfera se difunde a la atmósfera con una tasa constante de aproximadamente  $42 \text{ átomos min}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ .



**Figura 23** Localización de la Sierra Madre Occidental, Oriental y Mesa del centro (INEGI, 2012).

(BERNAL, Juan Pablo, et al.2010) [47]. El Radón  $^{222}\text{Rn}$  con un viento de 16 Km/h puede viajar a un radio 100 km decayendo en  $^{214}\text{Pb}$  y  $^{214}\text{Bi}$  elementos de estado sólido los cuales se depositan en la tierra. El bismuto no se considera tóxico representando una amenaza mínima para el medio ambiente, los compuestos del bismuto son generalmente muy poco solubles, se estima que la corteza terrestre contiene cerca de 0.00002% de bismuto. Los principales depósitos están en Sudamérica [48].

Lugares como Villa de Cos, Cerro de la Virgen, Sombrerete y la Quemada son lugares que registran una mayor actividad de radionúclidos provenientes del  $^{238}\text{U}$ , esto podría deberse a que son lugares de suelo seco y no hay muchos ríos de agua en el subsuelo como lo indican algunos mapas digitales del INEGI en la sección de anexos.

En estos lugares la pérdida por lixiviación de  $^{238}\text{U}$  no es muy factible a diferencia de Ojocaliente, Guadalupe, San Ramón son los municipios con menor actividad de radionúclidos hijos de  $^{238}\text{U}$ , se podría deber a que en ellos hay mucha concentración de agua

y corrientes de agua subterránea lo que incrementa a la pérdida de Uranio por lixiviación y quitando el equilibrio secular de este.



Figura 24 Patrón climático de viento y lluvia por la CONAGUA, 2017.

## Conclusiones

- De acuerdo al PCA es evidente que existe un desequilibrio en la serie del  $^{238}\text{U}$  en todos los municipios del Estado de zacatecas, por otra parte los radionúclidos del  $^{232}\text{Th}$  se encuentran en equilibrio secular.

- El desequilibrio secular en la serie del  $^{238}\text{U}$  no puede deberse a fluctuaciones estadísticas de acuerdo al análisis clúster, los factores podrían deberse a los ríos subterráneos que tienen los diferentes municipios, estos ríos favorecen la migración y lixiviación del  $^{238}\text{U}$ , los municipios que no tienen muchos ríos subterráneos son los que cuentan con mayor concentración de radionúclidos de la serie del  $^{238}\text{U}$ . las diferencias en semividas del  $^{222}\text{Rn}$  y el  $^{220}\text{Rn}$  también son importantes.
- La presencia del  $^{137}\text{Cs}$  se debe a la migración de New México en la década de los 40, 50 y 60, el cual por factores climáticos llegó al Estado de Zacatecas, los municipios que están en la SMO al Norte del Estado son los que tienen mayor concentración de  $^{137}\text{Cs}$  a los que se encuentran al Sur.
- Con relación al Análisis Clúster los suelos de Zacatecas estudiados no poseen mucha similitud como lo muestra el dendograma, quitando a la Quemada la similitud en los suelos solo es de un 30%. Los sitios que presentan mayor actividad son sitios más secos.

## ***Trabajo a seguir***

Ampliar espectros de medición, saliendo del Estado de Zacatecas con el objetivo de poder tener conclusiones más finas sobre el comportamiento de radioisótopos, respecto al  $^{137}\text{Cs}$  es importante tener datos de otros lugares sin cadenas montañosas y ver si sigue los mismos patrones o si su comportamiento es distinto al escrito en este documento.

## ***Bibliografía***

1. Jensen, RH, RG Langlois, WL Bigbee, “Elevated frequency of glycoporphin A mutations in erythrocytes from Chernobyl accident victims”, *Rad Res* **141**, P.129-135 (1995).

2. Pagina wed  
<http://inin.gob.mx/publicaciones/documentospdf/CONTACTO%20NUCLEAR%2061%20Radiaci%C3%B3n%20natural.pdf>
3. Pieadecause García B., Servado Chinchón P., Sanjuán Barbudo, “Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón Parte 1. Radiación externa: índice de riesgo radiactivo”, *CEMENTO HORMIGÓN*, **954**, p.40-62 (2011).
4. Sives, F., Demarchi, S., Bibiloni, A., Errico, L., Taylor, M., & Desimoni, Y. “Determinación de nucleídos emisores gamma en Yerba Mate”, *ANALES AFA*, **20**, P. 211-213 (2008).
5. Michalik, Bogusław. “NORM contaminated are a identification using radionuclides activity concentration pattern in a soil profile”, *Journal of environmental radioactivity*, **169**, p. 9-18 (2017).
6. Página wed <http://gonuke.org/wp-content/toolkits/Radiation%20Protection/chssc/columbia%20basin%20rpt-111/Supplementary%20materials/natural-decay-series.pdf>
7. Olley, Jon M.; Murray, Andrew; Roberts, Richard G. “The effects of disequilibria in the uranium and thorium decay chains on burialdo serates in fluvial sediments”. *Quaternary Science Reviews*, **15**, p. 751-760 (1996).
8. Lieser, Karl Heinrich., *Nuclear and radiochemistry: fundamentals and applications*, WILEY-VCH BERLIN Alemania (2008).
9. Cember Herman, Thomas E. Johnson., introduction to health physics. Mc Graw Hill Medical New York United states of America (2009).

10. Martin, James E. *Physics for radiation protection: a handbook*. WILEY-VCH United states of America (2006).
11. Ehmman, William D., and Diane E. Vance. "Radiochemistry and nuclear methods of analysis" *SciTech Connect*, **65** p.125-132 (1993).
12. Mingarro, E. "Desequilibrio Radiactivo-1 Metodo B-Y" Determinación de la razón eRa/U. Valoración del contenido en U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>". Junta de Energía Nuclear, p. 49-63 (1966).
13. Otero Pazos, Alberto, Estudio de la radiactividad ambiental en suelos de la costa norte de A Coruña y Lugo, Repositorio Universidad de Coruña, Coruña (2014).
14. Benítez, Antonio Hernández." Estudio de disequilibrios isotópicos de series radiactivas naturales en un ambiente granítico Plutón de" El Berrocal"(Toledo)", *enresa*, **10/94**, p.120-145 (1994).
15. Wade, Leroy G.; Pedrero, Ángel Montaña; García, Consuelo Batalla. *Química orgánica*, Pearson prentice hall, España (2004).
16. Chen, J. H., R. Lawrence Edwards, and G. J. Wasserburg, "<sup>238</sup>U, <sup>234</sup>U and <sup>232</sup>Th in seawater, *Earth and Planetary Science Letters* **80.3** p.241-251 (1986).
17. Choppin, Gregory R., Jan-Olov Liljenzin, and Jan Rydberg. *Radiochemistry and nuclear chemistry*, Butterworth-Heinemann, (2002).
18. Fleischer, Robert L. "Alpha-recoil damage and solution effects in minerals: uranium isotopic disequilibrium and radon release." *Geochimica et Cosmochimica Acta* **46** p.2191-2201 (1982).

19. Tsoufanidis, N., *Measurement And Detection Of Radiation*, CRC Taylor & Francis Group Texas USA (1995).
20. Gilmore, Gordon. *Practical gamma-rayspectroscopy*. John Wiley&Sons San Francisco USA (2011).
21. Página web [https://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes\\_principales.pdf](https://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes_principales.pdf) (2000)
22. Página web <https://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Cluster.pdf> (2000)
23. Página wed  
<http://www.ugr.es/~curspss/archivos/AFactorial/PracticasSPSS.pdf>(2017).
24. Santiago F., *Componentes principales*, UAM universidad autónoma de Madrid, Madrid España (2011).
25. Página web <https://web.ua.es/es/lpa/docencia/practicas-analisis-exploratorio-de-datos-con-spss/practica-5-analisis-multivariante-con-spss-reduccion-de-datos-analisis-de-componentes-principales-y-factorial.html>” (2017).
26. Página wed  
<http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/AMult/tema3am.pdf>”(2017).

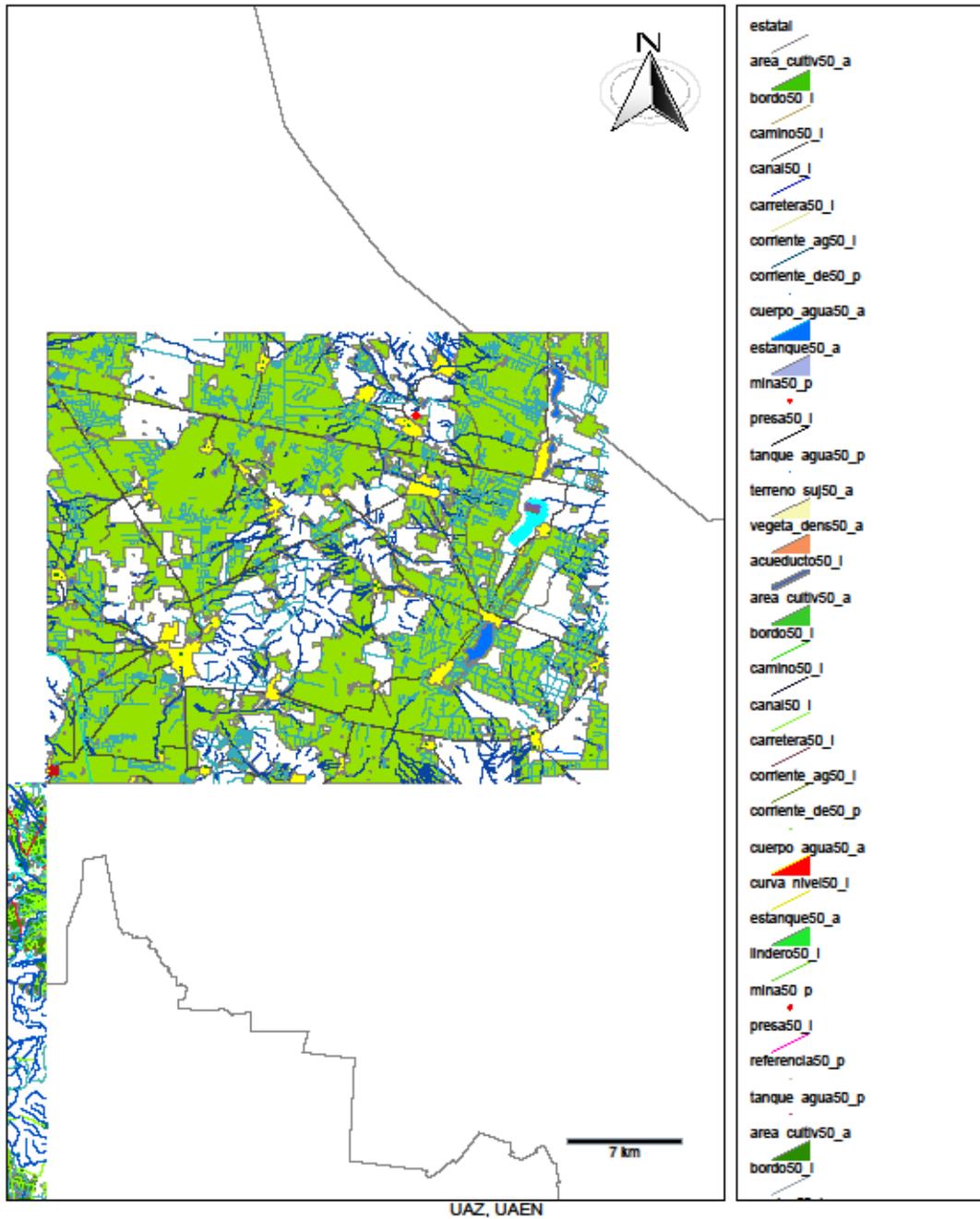
27. Página web <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/multivariate/how-to/cluster-variables/before-you-start/example/> (2017).
28. González González J.A. *Manual Básico SPSS* Universidad de Talca Chile (2009).
29. Rivera M., "Mapeo Preliminar In Situ de Emisores Gamma en el Estado de Zacatecas." *XXII Congreso Annual de la SMN y LAS/ANS Symposium Energia Nuclear: factores clave y retos los cabos Baja California Sur Mexico* (2011).
30. Tyler, A.N. and D. "Copples stone, Preliminary results from the first national in situ gamma spectrometry survey of the United Kingdom", *Journal of environmental radioactivity*, **96**(1): p. 94-102 (2007).
31. Página web [http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/zac/territorio/div\\_municipal.aspx?tema=me&e=32](http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/zac/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=32) (2011).
32. Página web <http://www.zacatecas.gob.mx/site/index.php/zacatecas/aspectos-generales.html> (2011).
33. Página web <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM32zacatecas/index.html> (2010).
34. Página web [http://www.sgm.gob.mx/pdfs/textos\\_guia/51\\_F13-2\\_GF\\_INF.pdf](http://www.sgm.gob.mx/pdfs/textos_guia/51_F13-2_GF_INF.pdf) (1991).
35. Fernando de la Torre A., Conformación de una secuencia de análisis óptima para espectros de radiación gamma ambiental con el programa Genie 2000, UAEN-UAZ, (2010).

36. Paulina Amador Valenzuela, Caracterización y optimización del sistema de espectrometría gamma GeRe3522 del CREN, UAEN-UAZ, (2006).
37. Suresh Gandhi, M., "Measurements of natural gamma radiation in beach sediments of nor the as coast of Tamilnadu, India by gamma ray spectrometry with multivariate statistical approach." *Journal of Radiation Research and Applied Sciences* **7.1** P. 7-17 (2014).
38. Landsberger, S., et al. "Disequilibrium in the uranium and actinium series in oil scale samples." *Journal of environmental radioactivity*, **166**, p. 126-129 (2017).
39. Dragović, Snežana, and Antonije Onjia. "Classification of soil samples according to their geographic origin using gamma-ray spectrometry and principal component analysis." *Journal of environmental radioactivity* **89.2** p.150-158 (2006).
40. Adam, AbdelMajid A., and Mohamed Ahmed H. Eltayeb, "Multivariate statistical analysis of radioactive variables in two phosphate ores from Sudan." *Journal of environmental radioactivity*, **107**, p.23-43 (2012).
41. Ravisankar, R., "Multivariate statistical analysis of radiological data of building materials used in Tiruvannamalai, Tamilnadu, India." *Applied Radiation and Isotopes*, **85**, p. 114-127 (2014).
42. Van Bergeijk, K. E., "Influence of pH, soil type and soil organic matter content on soil-to-plant transfer of radio cesium and-strontium as analyzed by a nonparametric method.", *Journal of Environmental Radioactivity*, **15.3**, p.265-276 (1992).
43. Garcia-Oliva, F., R. Martínez Lugo, and J. M. Maass. "Soil <sup>137</sup>Cs activity in a tropical deciduous ecosystem under pasture conversion in Mexico.", *Journal of Environmental Radioactivity*, **26.1** p. 37-49 (1995).

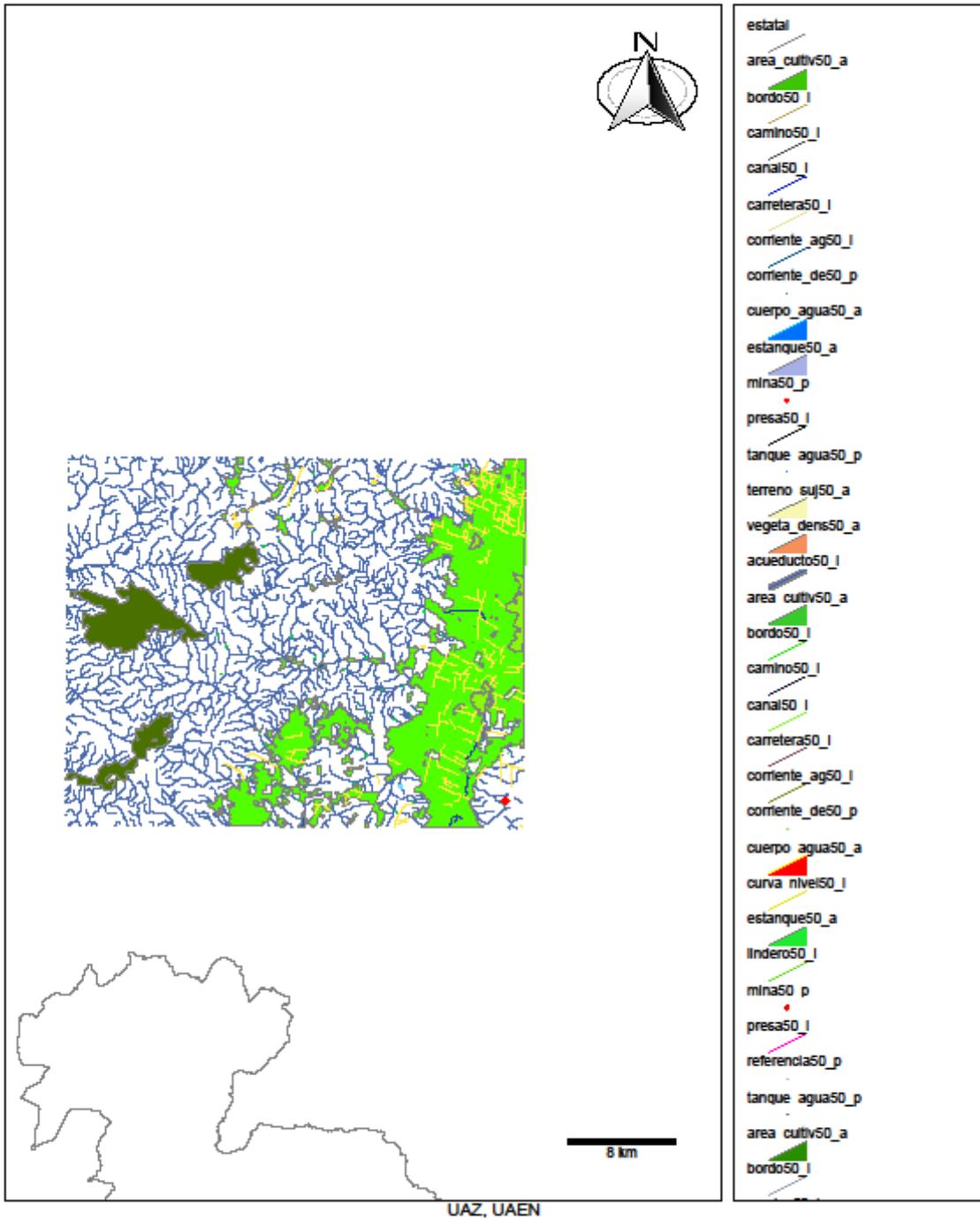
44. Nava Maldonado Flavio "Determinación de Th y U por activación neutrónica para calibración de espectrometría gamma in situ" 2012 M Sc Thesis. UAEN, UAZ
45. Gomes Quiñones I. Selene "Flujo de radón en suelos para uso habitación en la ciudad de Fresnillo Zacatecas" tesis 2016 p. 47
46. Bernal, Juan Pablo, et al. "Revisión a algunos geocronómetros radiométricos aplicables al Cuaternario." Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana **62.3** p.305-323 (2010).
47. Página web <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/bi.htm> (2017).

# Anexos

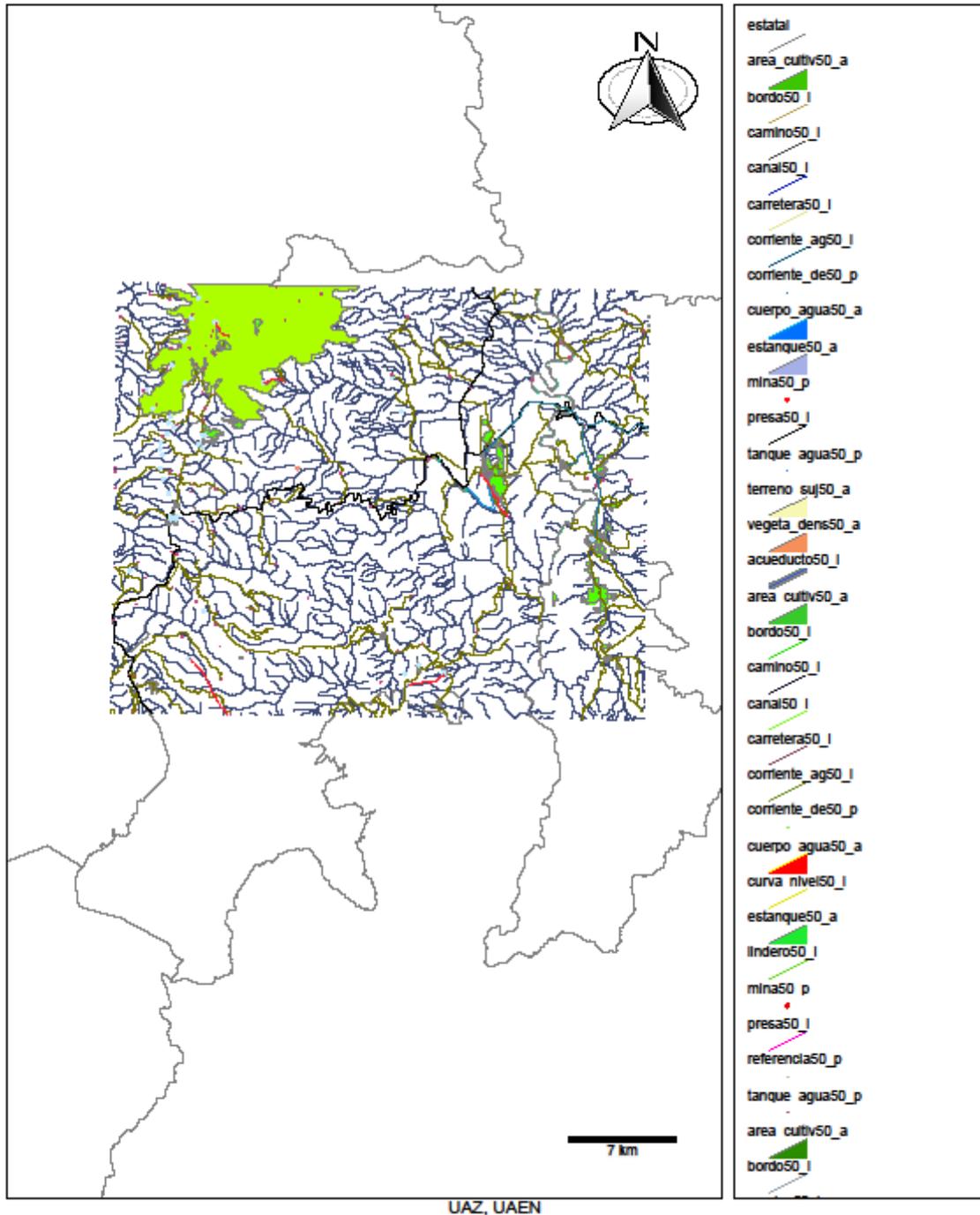
## Ojocaliente



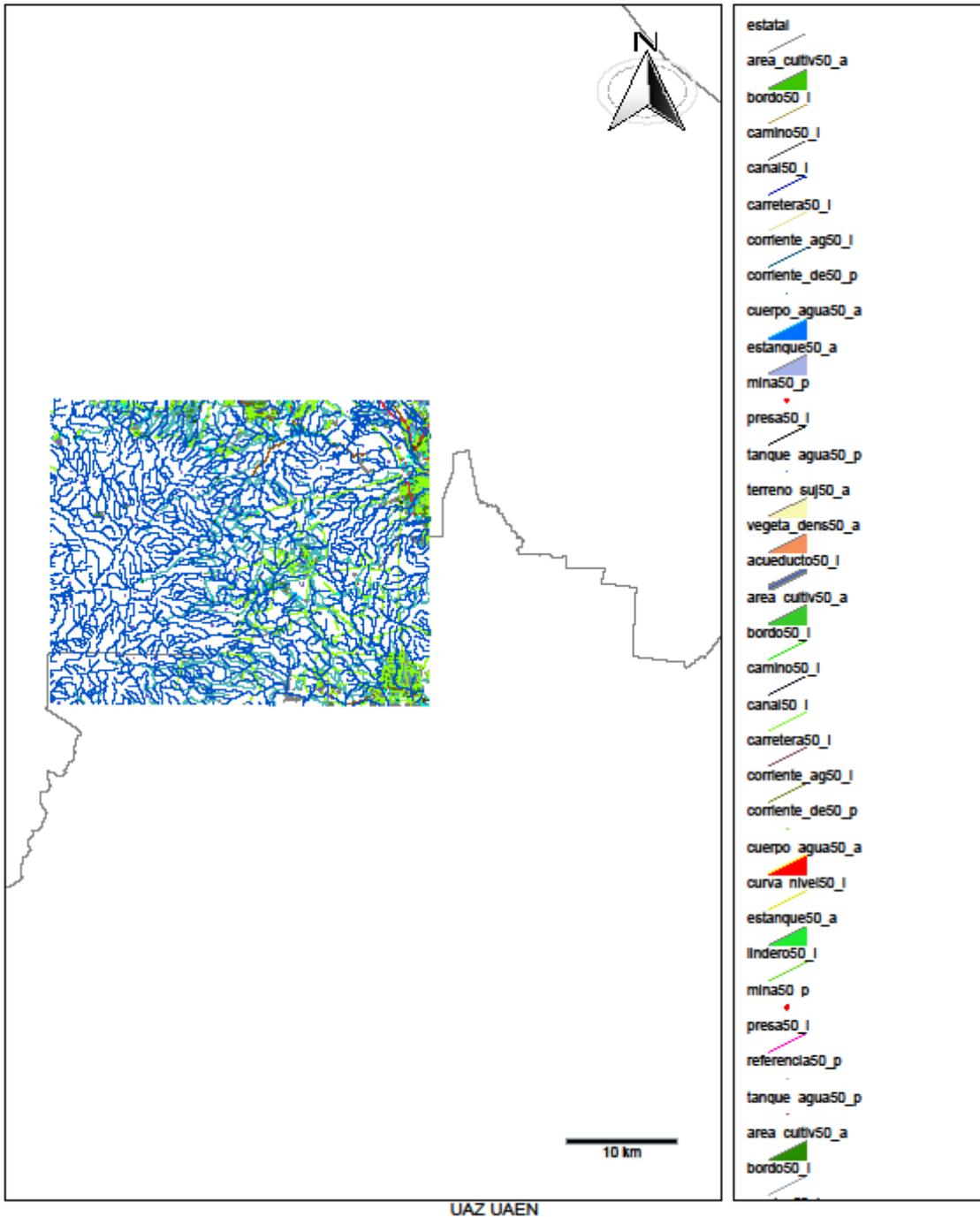
# Guadalupe



# San Ramon



# Panfilo Natera



# Villa de Cos

