



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA FÍSICA**

**“DETERMINACIÓN DE I-131 Y K-40 EN FRUTAS CULTIVADAS  
EN LA SIERRA ECUATORIANA”**

**Trabajo de Titulación**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**FÍSICO**

**AUTOR: BRAYAN ALEXANDER FREIRE FIALLOS**

**DIRECTORA: DRA. JHENY DEL CARMEN ORBE ORDOÑEZ**

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, **Brayan Alexander Freire Fiallos**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Brayan Alexander Freire Fiallos, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 17 de noviembre del 2023

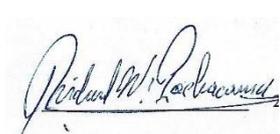


.....  
**Brayan Alexander Freire Fiallos**

**060510148-4**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA FÍSICA**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo: Proyecto de Investigación, “**DETERMINACIÓN DE I-131 Y K-40 EN FRUTAS CULTIVADAS EN LA SIERRA ECUATORIANA**”, realizado por el señor: **BRAYAN ALEXANDER FREIRE FIALLOS**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Dr. Richard Willians Pachacama Choca Mgtr. <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2023-11-17
Dra. Jheny del Carmen Orbe Ordoñez PhD. <b>DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		2023-11-17
Biof. Azucena Nataly Bonilla García Mgc. <b>ASESORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		2023-11-17

## **DEDICATORIA**

A mis padres Marco (+) y Amparito, y a mis hermanos Marco y Gabriel, quienes han sido fuente de sabiduría y fortaleza a lo largo de mi vida. Siempre me han alentado a perseguir mis sueños incluso cuando los tiempos han sido difíciles.

Brayan

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a todos los docentes y personal de la escuela, quienes me impartieron sus conocimientos semestre a semestre. Además, quisiera agradecer a la Dra. Jheny Orbe, la tutora de mi tesis, quien me dio confianza para poder realizar el trabajo de titulación, también a la Biof. Nataly Bonilla, Asesora de mi trabajo de grado en la institución y docente de diversas disciplinas, quienes me han guiado de la mejor manera por muchos años, el camino como estudiante y en este trabajo.

Brayan

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xi
RESUMEN .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPÍTULO I

<b>1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Antecedentes de investigación.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Radiactividad en alimentos .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3. Actividad específica.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4. Período de semidesintegración.....</b>	<b>5</b>
<b>1.5. Cadena de desintegración y riegos para la salud de I-131.....</b>	<b>5</b>
<b>1.6. Cadena de desintegración y riegos para la salud de K-40 .....</b>	<b>7</b>
<b>1.7. Espectrometría Gamma.....</b>	<b>8</b>
<b>1.8. Detector de centelleo .....</b>	<b>9</b>
<b>1.8.1. Interacción de la radiación gamma con el centellador.....</b>	<b>11</b>
<b>1.9. Bases Legales .....</b>	<b>12</b>
<b>1.9.1. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN-CODEX 193-2013 .....</b>	<b>12</b>
<b>1.9.2. Normas Internacionales de los alimentos CODEX ALIMENTARIUS CXS .....</b>	<b>13</b>
<b>1.10. Diversidad Frutal de la Sierra Ecuatoriana .....</b>	<b>13</b>
<b>1.10.1. Tomate de árbol (<i>Solanum betaceum Cav</i>) .....</b>	<b>13</b>
<b>1.10.2. Fresa (<i>Fragaria</i>).....</b>	<b>14</b>
<b>1.10.3. Mora (<i>Rubus ulmifolius</i>) .....</b>	<b>14</b>
<b>1.10.4. Taxo (<i>Passiflora mollissima</i>) .....</b>	<b>14</b>
<b>1.10.5. Tuna (<i>Opuntia ficus-indica</i>) .....</b>	<b>14</b>
<b>1.10.6. Durazno (<i>Prunus persica</i>).....</b>	<b>15</b>
<b>1.10.7. Higo (<i>Ficus carica</i>) .....</b>	<b>15</b>
<b>1.10.8. Limón (<i>Citrus limon</i>) .....</b>	<b>15</b>
<b>1.10.9. Manzana (<i>Malus domestica</i>).....</b>	<b>16</b>
<b>1.10.10. Pera (<i>Pyrus communis</i>).....</b>	<b>16</b>

## **CAPÍTULO II**

<b>2.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.</b>	<b>Características de la investigación .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.</b>	<b>Población .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.</b>	<b>Tamaño de muestra .....</b>	<b>17</b>
<b>2.4.</b>	<b>Localización del estudio .....</b>	<b>17</b>
<b>2.5.</b>	<b>Método de preparación de la muestra de fruta.....</b>	<b>19</b>
<b>2.6.</b>	<b>Método de recolección de la muestra de suelo donde se cultivó la fruta .....</b>	<b>22</b>
<b>2.7.</b>	<b>Espectrómetro ADANI Rug 91-2 .....</b>	<b>24</b>
<b>2.8.</b>	<b>Procedimiento de medición de actividad específica de las muestras.....</b>	<b>28</b>

## **CAPÍTULO III**

<b>3.</b>	<b>MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1.</b>	<b>Actividad específica de I-131 y K-40 .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.</b>	<b>Actividad específica media de I-131 y K-40 en los suelos de cultivo de las frutas</b>	<b>33</b>
<b>3.3.</b>	<b>Capacidad de absorción de I-131 y K-40 de la planta desde el suelo de cultivo ..</b>	<b>34</b>

<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>37</b>
--------------------------	-----------

<b>RECOMENDACIÓN.....</b>	<b>38</b>
---------------------------	-----------

**GLOSARIO**

**BIBLIOGRAFÍA**

**ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1:</b> Coordenadas específicas de los puntos de recolección de las muestras de frutas y suelos de cultivo.....	18
<b>Tabla 2-2:</b> Requisitos técnicos para utilizar el software en el ordenador.....	27
<b>Tabla 3-1:</b> Concentración media de la actividad específica de I-131 y K-40 de diez frutas de la Sierra Ecuatoriana. ....	32
<b>Tabla 3-2:</b> Concentración media de la actividad específica de I-131 y K-40 de los suelos de cultivo de las frutas. ....	33
<b>Tabla 3-3:</b> Poder de absorción de I-131 y K-40 desde el suelo a la planta. ....	34

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1-1:</b> Decaimiento beta de I-131 a Xe-131 .....	6
<b>Ilustración 1-2:</b> Decaimiento de K-40 .....	8
<b>Ilustración 1-3:</b> Estructura de bandas de energía de un cristal centellador activado impurezas	10
<b>Ilustración 1-4:</b> Esquema del funcionamiento de un detector centellador.....	12
<b>Ilustración 2-1:</b> Derecha Mapa del Ecuador (Provincia de Tungurahua “color rojo”, Provincia de Chimborazo “color anaranjado”), Izquierda: rombos rojos son los puntos de muestreo .....	19
<b>Ilustración 2-2:</b> Recolección de frutas en el área de cultivo.....	20
<b>Ilustración 2-3:</b> Pelado, corte y rebanado de las muestras frutales.....	20
<b>Ilustración 2-4:</b> Secado de las muestras .....	21
<b>Ilustración 2-5:</b> Trituración de las muestras .....	21
<b>Ilustración 2-6:</b> Tamizado, etiquetado y almacenado.....	22
<b>Ilustración 2-7:</b> Recolección de la muestra de suelo del área de cultivo.....	23
<b>Ilustración 2-8:</b> Secado de las muestras de suelos.....	23
<b>Ilustración 2-9:</b> Etiquetado y almacenado de las muestras de suelos .....	24
<b>Ilustración 2-10:</b> Espectrómetro ADANI Rug 91-2 .....	26
<b>Ilustración 2-11:</b> Esquema general del espectrómetro Rug 91-2.....	27
<b>Ilustración 2-12:</b> Interfaz gráfica del Rug 91-2 .....	28
<b>Ilustración 2-13:</b> Análisis de muestras en el espectrómetro ADANI Rug 91-2 .....	31
<b>Ilustración 3-1:</b> Comparación de la concentración media de la actividad específica de I-131 entre los suelos de cultivo y las frutas.....	35
<b>Ilustración 3-2:</b> Comparación de la concentración media de la actividad específica de K-40 entre los suelos de cultivo y frutas .....	36

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** Recolección de la muestra de mora

**ANEXO B:** Recolección de la muestra de higo

**ANEXO C:** Recolección de la muestra de tuna

**ANEXO D:** Recolección de la muestra de durazno

**ANEXO E:** Recolección de la muestra de suelo de cultivo de tuna

**ANEXO F:** Recolección de la muestra de suelo de cultivo de higo

**ANEXO G:** Recolección de la muestra de suelo de cultivo de manzana

**ANEXO H:** Resultado de análisis con el espectrómetro adani rug 91-2 de la muestra de taxo

**ANEXO I:** Resultado de análisis con el espectrómetro rug 91-2 de la muestra de suelo de taxo

## RESUMEN

En la presente investigación se determinó la concentración de la actividad específica de I-131 y K-40 en diez frutas y suelos de cultivo de la Sierra Ecuatoriana mediante espectrometría gamma. Las muestras tuvieron un proceso en cinco fases: recolección, pelado, secado, trituración y tamizaje. El análisis se realizó en el laboratorio de Técnicas Nucleares de la ESPOCH, utilizando el espectrómetro ADANI Rug 91-2, con un tiempo de adquisición de 4 horas, con tres repeticiones por muestra. Los resultados de las mediciones de I-131 mostraron los valores de la concentración media de la actividad específica de las frutas, los valores están en un rango 0,06 y 0,21 (Bq/Kg), no se observó este elemento en el tomate de árbol, fresa y mora. Los resultados de la concentración media de la actividad específica de K-40, en las frutas están en un rango 305-487 (Bq/Kg), la media más alta se evidenció en el durazno (486,86 Bq/Kg) y el valor más bajo en la pera (305,13 Bq/Kg). La capacidad de absorción de I-131 de las plantas frutales, cultivadas en los suelos de la Sierra Ecuatoriana, es variable, el limón y la pera presentaron porcentajes de absorción mayores a 50%, la manzana, el higo y el durazno mostraron porcentajes de absorción mayores a 30%, el taxo y la tuna porcentajes de absorción mayores a 15%, mientras que el tomate de árbol, la fresa y la mora no absorben este radionucleido. Para el K-40, el limón mostró un poder de absorción mayor a 99%, la manzana, el durazno, la pera y la fresa presentaron porcentajes de absorción mayores a 80%, la mora, el higo, el tomate de árbol y la tuna mostraron porcentajes de absorción mayores a 50%, mientras el taxo presentó un poder de absorción mayor 40%. Se recomienda desarrollar nuevas investigaciones relacionadas a la presencia de I-131 y K-40 en otros alimentos, como verduras, carnes, leche, entre otros.

**Palabras clave:** <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <CONCENTRACIÓN I-131 Y K-40>, <FRUTAS Y SUELOS >, <ESPECTROMETRÍA GAMMA >, <ESPECTRÓMETRO ADANI RUG 91-2>

994-DBRA-UPT-202

A handwritten signature in blue ink is written over a circular institutional stamp. The stamp contains the text 'UNIVERSIDAD POLITÉCNICA' at the top and 'CENTRO DOCUMENTAL' at the bottom, with a central emblem. The signature is highly stylized and cursive.

## ABSTRACT

The concentration of the specific activity of I-131 and K-40 was determined in ten fruits and crop soils from the Ecuadorian Andean Highlands by means of gamma spectrometry in the present research. The samples had a five-phase process: collecting, peeling, drying, crushing and screening. The analysis was carried out in the Nuclear Techniques Laboratory from ESPOCH using the ADANI Rug 91-2 spectrometer, with an acquisition time of 4 hours, and with three repetitions per sample. The results of the I-131 measurements showed the values of the average concentration of the specific activity of the fruits, the values are in a range of 0.06 and 0.21 (Bq/Kg). This element was not observed in the tree tomato, strawberry and blackberry. The results of the average concentration of the specific activity of K-40 in fruits are in a range of 305-487 (Bq/Kg), the highest average was evident in peach (486.86 Bq/Kg) and lowest value in the pear (305.13 Bq/Kg). The absorption capacity of I-131 of fruit's plants grown in the soils from Ecuadorian Andean highlands, is variable, the limon and the pear showed absorption percentages greater than 50%, apple, fig and peach showed percentages of absorption greater than 30%, the taxo and the tuna showed absorption percentages greater than 15%, while the tree tomato, strawberry and blackberry do not absorb this radionuclide. To the K-40, lemon showed an absorption power greater than 99%, apple, peach, pear and strawberry presented absorption percentages greater than 80%, blackberry, fig, tree tomato and tuna showed absorption percentages greater than 50%, while the taxo presented an absorption power greater than 40%. It is recommended to develop new research related to the presence of I-131 and K-40 in other foods, such as vegetables, meats, milk, among others.

**Keywords:** <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>, <I131 AND K-40 CONCENTRATION>, <FRUITS AND SOILS>, <GAMMA SPECTROMETRY>, <SPECTROMETER ADANI RUG 91-2>.



Lic. Luis Armando Quishpe Hipo, Mgs.

C.I. 0102801016

## INTRODUCCIÓN

La inocuidad alimentaria tiene como objetivo asegurar y proteger la salud de las personas mediante un estricto control de la calidad de los alimentos para prevenir la presencia de patógenos y contaminantes químicos, es esencial considerar que también existen otros tipos de contaminantes llamados radiactivos como el I-131 y K-40, que al ser consumidos pueden causar enfermedades a corto y largo plazo, e incluso poner en riesgo la vida del consumidor. El I-131 tiene una corta vida media y alta radiactividad, su presencia en alimentos puede representar un riesgo significativo para la salud humana, a corto plazo pueden originar efectos agudos tales como caída de cabello, quemaduras, enrojecimiento de la piel, síndrome de irradiación aguda, a largo plazo dañan las células, órganos y tejidos. Todos estos efectos son peligrosos ya que pueden causar cáncer e inclusive la muerte del consumidor (ATSDR, 1999). Por otro lado, el K-40 es la principal fuente de radiación en seres humanos debido a la ingesta de alimentos, es encuentra de forma natural con abundancia relativamente alta en el suelo, desde allí pasa a los cultivos por las raíces hasta la planta y finalmente al fruto, es el radionucleido más frecuente en las frutas además se encuentra en pequeñas cantidades en el cuerpo humano ya que es esencial para el funcionamiento normal del mismo y no representa un riesgo para salud (FAO, OMS & OPS, 2015).

En la actualidad, se ha comprobado la existencia de sustancias radiactivas en los alimentos, los cuales se originaron a partir de accidentes nucleares y otras fuentes radiactivas, estos radionucleidos se propagaron a diversas regiones del mundo a través de corrientes de aire, agua y lluvia, lo que resultó en la contaminación de suelos para ser absorbida por las plantas y sus frutos (Publitec Argentina S.A., 2010). En 1986 la Unidad Química del Laboratorio del Organismo en Seibersdorf se realizó un análisis de actividad de diversos radionucleidos en una variedad de frutas de Austria en donde se pudo comprobar la presencia de I-131: fresas (11-12 Bq/Kg), cerezas (30-330 Bq/Kg), grosellas rojas (79-700 Bq/Kg), frambuesas (540 Bq/Kg) y arándanos (220-320 Bq/Kg), se constató que más del 80% de los radionucleidos presentes en el estudio excedían significativamente los niveles seguros para el consumo humano, destacando una concentración alarmante de I-131 (LifeScience, 2018). En Argentina se llevaron a cabo investigaciones encaminadas a evaluar los niveles de concentración de I-131 y examinar la radiactividad que resulta de la precipitación causada por el uso prolongado de la tecnología nuclear a nivel mundial, para este propósito se sometieron a análisis diversas variedades de frutas, como kiwi, limón, banana, mandarina, pomelo, manzana, durazno, pera y naranja. La presencia de I-131 se detectó utilizando espectrometría gamma, aplicada a comprimidos de cenizas derivadas de las muestras previamente calcinadas. En el primer trimestre de muestras recogidas,

correspondientes al año de 1997 se encontró un valor disminución de 0.02 (Bq/Kg) de I-131 (FAO, 2004).

En la Sierra Ecuatoriana existe una mega diversidad frutal gracias a su clima, sin embargo, la escasez de investigaciones acerca de la contaminación radiactiva en frutas. En base a esta problemática la actual investigación se enfoca en determinar la concentración de la actividad específica de I-131 y K-40 en diez frutas provenientes de la Sierra Ecuatoriana, así como los suelo donde fueron cultivadas. El equipo que se utilizó para determinar la concentración de la actividad específica de I-131 y K-40, es el espectrómetro gamma ADANI Rug 91-2, que se encuentra disponible en el laboratorio de Técnicas Nucleares de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) (Martínez & Piedmag, 2021, p. 3). Con la ayuda del Grupo de Investigación y Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC) se desarrolló los protocolos de trabajo para la preparación y análisis de las muestras frutales y suelos de cultivo.

## CAPÍTULO I

### 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

#### 1.1. Antecedentes de investigación

El K-40 es la principal fuente de radiación para los seres humanos debido a su presencia abundante en el suelo, lo que se transmite a las plantas y frutas, como los plátanos y los kiwis, este radionucleido sirve como referencia para el estudio de otros elementos radiactivos, como el I-131 (González & Bonzi, 2012, pp. 185-188). A escala global, la actividad específica promedio de radiación natural de K-40 en el suelo equivale aproximadamente a 412 Bq/Kg. Sin embargo, la exposición a niveles elevados de radiación puede dar lugar a consecuencias a largo plazo en la salud humana (UNSCEAR, 2010, pp. 233-234).

En otras investigaciones hacen referencia al Factor de Transferencia suelo-planta es comúnmente empleado para cuantificar un estimado de los radionucleidos transferidos desde el suelo a la planta. Esto en un principio fue desarrollándose dadas ingestiones accidentales después del desastre nuclear de Fukushima en 2011 usando un método para cuantificar la presencia de radionucleidos con la dosis equivalente comprometida causada por I-131 y la dosis efectiva causada por I-131, Cs-134 y Cs-137, utilizando datos de mediciones realizadas en alimentos (Yamaguchi, 2012, pp. 83-85).

En cada una de las diversas investigaciones de la concentración de radionucleidos en suelo y plantas se detallan diferentes resultados, dependiendo de la zona geográfica de estudio, así como de la especie de planta sujeto de la investigación, en particular se ha obtenido que la concentración de K-40 para ciertas especies de plantas es mayor que otros radionucleidos como el Th-234, Cs-137 y Ra-226 (Kioupi, Florou, Gotsi & Zagou, 2016). Por otro lado se realizaron investigaciones desarrolladas en Brasil el cual afirma que la concentración de actividad de K-40 fue hallado en todos los condimentos y frutos secos, y aunque en un estudio de plantas medicinales los resultados para K-40 fueron más altos que los otros radionucleidos no es posible elaborar conclusiones generales para el resto de familias de plantas, pues además depende en gran medida de la localidad de estudio (Garcêz, Dutra, Lopes, Filgueiras & da Silva, 2018).

Así también, se ha demostrado que el efecto de inhibidores de insectos no tiene un efecto significativo en las concentraciones de los radionucleidos en las plantas y suelo, en específico se registra una incidencia menor al 3% (Muñoz, 2022).

La Espectrometría Gamma ha sido utilizada en varias investigaciones para determinar la concentración de la actividad de radionucleidos, se registran estudios específicamente de la

actividad de radionucleidos como el I-131 y K-40 mediante el uso de espectrómetros de rayos gamma de amplio rango (Aouidi et al, 2021). Kioupi et al. (2015) hace énfasis en la calibración del espectrómetro a utilizar, teniendo en cuenta la eficiencia porcentual relativa del detector y la capacidad del área espectral total; señala que, a diferencia de otros radionucleidos, para el K-40 es conveniente tomar su pico más alto para el cálculo de la concentración de su actividad.

## **1.2. Radiactividad en alimentos**

La radiactividad presente en los alimentos puede originarse por diversas causas, entre ellas, la contaminación radiactiva en el aire, el suelo o el agua utilizada en la agricultura. También puede deberse a actividades humanas como la minería, la generación de energía nuclear y accidentes nucleares. Además, los alimentos pueden contener radiactividad de manera natural al incorporar elementos radionucleidos provenientes del suelo. Los radionucleidos naturales más comunes que se encuentran en los alimentos son el K-40, C-14, Ra-226 y U-238. Estos elementos se ingieren junto con la dieta diaria y pueden emitir radiación ionizante dentro del cuerpo. Es importante destacar que, en la mayoría de los casos, los niveles de radionucleidos presentes en los alimentos son bajos y no representan un riesgo significativo para la salud. Sin embargo, los organismos reguladores y autoridades llevan a cabo medidas de control y monitoreo para asegurar que los niveles de radiación en los alimentos estén dentro de los límites seguros para el consumo humano (AESAN, 2020, pp. 11-12).

Existen otros radionucleidos como el I-131, Cs-134, Cs-137, Sr-90 y Pu -239, que pueden ser perjudiciales para la salud humana, ya que tienen la capacidad de causar daño celular, cáncer y otros problemas de salud. Incluso en dosis muy bajas la radiactividad presente en los alimentos es de gran interés desde el punto de vista toxicológico, dado que el cuerpo humano carece de mecanismos naturales para descontaminarse de ellos. Algunos de estos radionucleidos tienen afinidad por ciertos tejidos, lo que significa que se acumulan gradualmente en esas áreas del cuerpo (EPA, 2023).

## **1.3. Actividad específica**

La actividad específica es una medida utilizada en el campo de la radiactividad para cuantificar la cantidad de radiación emitida por una muestra de material radiactivo en relación con su masa o volumen. La actividad se mide en unidades de Bequerels por Kilogramo (Bq/Kg) (Cortés & Arias, 2007, pp. 55-62), expresada en la siguiente ecuación:

$$A = \frac{C_n}{\varepsilon_f P_\gamma t_s m} \quad \text{Ecuación (1.1)}$$

Donde:

$A$  es la concentración de actividad de un isótopo en unidades Bq/kg,  $C_n$  el recuento neto al pico total de energía,  $\varepsilon_f$  es la eficiencia detectada del pico de energía absoluta,  $P_\gamma$  la probabilidad de emisión por desintegración que corresponde a la energía de rayos gamma específica,  $t_s$  equivale al tiempo de conteo en segundos y  $m$  la masa de la muestra del suelo en la unidad de kg.

#### 1.4. Período de semidesintegración

El período de semidesintegración o período  $T_{1/2}$ , que es el tiempo necesario para que un determinado número de átomos radiactivos iniciales ( $N_0$ ) puede desintegrarse, reduciéndose a la mitad (Ávila, Calvino & López, 2018, pp. 57-59), teniendo así la siguiente ecuación:

$$T_{1/2} = \frac{\lambda}{\ln(2)} \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

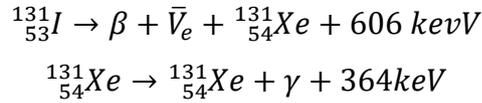
#### 1.5. Cadena de desintegración y riesgos para la salud de I-131

El I-131 es un isótopo radioactivo del yodo que emite radiación ionizante, y su ingestión en cantidades significativas puede ser perjudicial para el cuerpo humano, especialmente para la tiroides debido a su afinidad por este órgano. Por lo tanto, es fundamental controlar y monitorear los niveles de I-131 en el medio ambiente y los alimentos para garantizar la seguridad de la población. La presencia en las frutas es muy poco probable, si las frutas están expuestas niveles elevados a este radionucleido en breve plazo puede aumentar el riesgo de cáncer y otros problemas de salud (IAEA, 1996, pp. 1-65).

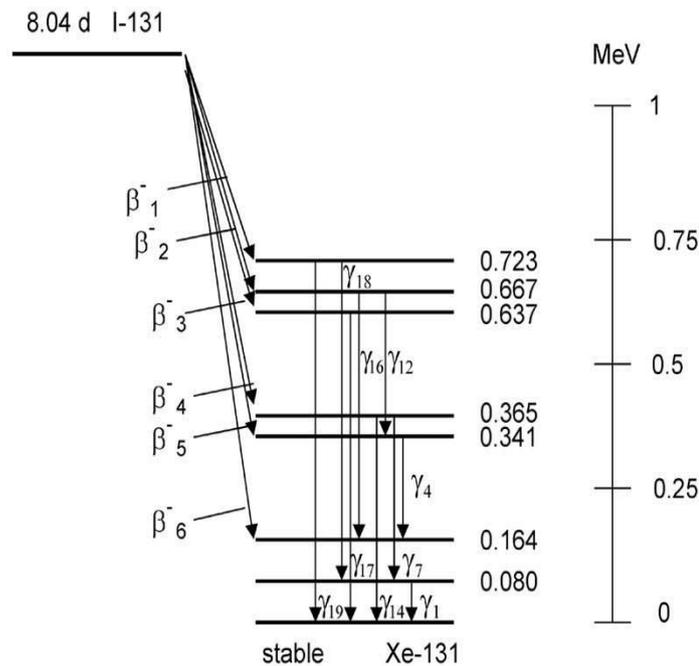
La principal preocupación en relación al I-131 radica en su capacidad para emitir radiación ionizante una vez dentro del cuerpo, la cual puede ocasionar daño celular y generar mutaciones en el ADN, incrementando así el riesgo de desarrollar cáncer, especialmente cáncer de tiroides. Este isótopo de yodo es especialmente peligroso debido a su afinidad por la glándula tiroides, lo que significa que, al ser liberado al medio ambiente, puede ser absorbido por esta glándula si se encuentra presente en el aire, el agua o los alimentos (RadiologyInfo, 2022, pp. 1-4).

El I-131 experimenta una desintegración mediante emisión beta negativa y gamma, con una vida media de 8,02 días y desaparece en un corto período de tiempo. Este isótopo de yodo contiene 78

neutrones en su núcleo, a diferencia del I-127, el único isótopo estable de yodo, que tiene 74 neutrones. Durante el proceso de decaimiento del I-131, la mayor parte del tiempo, su energía de decaimiento de 971 keV se transforma en Xe-131, que es un isótopo estable, en dos etapas, con la emisión gamma ocurriendo rápidamente después del decaimiento beta:



La desintegración del I-131 libera principalmente rayos gamma de diferentes energías, siendo las más probables las de 364 y 637 keV, junto con la emisión de partículas beta que tienen diversas energías, siendo la máxima de 606 keV. Durante el proceso de descomposición beta, pueden emitirse un electrón y un antineutrino (desintegración  $\beta^-$ ), o bien un positrón y un neutrino (desintegración  $\beta^+$ ), los cuales transportan cantidades variables de energía de descomposición beta. Los electrones tienen la capacidad de penetrar en los tejidos biológicos en distancias que van desde 0,6 a 2 mm, debido a su alta energía promedio (190 keV, con un espectro típico de desintegración beta) (Barredo, 2010, pp. 22-24). El esquema de desintegración se muestra en la Ilustración (1-1).



**Ilustración 1-1:** Decaimiento beta de I-131 a Xe-131

**Fuente:** Barredo, F., 2010

## 1.6. Cadena de desintegración y riesgos para la salud de K-40

El K-40 es un isótopo radiactivo natural, el cual está presente en la corteza terrestre en concentraciones relativamente altas en el suelo, rocas y minerales. La cantidad de K-40 presente en las frutas varía según la especie y la región donde se cultivan. Por ejemplo, el plátano contiene una cantidad relativamente alta de este radionucleido en comparación con otras frutas, pero en general es bastante baja y no representa un riesgo significativo para la salud humana. Es importante destacar que el Potasio es un nutriente esencial para el cuerpo humano y es fundamental incluirlo en una dieta equilibrada (González & Bonzi, 2012, pp. 185-188).

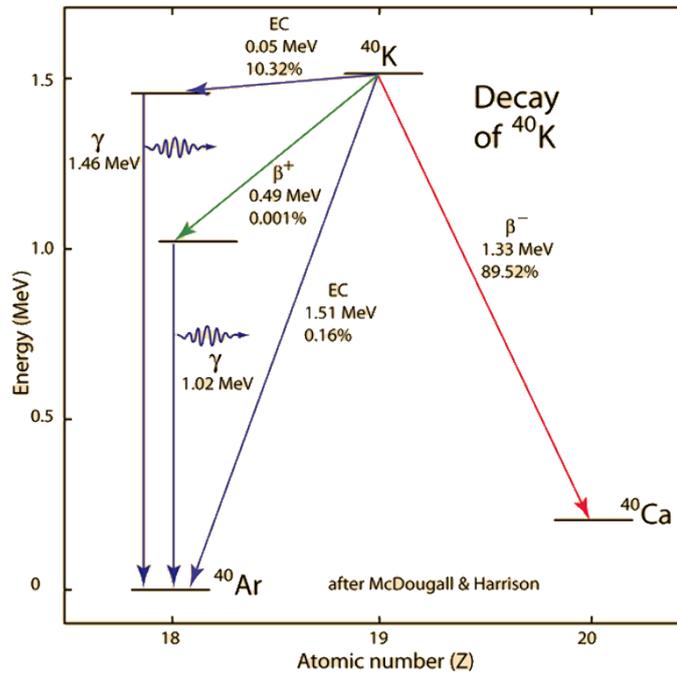
La exposición al K-40 no representa un riesgo significativo para la salud humana, ya que se considera insignificante debido a los niveles muy bajos de radiación involucrados, y no se conocen efectos perjudiciales en la salud a partir de esta exposición. Sin embargo, la exposición a niveles altos de este isótopo puede aumentar el riesgo de cáncer, aunque resulta difícil medir sus efectos precisamente debido a la radiación natural presente en el entorno. Dado que el K-40 es esencial para la vida, se encuentra de manera omnipresente en todos los organismos vivos, en el suelo, el agua, los alimentos y las plantas, lo que hace que sea imposible evitar por completo su exposición (Quintero, López, Gonzalo & Rojas, 2012, pp. 1-5).

A pesar de que el K-40 se encuentra en nuestro entorno y forma parte de nuestros cuerpos, es crucial considerar que el potasio es un elemento esencial para el adecuado funcionamiento del organismo. Cumple una función fundamental en el equilibrio de líquidos y electrolitos, en la transmisión de señales nerviosas y en el desempeño de las funciones musculares, entre otras funciones vitales (IAEA, 1996).

En (CSN 2010) se afirma que el K-40 es la fuente más importante de irradiación interna (material radiactivo que se ha incorporado a nuestro cuerpo), presente en los alimentos y en el agua consumidos. Existen escasas posibilidades de reducir la exposición originada por la presencia de radiactividad natural en la dieta, que da una dosis promedio de 0,29 mSv por año, 0,17 de los cuales se deben al K-40.

El K-40 es un radionucleido natural el cual puede atravesar tres tipos de desintegración radiactiva, nueve de cada diez veces decae a Ca-40, emitiendo una partícula beta ( $\beta^-$ )  $E_{max} = 1,31$  MeV y, por consiguiente, un antineutrino. El otro 10% a aproximadamente 11% decae a Ar-40, por captura de electrones, acompañado de la emisión de un neutrino y un rayo gamma de 1.460 MeV, cumpliéndose, como es de esperarse, la conservación de la energía. La forma de desintegración radiactiva de este isótopo es la causa de la prevalencia del Ar-40 sobre otros isótopos. Cabe mencionar que con una tasa muy improbable (0.001%), puede decaer a Ar-40 emitiendo un

positrón ( $\beta^+$ ) y un neutrino (Romero, 1992, pp. 12-13). Tiene una vida media muy larga de  $1.27 \times 10^9$  años. El esquema completo de decaimiento se puede observar en la Ilustración (1-2).



**Ilustración 1-2:** Decaimiento de K-40

Fuente: McDougall, L., 1989

### 1.7. Espectrometría Gamma

La información relacionada con un radionucleido, adquirida mediante un dispositivo de detección gamma, se representa en forma de un gráfico de energía conocido como espectro. Este espectro captura todos los fotones que llegan al detector.

La información de un radionucleido adquirida mediante un detector gamma, se representa en forma de un espectro de energía que muestra todos los fotones que llegan al detector, al examinar este espectro, es posible identificar de manera cualitativa la existencia de un radionucleido específico o recabar datos cuantitativos sobre la muestra en análisis. En el contexto general de la espectrometría gamma, se considera la cantidad de canales (que pueden vincularse con energía, altura de pulso o longitud de onda) como variable independiente, mientras que la reacción del detector (en términos de pulsos o conteos) se toma como variable dependiente (Dunn & McGregor, 2012, p. 414).

Los enfoques empleados en la espectrometría de fotones de alta energía pueden ser categorizados en dos grupos principales: el método de dispersión de energía, que tiene como objetivo preservar y registrar la mayor cantidad posible de energía de los fotones, empleando indicadores de

disipación de energía tales como emisión lumínica, corriente eléctrica y cambios térmicos, entre otros. Por otro lado, se encuentra el método de dispersión de longitud de onda, que evalúa esta propiedad para cada fotón incidente y representa su correspondiente espectro (Dunn & McGregor, 2012, pp. 431-432). Cuando se menciona a la espectrometría, es esencial considerar que se hace referencia a un sistema integral de detección que puede variar en términos de su clase, configuración y dimensiones. No obstante, el propósito fundamental de la espectrometría consiste en identificar cada radionucleido mediante la detección de la energía gamma característica que está relacionada con ellos (Audicio, 2010, pp. 1-5).

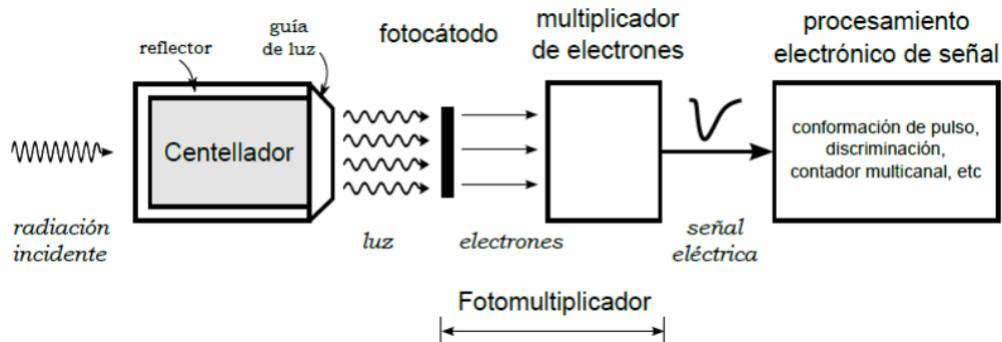
### **1.8. Detector de centelleo**

Cuando la radiación gamma entra en contacto con la materia, provoca ionización y excitación en los átomos que la conforman, en ciertos materiales una fracción de esa energía puede ser liberada en forma de luz visible, a estos materiales se les llama centelleadores. Los componentes esenciales de estos detectores engloban el material centellador en sí, un tubo fotomultiplicador y un analizador de múltiples canales. Se busca generalmente que el material centellador ideal exhiba ciertas propiedades deseables, como convertir eficientemente la energía cinética de las partículas incidentes en luz detectable, manteniendo una proporción adecuada entre la energía depositada y la luz generada. Adicionalmente, es necesario que la luminiscencia generada por el centelleo presente una rápida disminución temporal para producir pulsos de señal apropiados en el sistema electrónico. El material debe ser transparente para prevenir alteraciones en la longitud de onda de la luz liberada y permitir una adecuada captura de la misma. Asimismo, el índice de refracción debe coincidir con el del tubo fotomultiplicador y el fotocátodo, con el fin de evitar pérdidas en la transmisión durante la conexión (Knoll, 2017, p. 223).

No hay un solo material centellador que cumpla con todas estas características al mismo tiempo. La elección del material depende del propósito de uso y puede variar entre estados sólido, líquido o gaseoso. Existe una clasificación fundamental de materiales centelleadores en orgánicos e inorgánicos. Los materiales orgánicos se utilizan principalmente en espectroscopia de partículas beta debido a su alto contenido de hidrógeno, mientras que los inorgánicos son más comúnmente empleados en espectrometría gamma. Estos últimos ofrecen ciertas ventajas debido a su composición, ya que tienden a tener una mayor eficiencia en la generación de luz, una respuesta lineal y, aunque los períodos de disipación de la luminiscencia en el centelleo puedan ser considerablemente extensos, su elevado número atómico incrementa la posibilidad de que los rayos gamma entren en interacción con la materia (Knoll, 2017, p. 223).

El yoduro de sodio NaI (Tl), un compuesto inorgánico que emite destellos de luz cuando es excitado debido a su estructura cristalina. Se utiliza ampliamente en el análisis del espectro de radiación gamma de muestras. Su comportamiento se basa en el estado de energía electrónica de los átomos dentro de la red cristalina, el cual está gobernado por la ecuación de Schrödinger. La teoría de la banda de energía es una herramienta crucial para entender el movimiento electrónico y las propiedades eléctricas de este material. En los cristales sin impurezas, la liberación de un fotón cuando un electrón regresa a la banda de valencia es generalmente poco eficiente debido a la brecha de energía del cristal, lo que ocasiona que el fotón no sea liberado dentro del rango visible. Con el propósito de incrementar la verosimilitud de liberación lumínica durante este procedimiento, se introducen trazas mínimas de impurezas, conocidas como activadores, en los centelladores inorgánicos (Knoll, 2000, pp. 234-236).

Los activadores generan defectos específicos en la banda prohibida, creando así niveles adicionales de luminiscencia dentro de la brecha de energía. Estos niveles adicionales, denominados centros de luminiscencia, poseen valores de energía más bajos que la brecha de energía total, lo que posibilita la emisión de fotones en el rango visible (Useche & Pérez, 2017, pp. 10-12). Véase la Ilustración (1-3)



**Ilustración 1-3:** Estructura de bandas de energía de un cristal centellador activado con impurezas

Fuente: Knoll, G., 2000

Los centelladores inorgánicos generalmente emplean activadores que son metales pesados, como el Tl, los cuales tienen una energía de ionización más baja que la del cristal. Cuando estos metales pesados son ionizados debido a los huecos presentes en la banda de conducción, los electrones libres se desplazan a través del cristal hasta que se encuentran con un activador que ha sido ionizado. Este proceso conduce a la formación de una configuración neutra del activador con su conjunto particular de niveles de energía excitados, tal como se representa en la ilustración (1-3)

Para producir un par electrón-hueco en el yoduro de sodio (NaI), se requiere una energía promedio aproximadamente tres veces mayor que la energía de la banda prohibida, que en este caso es de unos 20 eV. Por cada millón de electronvoltios (MeV) de energía absorbida en el material, se generan alrededor de  $5 \times 10^4$  pares electrón-hueco. La eficiencia de conversión de esta energía en luz visible se estima en alrededor del 12%, lo que significa que se puede obtener un promedio de  $12 \times 10^5$  eV de energía en forma de luz visible. Los cristales de NaI (TI) tienen un rendimiento de luz por rayos gamma de aproximadamente 38000 fotones por cada MeV de energía depositada, y su tiempo de pulso de centelleo es de 230 nanosegundos (Knoll, 2000, pp. 234-236). Todas estas cualidades convergen para convertirlo en un detector estándar ampliamente utilizado en la espectrometría gamma.

### ***1.8.1. Interacción de la radiación gamma con el centellador***

La radiación gamma es el medio que excita el cristal para que se produzcan los fenómenos ya antes descritos, las tres principales formas de interacción incluyen el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la generación de pares las tres formas principales de interacción son el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la creación de pares (Miranda, 2019, pp. 12-15), muestran diversos escenarios que pueden surgir en el material debido a la presencia de fotones gamma:

-Un fotón que llega al detector centellador puede ser completamente absorbido debido al efecto fotoeléctrico, donde toda su energía es depositada en el material. También es posible que el fotón experimente algunas dispersiones antes de ser absorbido por completo, transfiriendo toda su energía al detector.

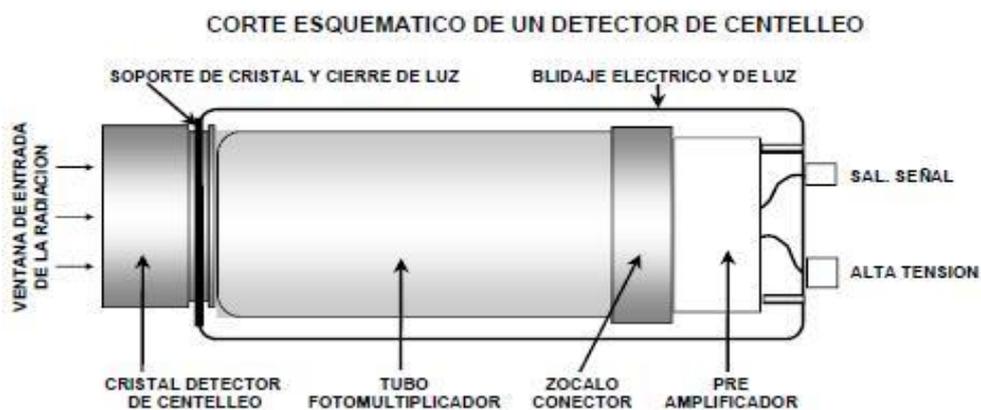
-Otra posibilidad es que el fotón se disperse una o varias veces dentro del detector y posteriormente salir con una energía igual a la diferencia entre su energía inicial y la que se transmite al detector. Esto se considera una disminución de energía.

-Si la energía del fotón es mayor a 1.022MeV, podría someterse a producción de pares, generando dos fotones de 0.511MeV cada uno por el proceso de aniquilación. En este caso, toda esta energía podría ser depositada en el centellador, o bien, solo uno o ninguno de los fotones resultantes permanezca en el material.

- En caso de que el fotón no entre en contacto con el detector, la cantidad de energía depositada será nula.

Una vez que la energía gamma es absorbida por el cristal, ocurre el fenómeno de fluorescencia, el centellador está acoplado a un tubo fotomultiplicador, que consta principalmente de un fotocátodo que convierte la tenue salida de luz del centelleo (con valores típicos de alrededor de 1eV) en un pulso eléctrico de aproximadamente la misma energía. Estos fotoelectrones son guiados por campos eléctricos hacia una estructura fotomultiplicadora que contiene electrodos o dinodos, donde chocan con el material y depositan energía, lo que resulta en la emisión de más electrones desde la misma superficie. Los dinodos están compuestos típicamente por materiales como el óxido de berilio (BeO), el óxido de magnesio (MgO) y el antimuro de cesio (Cs3Sb).

La importancia de este proceso radica en que permite multiplicar los fotoelectrones para obtener un pulso eléctrico lo suficientemente grande como para ser comparable con el centelleo original. El número típico de fotoelectrones multiplicados para centelladores oscila entre  $10^7$  y  $10^{10}$  (Miranda, 2019, pp. 12-15). Posteriormente, el análisis de los pulsos se lleva a cabo en el analizador multicanal, donde se discrimina la energía de los pulsos en canales dispuestos para cada energía particular, como se muestra en la Ilustración (1-4). En esta investigación el detector utilizado fue el de centelleo inorgánico de Yoduro de Sodio con Talio NaI (Tl).



**Ilustración 1-4:** Esquema del funcionamiento de un detector centellador

Fuente: Miranda, P., 2019

## 1.9. Bases Legales

### 1.9.1. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN-CODEX 193-2013

La Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN-CODEX 193-2013, establece una norma general para contaminantes y sustancias tóxicas en los alimentos. Los niveles de referencia para radionucleidos contaminantes destinados al consumo humano se dividen en dos categorías: alimentos para

lactantes y otros alimentos, esto debido a la sensibilidad de los lactantes a varios radionucleidos. Los valores de referencia para los siguientes radionucleidos: Sr-90, Ru-106, I-129, I-131 y U-235 es de (100 Bq/Kg), Cs-134, Cs-137, Sr-89, Ru-103 y S-35 es de (1000 Bq/Kg) los valores son idénticos tanto para alimentos destinados a lactantes como para otros tipos de alimentos, manteniendo un estándar de referencia constante. Para el radionucleido natural K-40 no se contempla en este documento (Codex Standard, 2013, pp. 35-36).

### ***1.9.2. Normas Internacionales de los alimentos CODEX ALIMENTARIUS CXS 193-1995***

La presente NORMA contiene los principios recomendados por el Codex Alimentarius en relación con contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos, se indican los niveles máximos para los siguientes radionucleidos: Sr-90, Ru-106, I-129, I-131 y U-235 es de (100 Bq/Kg), S-35, Co-60, Sr-90, Ru-103, Cs-134, C-137, Ce-144 y Ir-192 es de (1000 Bq/Kg). Cuando los niveles de radionucleidos presentes en los alimentos no exceden los niveles de orientación correspondientes, se consideran seguros para el consumo humano. Sin embargo, cuando se superan los niveles de referencia, los gobiernos nacionales deberán decidir si y en qué circunstancias los alimentos se distribuirán en su territorio. Los niveles de referencia no incluyen todos los radionucleidos (FAO & OMS, 1995, pp. 2-67).

## **1.10. Diversidad Frutal de la Sierra Ecuatoriana**

La diversidad frutal en la Sierra Ecuatoriana no solo proporciona una gran cantidad de opciones para la alimentación y la nutrición de las comunidades locales, sino que también tiene un impacto económico significativo en la región. La producción y comercialización de frutas locales y exóticas generan empleo y promueven el desarrollo económico de la zona. Sus diferentes climas (Frio, Templado, Tropical) hacen que los cultivos de frutas sean muy variados, las frutas más comunes de esta región son: ciruela, claudia, mora, kiwi, manzana, pepino dulce, tomate de árbol, papaya, chirimoya, capulí, tuna, durazno, taxo, babaco, fresa, durazno, limón, higo, pera, albaricoque, uvilla.

### ***1.10.1. Tomate de árbol (Solanum betaceum Cav)***

El tomate de árbol es una planta nativa del Ecuador, se cultivan en las provincias de Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo, Bolívar, Cañar, Azuay y Loja, es una fruta que crece en zonas con clima templado frío a temperaturas que oscilan los 13 a 19 grados Celsius. Esta fruta se caracteriza por tener una forma ovalada o elíptica y una cáscara delgada,

que puede variar en color desde el verde hasta el rojo o amarillo cuando está maduro. La pulpa es jugosa, de color naranja o amarillo, y contiene numerosas semillas pequeñas en su interior. (Revelo, Pérez & Maila, 2004, pp. 9-10).

#### **1.10.2. Fresa (*Fragaria*)**

Los frutos de la fresa son pequeños aquenios de color oscuro, dispersas sobre un engrosamiento en la parte del tallo. El tamaño y peso de la fruta pueden variar dependiendo de la variedad y otros factores que afectan su desarrollo. Pueden tener una forma plana, alargada y cónica, o redonda, y su color puede variar entre tonos carmesí, rojo o púrpura. Es una planta nativa del Ecuador se cultivan en las provincias de Pichincha, Tungurahua, Chimborazo, Cotopaxi, es una fruta que crece en zonas con climas templados las temperaturas ideales son entre 8 a 15 grados Celsius (Chiqui & Lema, 2010, pp. 5-6).

#### **1.10.3. Mora (*Rubus ulmifolius*)**

La fruta mora, también conocida como zarzamora, es una baya dulce y jugosa que crece en arbustos espinosos pertenecientes al género *Rubus*. Se caracteriza por su color negro brillante cuando está madura y su sabor agridulce. La producción de mora en el Ecuador se encuentra en seis provincias de las Sierra principalmente: Tungurahua, Bolívar, Cotopaxi, Pichincha e Imbabura, crece en lugares con clima templado a temperaturas que van desde 16 a 25 grados Celsius (Romoleroux, León & Ortiz, 2018, pp. 9-12).

#### **1.10.4. Taxo (*Passiflora mollissima*)**

Es una fruta exótica originaria de Ecuador, se cultivan en zonas con clima templado frío a temperaturas ideales entre 10 a 18 grados Celsius. El taxo tiene una forma ovalada o redondeada y su cáscara es dura y rugosa, de color amarillo a naranja cuando está maduro. El interior de la fruta está lleno de pulpa jugosa y llena de pequeñas semillas negras. La pulpa es de color amarillo intenso y tiene un sabor dulce y ácido, con un toque cítrico (MARITZA, 2020, pp. 1-2).

#### **1.10.5. Tuna (*Opuntia ficus-indica*)**

La tuna tiene una forma ovalada o redonda y está cubierta por una piel gruesa y espinosa que varía en color, pudiendo ser amarilla, roja o morada, dependiendo de la variedad. En el interior,

la fruta tiene una pulpa jugosa de color blanco, rojo o amarillo, llena de pequeñas semillas negras. En Ecuador se cultiva esta fruta en las siguientes provincias: Imbabura, Carchi, Tungurahua y Chimborazo, con climas fríos a temperaturas que oscilan entre 8 a 18 grados Celsius (Márquez, 2018).

#### **1.10.6. Durazno (*Prunus persica*)**

El durazno es una fruta originaria de Europa y fue traída a nuestro país hace muchos años atrás, hoy en día tenemos plantaciones en algunas provincias del Ecuador como: Tungurahua, Cotopaxi, Azuay, Pichincha, Imbabura y Chimborazo. Estas provincias gozan de condiciones climáticas favorables para el cultivo de esta fruta. Tiene una piel suave y aterciopelada, que puede ser de colores que van desde amarillo claro hasta rojo intenso, dependiendo de la variedad. Su pulpa es jugosa, de color amarillo o blanco, y tiene un sabor dulce y refrescante (TRUJILLO, 2021, pp. 33-40).

#### **1.10.7. Higo (*Ficus carica*)**

Los higos son pequeños frutos en forma de pera, que pueden tener diferentes colores, como verde, púrpura o negro, dependiendo de la variedad y el grado de madurez. Esta fruta es conocida por su sabor dulce y su textura suave y jugosa, también se pueden comer tanto frescos como secos, además son utilizados en una variedad de platos tanto dulces como salados. Es cultivable en diferente lugar del país como: Bolívar, Tungurahua, Chimborazo, Pichincha, Loja y Cotopaxi (González, Delgado & Ditto, 2005).

#### **1.10.8. Limón (*Citrus limon*)**

El árbol de limón produce fruta casi todo el año en clima cálido y húmedo, la temperatura puede oscilar entre 17 a 39 grados Celsius. En Ecuador se cultiva esta fruta en las siguientes provincias: Chimborazo, Tungurahua, Bolívar, Pastaza, Morona Santiago, Cotopaxi, Carchi e Imbabura. Los limones son redondos o en forma de óvalo, con una piel amarilla brillante y una pulpa jugosa y ácida. Son una excelente fuente de vitamina C, que es esencial para el sistema inmunológico y tiene propiedades antioxidantes. También contienen pequeñas cantidades de vitamina B, calcio, hierro, potasio y fibra dietética (INEN, 2008).

#### ***1.10.9. Manzana (Malus domestica)***

La manzana en el Ecuador se cultiva en las provincias de Tungurahua, Azuay, Chimborazo, Cotopaxi y Cañar. Estas provincias gozan de condiciones climáticas favorables para esta fruta, su forma es redonda y colores que van desde el verde, amarillo y rojo hasta combinaciones de estos tonos. La pulpa de la manzana es crujiente y jugosa, y su sabor puede variar desde dulce hasta ligeramente ácido, dependiendo de la variedad (Moscoso, 2014, pp. 1-10).

#### ***1.10.10.Pera (Pyrus communis)***

Las peras tienen una forma redondeada en la base y se estrechan hacia la parte superior. Su piel puede ser lisa o rugosa, y su color varía desde el verde claro y amarillo hasta el rojo y el marrón, dependiendo de la variedad y el grado de madurez. La pulpa de la pera es suave y jugosa, y puede tener diferentes sabores, desde dulce y delicado hasta ligeramente ácido. En Ecuador se cultiva esta fruta en la provincia de Tungurahua, en climas húmedos (AgroFresh, 2012).

## **CAPÍTULO II**

### **2. MARCO METODOLÓGICO**

#### **2.1. Características de la investigación**

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que las variables a evaluar son medibles como la concentración de I-131 y K-40 en las frutas. Los objetivos propuestos y las estrategias aplicadas en la investigación tienen un alcance exploratorio. El estudio se basa en un diseño transversal, ya que se recolectaron las muestras y obtuvimos la información en un periodo temporal concreto. Además, este trabajo de titulación combina trabajo de campo y de laboratorio.

#### **2.2. Población**

La población de estudio en esta investigación son todas las frutas cultivadas en la Sierra Ecuatoriana.

#### **2.3. Tamaño de muestra**

Las muestras fueron un total 10 frutas de la Sierra Ecuatoriana cultivadas en dos provincias: Chimborazo (cantones Chambo, Riobamba) y Tungurahua (cantones Ambato, Pelileo). Se utilizó un muestreo por conveniencia para seleccionar estas frutas: tomate de árbol, mora, fresa, taxo, tuna, higo, durazno, manzana, pera y limón,

#### **2.4. Localización del estudio**

La provincia de Tungurahua está constituida por 9 cantones (Ambato, San Pedro de Pelileo, Baños de Agua Santa, Patate, Pillaro, Quero, Cevallos, Mocha, Tisaleo) de las cuales se derivan sus respectivas parroquias urbanas y rurales, tiene una superficie de 3386 kilómetros cuadrados. Las actividades económicas en esta provincia corresponden al sector de la agricultura, el comercio, la manufacturación y el turismo, posee un clima templado-seco, tiene una temperatura promedio de 17 grados Celsius. En Tungurahua se cultiva una variada producción orgánica de frutas como fresa, mora, durazno, pera, manzana, uvilla, aguacate, tomate de árbol (CONGOPE, 2015).

Las muestras de manzana y pera se recolectaron en el cantón Ambato, es la capital de provincia de Tungurahua, así como la urbe más grande y poblada de la misma con una superficie de 1009

kilómetros cuadrados, se encuentra ubicado a 2.500 m.s.n.m. a una latitud de 1° 14' 30" S y a una longitud 78° 37' 11" O.

La muestra de tomate de árbol se recolecto en el cantón San Pedro de Pelileo, tiene una superficie de 202 kilómetros cuadrados, se encuentre ubicada a 2600 m.s.n.m. a una latitud de 1° 19' 50" S y una longitud 78° 32' 34" O.

La provincia de Chimborazo está constituida por 10 cantones (Alausí, Chambo, Chunchi, Colta, Cumandá, Guamote, Guano, Pallatanga, Penipe, Riobamba) de las cuales se derivan sus respectivas parroquias urbanas y rurales, tiene una superficie de 5999 kilómetros cuadrados, siendo la décima sexta provincia del país por extensión. Limita al norte con Tungurahua, al sur con Cañar, por el occidente con Bolívar, al suroeste con Guayas y al este con Morona Santiago (Chimborazo GAD Municipal, 2023). Las actividades económicas en esta provincia corresponden al sector de la ganadería, la agricultura, la pesca, el comercio, la manufacturación, la construcción y el turismo, posee un clima es regularmente frío con dos estaciones húmeda y seca, con temperaturas entre (18–27) grados Celsius. En Chimborazo existe una gran variedad de frutas como durazno, pera, albaricoques, manzanas, membrillo, tomate de árbol, taxo, nueces, capulí e higos (Popular, 2023).

Las muestras de fresa, mora, higo, durazno, taxo y tuna se recolectaron en el cantón Riobamba, es la capital de provincia de Chimborazo, es la urbe más grande y poblada de la misma con una superficie de 990 kilómetros cuadrados, se encuentra ubicado a 3500 m.s.n.m. a una latitud de 1° 40' 28" S y a una longitud 78° 38' 54" O.

La muestra de limón se recolecto en el cantón Chambo, se ubica a 8 kilómetros de la ciudad de Riobamba, tiene una superficie de 168 kilómetros cuadrados, se encuentre ubicada a 2780 m.s.n.m. a una latitud de 1° 44' 00" S y una longitud 78° 35' 00" O.

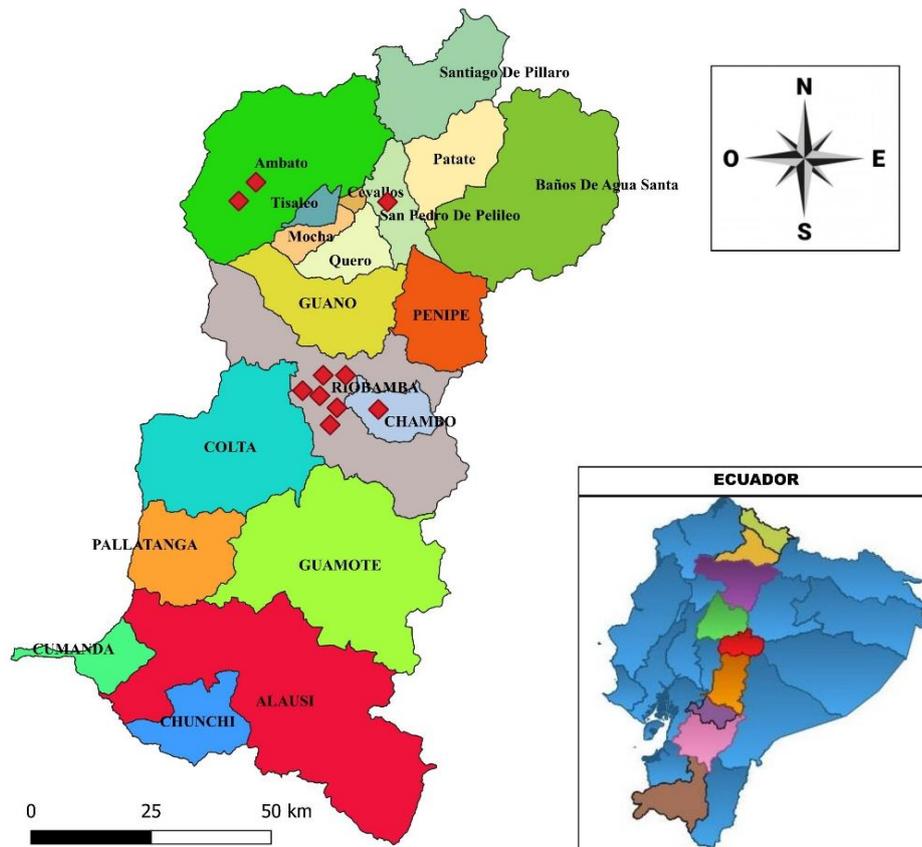
Las muestras de suelos de cultivos fueron recolectadas en las mismas coordenadas donde recolectamos las frutas.

**Tabla 2-1:** Coordenadas específicas de los puntos de recolección de las muestras de frutas y suelos de cultivo.

Frutas/Suelos	Cantones	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
Manzana	Ambato	1° 18' 23.6" S	78° 37' 51.3" O
Pera	Ambato	1° 18' 28.9" S	78° 37' 25.6" O
Tomate de Árbol	Pelileo	1° 19' 54.5" S	78° 31' 51.6" O
Fresa	Riobamba (San Luis)	1° 43' 12.9" S	78° 38' 48.2" O

Mora	Riobamba (San Luis)	1° 43' 13.5" S	78° 38' 48.3" O
Higo	Riobamba (Tunshi)	1° 45' 01.3" S	78° 37' 36.7" O
Durazno	Riobamba (Tunshi)	1° 45' 01.4" S	78° 37' 36.3" O
Tuna	Riobamba (Tunshi)	1° 45' 01.1" S	78° 37' 36.4" O
Taxo	Riobamba	1° 40' 54.6" S	78° 37' 21.7" O
Limón	Chambo	1° 43' 37.8" S	78° 35' 43.1" O

Realizado por: Freire, B., 2023



**Ilustración 2-1:** Derecha Mapa del Ecuador (Provincia de Tungurahua “color rojo” , Provincia de Chimborazo “color anaranjado”), Izquierda: rombos rojos son los puntos de muestreo

Realizado por: Freire, B., 2023

## 2.5. Método de preparación de la muestra de fruta

La determinación de la concentración de I-131 y K-40 usando el espectrómetro gamma Rug 91-2 de la marca ADANI, implica realizar un tratamiento previo a las muestras que se describe a continuación:

### Fase 1: Recolección de las frutas

Las frutas se recolectaron en haciendas y fincas de la zona de estudio. Se reunió aproximadamente 2 kg de fruta con un punto óptimo de madurez, buen tamaño, buen color y sin daño por plagas.



**Ilustración 2-2:** Recolección de frutas en el área de cultivo

**Realizado por:** Freire, B., 2023

### Fase 2: Pelado, corte y rebanado de la fruta

Se procedió a pelar, cortar y rebanar cada fruta utilizando un cuchillo de acero inoxidable para obtener rodajas de 12 mm, a excepción de la mora que no requirió cortes.



**Ilustración 2-3:** Pelado, corte y rebanado de las muestras frutales

**Realizado por:** Freire, B., 2023

### Fase 3: Secado de la fruta

En el laboratorio de biorremediación de la facultad de CIENCIAS-ESPOCH, se deshidrató las muestras frutales utilizando la estufa de secado "Binder RedLine RI 115", a una temperatura de 80 grados Celsius durante un periodo de tiempo que varió entre 72 y 96 horas, dependiendo de la fruta. Las muestras se colocaron en bandejas de aluminio para facilitar su distribución uniforme dentro de la estufa.



**Ilustración 2-4:** Secado de las muestras

Realizado por: Freire, B., 2023

### Fase 4: Trituración y pulverización

Se trituró todas las muestras frutales deshidratadas con un molino eléctrico de alimentos Thomas-Wiley, durante 5 minutos en pequeñas porciones para una mejor eficiencia del equipo.



**Ilustración 2-5:** Trituración de las muestras

Realizado por: Freire, B., 2023

## Fase 5: Tamizado, etiquetado y almacenado

Se tamizó las muestras a una granulometría de 0,5 mm, posteriormente se etiquetó y almacenó en recipientes plásticos para su análisis en el Laboratorio de Técnicas Nucleares.



**Ilustración 2-6:** Tamizado, etiquetado y almacenado

Realizado por: Freire, B., 2023

### 2.6. Método de recolección de la muestra de suelo donde se cultivó la fruta

Se recolectó 10 muestras de suelo correspondientes a los 10 lugares donde se cultivó la fruta, utilizando la técnica del barrero que se detalla a continuación:

- Se limpió la zona del suelo alrededor de la planta frutal aproximadamente 30 cm de diámetro, se insertó el Barreno hasta una profundidad de 30 cm cerca de la planta seleccionada, se colectó una muestra de suelo de aproximadamente 2 kg en fundas plásticas con el fin de protegerla de la humedad.
- Se llevó las muestras de suelo a su posterior secado, extenderla sobre una bandeja de Aluminio formando una capa de 10 cm, Luego se ingresó las bandejas con las muestras de suelo a la estufa de secado a una temperatura de 105 grados Celsius durante 24 horas.
- Se almacenó las muestras de suelo en fundas plásticas para ser tamizadas a una granulometría de 0,5 mm. Posteriormente se etiquetó y almacenó en recipientes plásticos para su correspondiente análisis en el Laboratorio de Técnicas Nucleares de la ESPOCH.



**Ilustración 2-7:** Recolección de la muestra de suelo del área de cultivo

Realizado por: Freire, B., 2023



**Ilustración 2-8:** Secado de las muestras de suelos

Realizado por: Freire, B., 2023



**Ilustración 2-9:** Etiquetado y almacenado de las muestras de suelos

Realizado por: Freire, B., 2023

## 2.7. Espectrómetro ADANI Rug 91-2

El análisis de las frutas con espectrometría gamma se realizó con el espectrómetro ADANI modelo Rug 91-2, fabricado para realizar la medición de la actividad específica de emisión gamma de los radionucleidos de Cs-134, Cs-137, I-131, K-40, Ra-226 y Th-232 en diferentes tipos de muestras alimenticias, líquidos, vegetales, madera, suelos, materiales industriales y de construcción. Para llevar a cabo estas mediciones, se emplea un detector compuesto por un centellador de yoduro de sodio activado con talio. Este detector se encuentra conectado a un tubo fotomultiplicador y un microcontrolador, los cuales constituyen los elementos esenciales del equipo utilizado en este proceso. En el caso específico del radionucleido K-40, el rango de medidas detectables en una muestra con una densidad de  $1 \text{ kg/cm}^3$  varía desde 50 hasta 20.000 Bq/kg con un error límite máximo permisible del  $\pm 20\%$ . Estos datos son fundamentales para comprender la precisión y limitaciones de las mediciones realizadas con el espectrómetro.

Las energías que se registran tienen un rango establecido de 50 a 3 000 KeV que son acumuladas y medidas en 1024 canales, donde se examina la dispersión de las magnitudes y se efectúa el cálculo de la actividad del radionucleido en cuestión. Los resultados son visualizados en tiempo real en el panel de control, el cual proporciona información como la tasa de registro de rayos gamma y la temperatura del fotomultiplicador, el tiempo actual y la concentración de la actividad específica en Bq/Kg con su margen de error asociado y cuyo análisis se realiza a partir del canal 17. La distribución de energías se divide en intervalos específicos para cada radionucleido, donde los picos de energía del Cs-134 son de 605 y 796 KeV, mientras que para Cs-137 es de 662 KeV y para el K-40 es 1461 KeV, los canales dispuestos en el equipo de detección para el Cs-137 son

del (200 al 240), para el Cs-134 es del (240 al 290), y para el K-40 es del (420 a 520) (ADANI, 2013, pp. 7-18).

En la utilización del espectrómetro es esencial garantizar que el entorno en el cual está instalado mantenga una temperatura de al menos 10°C. En caso de que la temperatura sea inferior, es necesario elevar la temperatura del entorno. Asimismo, con el propósito de incrementar la precisión de las mediciones, se aconseja llenar el recipiente Marinelli de 0.5 litros por completo y asegurarse de que la muestra a analizar sea uniforme. Esto implica realizar una evaluación de homogeneidad para evitar errores y una medición de la masa que no exceda el 2%, también se requiere llevar a cabo una calibración utilizando una muestra de KCl suministrada por el fabricante, la cual debe tener una actividad mínima de 16 KBq (ADANI, 2013, pp. 7-18).

El tiempo necesario para ajustar el modo de operación es de 5 minutos, el equipo puede funcionar de forma continua hasta 24 horas. El peso fuera del contenedor es de aproximadamente 52 kg, mientras que dentro del contenedor su peso aumenta a 62 kg.

El espectrómetro mide 255 mm de largo, 360 mm de ancho y 300 mm de alto y contiene varios elementos. Ver ilustración (2-10).

- Carcasa protectora recubierta de plomo, en su interior hay un espacio para insertar el marinelli para la muestra que se va analizar, y en el centro del orificio hay un detector de centelleo cilíndrico NaI (Tl) de 40 mm de diámetro y altura;
- Estructuras de transporte de equipos móviles;
- La tapa giratoria, forrada de plomo, es el elemento que gira para abrir la tapa protectora e introducir el marinelli;
- El panel frontal, que consta de una pantalla y un teclado, se utiliza para operar el dispositivo y mostrar los resultados del análisis; y
- Módulos electrónicos, que son unidades de procesamiento de datos para recibir, almacenar y enviar a software.

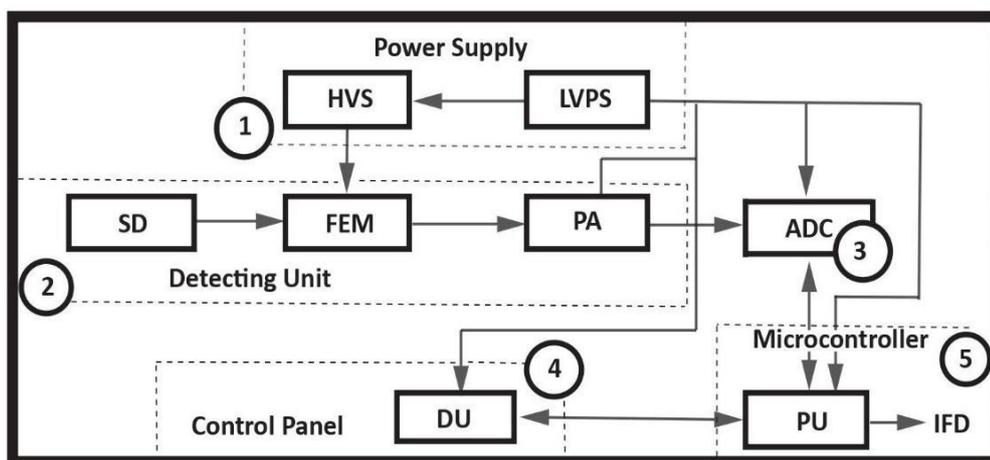


**Ilustración 2-10:** Espectrómetro ADANI Rug 91-2

**Fuente:** ADANI, 2013

Las funciones específicas de las unidades del espectrómetro son las siguientes:

1. La unidad de fuente de alimentación: está compuesta por una fuente de alimentación de baja tensión (LVPS) que se utiliza para rectificar, filtrar y regular el voltaje necesario para el funcionamiento de los componentes del espectrómetro, y una fuente de alto voltaje (HVS) que se utiliza para proporcionar energía al tubo fotomultiplicador (FEM).
2. La unidad de detección: es el lugar donde se encuentra el detector de centelleo (CD), que convierte los cuantos de rayos gamma en fotones de luz visible para ser llevados a la FEM como impulsos de corriente. También se encuentra un amplificador preliminar (PA) que convierte los impulsos de corriente generados por el fotomultiplicador en impulsos de voltaje (ADANI, 2013, p. 14).
3. Conversor analógico digital (ADC): convierte los impulsos de voltaje en un código digital.
4. Panel de control: consiste en un monitor y teclas usado para los ajustes del modo de operación del espectrómetro.
5. Microcontrolador: consta de una unidad de procesamiento (PU) usada para recibir, almacenar y enviar datos. Además de la interfaz del dispositivo (IFD) para intercambiar datos con equipos externos.



**Ilustración 2-11:** Esquema general del espectrómetro Rug 91-2

Fuente: ADANI, 2013

El software Rug 91-2 permite realizar mediciones de muestras a través de un ordenador. En la Tabla (2-2) se detallan los requisitos técnicos necesarios para que el software del instrumento funcione adecuadamente.

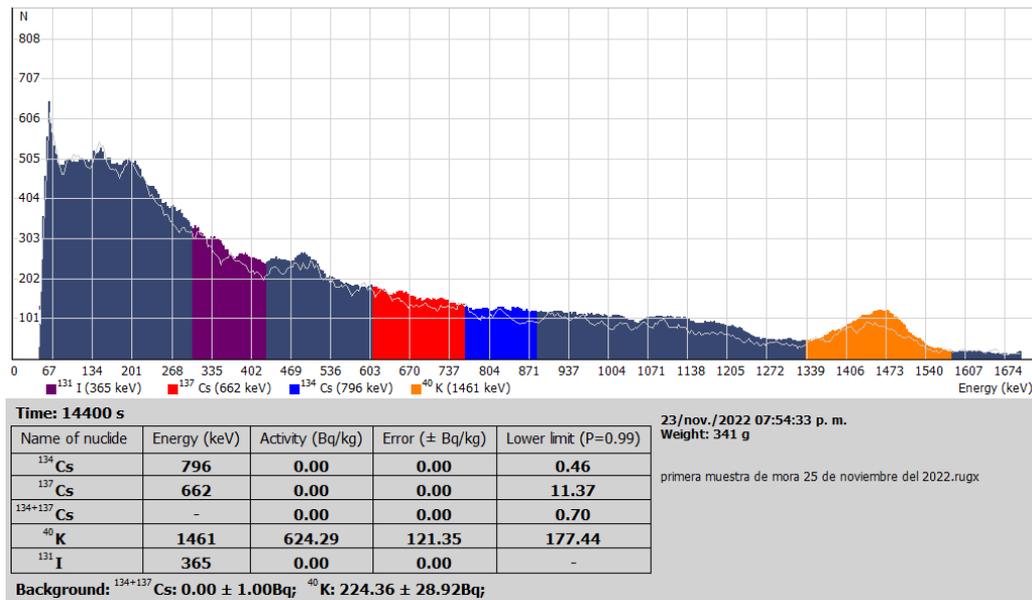
**Tabla 2-2:** Requisitos técnicos para utilizar el software en el ordenador.

Procesador	Al menos Intel Pentium 4.1GHz
Disco duro	Al menos 4GB
RAM	Al menos de 512MB
Monitor	Al menos 1024 x 600
Tarjeta de video	Al menos 32MB
Sistema operativo	Windows XP (32 bit) o Windows 7 (64bit)
Navegador	Internet Explorer 7.0 o superior
USB	Soporte para USB 2.0

Fuente: ADANI, 2013, p. 8

Realizado por: Freire, B., 2023.

El programa cuenta con un menú principal en su interfaz, desde donde es posible ingresar los parámetros de medición. En la siguiente sección, se describirá detalladamente el procedimiento para medir la actividad específica de los radionucleidos. Además, en la ilustración (2-12) se muestra la interfaz gráfica del software Rug 91-2.



**Ilustración 2-12:** Interfaz gráfica del Rug 91-2

Fuente: ADANI, 2013

Existen tres extensiones principales en las que se pueden guardar los resultados de la medición de la concentración de actividad:

- La extensión ".rugx" permite visualizar la interfaz del software, donde se muestra información detallada sobre la muestra analizada, como el espectro gamma, la tabla de concentración de actividad de los radionucleidos detectados, la masa, el tiempo de adquisición de datos, entre otros. Esta visualización se ilustra en la figura (1-6).
- La extensión ".txt" genera un informe detallado del análisis. En este archivo, se puede encontrar información específica sobre el background (fondo), como la tasa de conteo de cada radioisótopo, además de una tabla de resultados similar a la observada en la extensión anterior.
- La extensión ".dat" proporciona un archivo en formato de cálculo que muestra los resultados del estudio en función de los canales y sus correspondientes pulsos en las primeras dos columnas.

## 2.8. Procedimiento de medición de actividad específica de las muestras

La técnica de medición de los radionucleidos antes mencionados se realizar en tres etapas: a) calibración, b) background y c) análisis de muestra, garantizan una correcta determinación de las actividades de los radionucleidos en las muestras analizadas.

### **a) Calibración**

El proceso de calibración del espectrómetro consta de los siguientes pasos:

1. Se abre la cubierta giratoria del espectrómetro para acceder al área de muestra y colocar la muestra de KCl proporcionada por el fabricante dentro del espectrómetro, asegurándose de ubicarla correctamente en la posición designada.
2. Se cierra la cubierta giratoria para asegurar un ambiente adecuado para el análisis.
3. Se presiona "MENU", ubicado en el teclado del panel frontal del equipo y seleccionamos la opción "CALIBRATION", esperamos que en la pantalla del panel frontal se genere el mensaje de CALIBRATION COMPLET. Este proceso es automático y puede durar hasta 600 segundos.

### **b) Background**

La medida del background solo es necesaria cuando se presentan cambios significativos en las condiciones de medición de la concentración específica de las muestras o de la temperatura del espectrómetro para su análisis, se debe utilizar una muestra no radiactiva (agua destilada), y un tiempo de medición de al menos 1200 segundos, aunque 3600 segundos es lo recomendable.

Para llevar a cabo la fase de background, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se vertió agua destilada en el marinelli, asegurarse de llenarlo completamente y taparlo correctamente para evitar cualquier tipo de contaminación externa.
2. Se inserta el marinelli con el agua destilada en el espectrómetro y cerramos la cubierta giratoria para crear un entorno adecuado.
3. Se accede al menú en el panel frontal, seleccionamos la opción "TIME", para programar el tiempo de ejecución de 3600 segundos.
4. Se selecciona la opción "WEIGHT", para programar la masa en gramos ( $459,6 \pm 1$ ) del agua destilada del marinelli.
5. Se elige la opción "BACKGROUND" para iniciar el proceso de medición, una vez finalizado el proceso extraemos el marinelli con agua destilada del espectrómetro.

### c) Análisis de la muestra

1. Se llena completamente el marinelli con la muestra tamizada de fruta, pesamos y colocamos en el espectrómetro, asegurándose de cerrar adecuadamente la cubierta giratoria.
2. Se presiona el botón "MENÚ" en el panel frontal, seleccionamos la opción "TIME" para establecer el tiempo de medición, que para esta investigación fue de 14400 segundos (4 horas).
3. Se selecciona la opción "WEIGHT" para introducir manualmente el peso de la muestra en gramos de forma manual, pero también es posible controlar este parámetro a través del software Rug 91-2.
4. Se selecciona la opción "START" para iniciar el proceso del análisis, una vez finalizado el análisis, los datos generados por el espectrómetro pueden ser guardados en los formatos previamente indicados anteriormente.
5. Se tomaron 3 mediciones repetidas de cada muestra de fruta y suelo de cultivo, que nos permitieron obtener el valor medio de la concentración de la actividad específica y las respectivas desviaciones estándar.
6. Para calcular la capacidad de absorción desde el suelo a la planta, se calculó a través de la siguiente ecuación en base a los parámetros de la IAEA.

$$Cc = \frac{Acf (Bq/Kg)}{Acs (Bq/Kg)} \times 100\% \quad \text{Ecuación (1.2)}$$

Donde:

Cc representa la capacidad de absorción, Acf es la concentración de la actividad específica de la fruta, Acs es la concentración de la actividad específica del suelo de cultivo.



**Ilustración 2-13:** Análisis de muestras en el espectrómetro ADANI Rug 91-2

**Realizado por:** Freire, B., 2023.

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

#### 3.1. Actividad específica de I-131 y K-40

La Tabla (3-1) se presenta el peso de las muestras de frutas, la concentración media de la actividad específica de I-131 y K-40 y las respectivas desviaciones estándar (calculadas con los valores de las tres mediciones repetidas).

**Tabla 3-1:** Concentración media de la actividad específica de I-131 y K-40 de diez frutas de la Sierra Ecuatoriana.

Fruta	Peso de la muestra (gramos)	Concentración media de la actividad específica de I-131 (Bq/Kg)	Desviación estándar (Bq/Kg)	Concentración media de la actividad específica de K-40 (Bq/Kg)	Desviación estándar (Bq/Kg)
Tomate de Árbol	331± 1	0	-	423,75	16,01
Fresa	340± 1	0	-	470,34	8,35
Mora	341± 1	0	-	486,77	25,80
Taxo	360± 1	0,06	0,01	377,59	4,90
Tuna	317± 1	0,06	0,04	469,75	8,32
Durazno	345± 1	0,11	0,02	486,86	8,76
Higo	251± 1	0,12	0,05	457,34	22,31
Limón	283± 1	0,21	0,04	437,49	12,76
Manzana	300± 1	0,15	0,04	396,10	13,25
Pera	388± 1	0,14	0,02	305,13	9,77

Realizado por: Freire, B., 2023

La concentración media de la actividad específica del I-131 en las frutas analizadas varían entre 0,06 y 0,21 (Bq/Kg), no se observó este elemento en el tomate de árbol, fresa y mora. En el manual no especifican un mínimo detectable para el I-131. La concentración de la actividad específica del K-40 está un rango 305-487 (Bq/Kg), la media más alta se evidenció en el durazno (486,86 Bq/Kg) y el valor más bajo en la pera (305,13 Bq/Kg). Los valores encontrados en esta

investigación para el radionucleido K-40 se encuentran por encima al valor mínimo detectable del espectrómetro Rug 91-2 (50 Bq/Kg).

### 3.2. Actividad específica media de I-131 y K-40 en los suelos de cultivo de las frutas

En Tabla (3-2) se observa el peso de las muestras de suelo de cultivo, los resultados de la concentración media de la actividad específica de I-131 y K-40 y las respectivas desviaciones estándar (calculadas con los valores de las tres mediciones repetidas).

**Tabla 3-2:** Concentración media de la actividad específica de I-131 y K-40 de los suelos de cultivo de las frutas.

Suelo de cultivo	Peso de la muestra (gramos)	Concentración media de la actividad específica de I-131 (Bq/Kg)	Desviación estándar (Bq/Kg)	Concentración media de la actividad específica de K-40 (Bq/Kg)	Desviación estándar (Bq/Kg)
Tomate de Árbol	628± 1	0,20	0,02	760,68	15,07
Fresa	660± 1	0,20	0,03	584,22	84,31
Mora	624± 1	0,29	0,09	611,21	17,97
Taxo	700± 1	0,29	0,01	819,79	82,63
Tuna	692± 1	0,33	0,01	815,02	48,20
Durazno	665± 1	0,33	0,02	554,05	41,61
Higo	626± 1	0,33	0,02	667,67	46,98
Limón	562± 1	0,21	0,04	440,99	36,28
Manzana	669± 1	0,35	0,01	448,22	12,41
Pera	721± 1	0,27	0,02	376,98	15,04

Realizado por: Freire, B., 2023

Los valores de la concentración media de la actividad específica del I-131 de los suelos analizados varían entre 0,20 y 0,35 (Bq/Kg), la media más alta se observó en el suelo de cultivo de manzana (0,35 Bq/Kg) y el valor más bajo en el suelo de cultivo de tomate de árbol (0,20 Bq/Kg) y el suelo de cultivo de fresa (0,20 Bq/Kg). En todas las muestras de los suelos analizados se observó la presencia de K-40, la concentración de la actividad específica del K-40 está un rango 376-820 (Bq/Kg), la media más alta se evidenció en el suelo de cultivo de taxo (819,79 Bq/Kg) y el valor más bajo en el suelo de cultivo de pera (376,98 Bq/Kg).

### 3.3. Capacidad de absorción de I-131 y K-40 de la planta desde el suelo de cultivo

La capacidad de absorción se calculó usando la Ecuación (1.2) de la Sección (2.8), cuyos resultados se muestra en la Tabla (3-3).

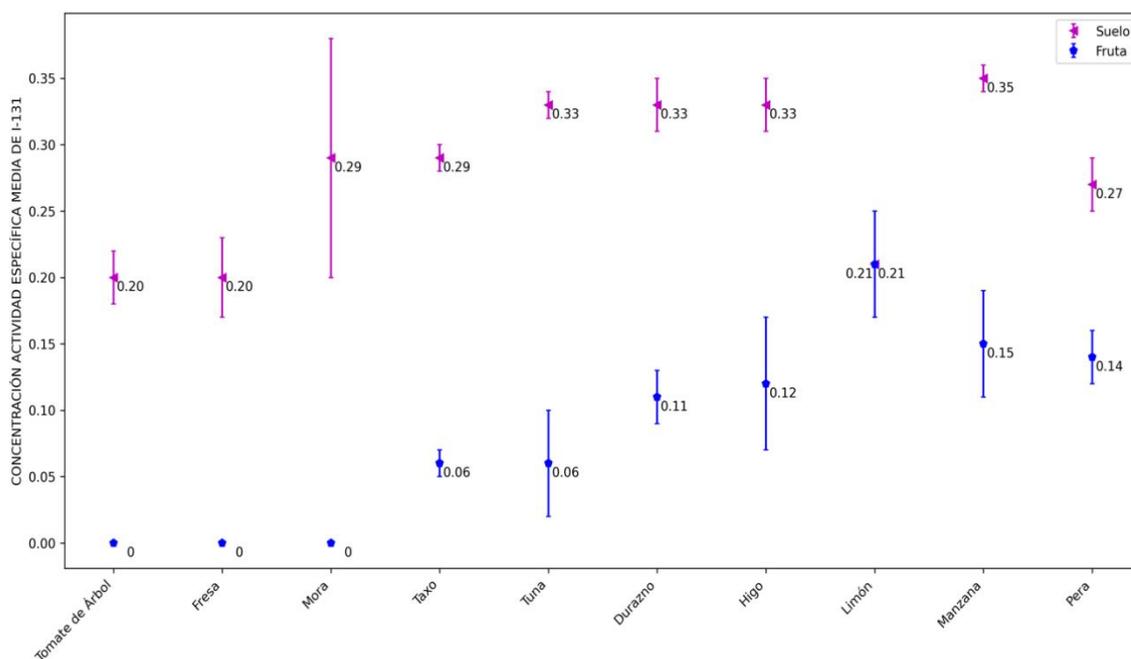
Se puede observar que el limón y la pera absorben más del 50% de I-131 desde el suelo, la manzana absorbe más del 40%, el higo y el durazno absorben más del 30%, el taxo y la tuna absorben más del 15%, mientras que el tomate de árbol, la fresa y la mora no absorben este radionucleido. El limón presenta un poder de absorción mayor a 99% de K-40 desde el suelo, la manzana, el durazno, la pera y la fresa presentan porcentajes de absorción mayores a 80%, la mora y el higo presentan porcentajes de absorción mayores a 60%, el tomate de árbol y la tuna presentan porcentajes de absorción mayores a 50%, mientras el taxo presenta un poder de absorción mayor 40%.

**Tabla 3-3:** Poder de absorción de I-131 y K-40 desde el suelo a la planta.

Fruta	Poder de absorción I-131 (%)	Poder de absorción K-40 (%)
Tomate de Árbol	0 %	55,71 %
Fresa	0 %	80,51 %
Mora	0 %	71,88 %
Taxo	20 %	46,05 %
Tuna	18,18 %	57,64 %
Durazno	33,33 %	87,87 %
Higo	36,36 %	68,50 %
Limón	58,33 %	99,21 %
Manzana	42,86 %	88,37 %
Pera	51,85 %	80,95 %

**Realizado por:** Freire, B., 2023

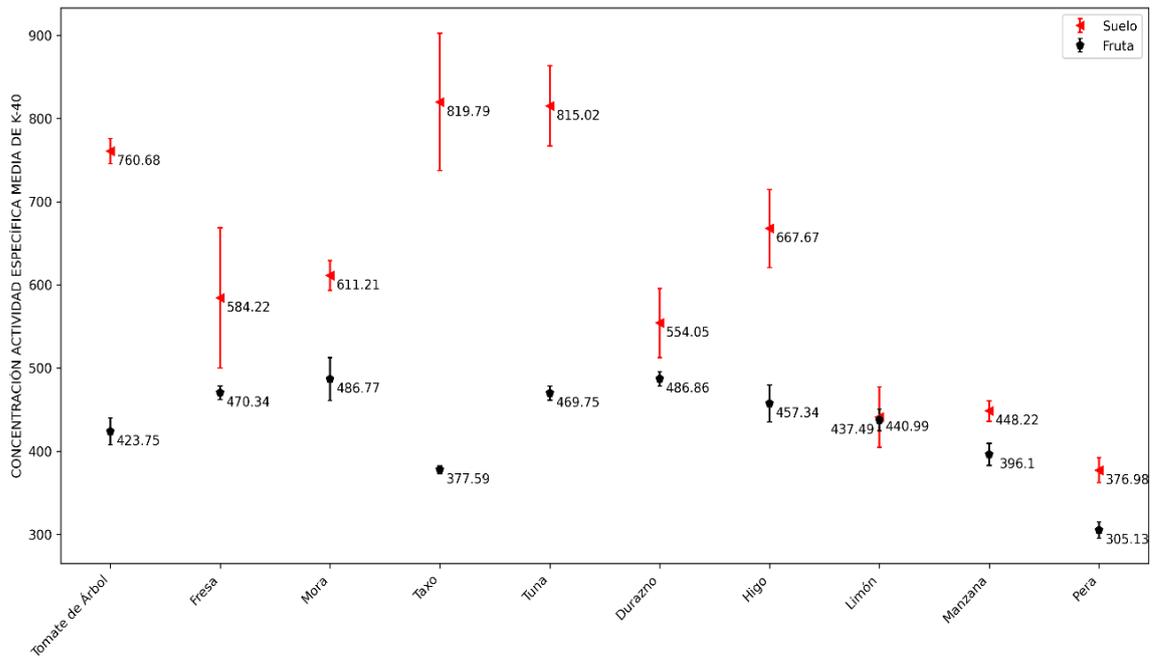
La Ilustración (3-1), muestra la comparación de la concentración media de la actividad específica de I-131 entre los suelos de cultivo y frutas, es evidente que los valores de las concentraciones de los suelos son mayores al de las frutas, todos los resultados tanto en suelo como en la fruta son compatibles entre sí, dentro de las incertidumbres, excepto tomate de árbol, fresa y mora que no presentan valores de este radionucleido. Las barras de color rosado representan la desviación estándar de los suelos, mientras las barras de color azul representan la desviación estándar de las frutas.



**Ilustración 3-1:** Comparación de la concentración media de la actividad específica de I-131 entre los suelos de cultivo y las frutas

**Realizado por:** Freire, B., 2023

La Ilustración (3-2), presenta la comparación de la concentración media de la actividad específica de K-40 entre los suelos de cultivo y frutas. En los suelos de cultivo se observa cuatro grupos de concentraciones medias, el primer grupo está conformado por los suelos de cultivo del tomate de árbol, taxo y tuna que muestra valores compatibles dentro de los errores experimentales, el segundo grupo está constituido por los suelo de cultivo del higo, la fresa, la mora y el durazno los cuales muestran valores compatibles entre sí, el tercer grupo está constituido por los suelos de cultivo del limón y la manzana que presentan el mismo valor, dentro de las incertidumbres y el cuarto grupo está conformado por suelo de cultivo de la pera que muestra un valor que no es compatible con los demás suelos y es el valor más bajo.



**Ilustración 3-2:** Comparación de la concentración media de la actividad específica de K-40 entre los suelos de cultivo y frutas

**Realizado por:** Freire, B., 2023

En el caso de las frutas se evidencia dos grupos de concentraciones medias de la actividad específica que están formados de la siguiente manera, el primer grupo está constituido por la mora, el durazno, el higo, la fresa, la tuna, el limón, el tomate de árbol y la manzana que presentan valores compatibles entre sí, mientras que el taxo y la pera presentan valores más bajos.

## CONCLUSIONES

- La comparación de la concentración media de la actividad específica de I-131 entre los suelos de cultivo y frutas, evidenció que los valores de las concentraciones en los suelos son mayores que en las frutas, los valores de la actividad específica de I-131 de los suelos analizados varían entre 0,20 y 0,35 (Bq/Kg), los valores de la actividad específica en las frutas analizadas están en un rango 0,06 y 0,21 (Bq/Kg), no se observó este elemento en el tomate de árbol, fresa y mora.
- Los resultados de las mediciones de K-40 mostraron los valores de la concentración media de la actividad específica de los suelos los cuales están en un rango 376-820 (Bq/Kg), la media más alta se evidenció en el suelo de cultivo de taxo (819,79 Bq/Kg) y el valor más bajo en el suelo de cultivo de pera (376,98 Bq/Kg). La concentración media de la actividad específica de K-40 en las frutas está un rango 305-487 (Bq/Kg), la media más alta se evidenció en el durazno (486,86 Bq/Kg) y el valor más bajo en la pera (305,13 Bq/Kg).
- La capacidad de absorción de I-131 de las plantas frutales, cultivadas en los suelos de la Sierra Ecuatoriana, es variable, el limón y la pera presentaron porcentajes de absorción mayores a 50%, la manzana, el higo y el durazno mostraron porcentajes de absorción mayores a 30%, el taxo y la tuna porcentajes de absorción mayores a 15%, mientras que el tomate de árbol, la fresa y la mora no absorben este radionucleido.
- La capacidad de absorción de K-40 del limón fue mayor a 99%, la manzana, el durazno, la pera y la fresa presentaron porcentajes de absorción mayores a 80%, la mora, el higo, el tomate de árbol y la tuna mostraron porcentajes de absorción mayores a 50%, mientras el taxo presentó un poder de absorción mayor 40%.

## **RECOMENDACIONES**

- Desarrollar nuevas investigaciones relacionadas a la presencia de I-131 y K-40 en otros alimentos, como verduras, carnes, leche, entre otros.

## **GLOSARIO**

### **Radionucleidos**

**Cs-134**, isótopo radiactivo del cesio con 134 nucleones.

**Cs-137**, isótopo radiactivo del cesio con 137 nucleones.

**I-131**, isótopo radiactivo del yodo con 131 nucleones.

**K-40**, isótopo radiactivo del potasio con 40 nucleones.

**Th-234**, isótopo radiactivo del torio con 234 nucleones.

**Ra-226**, isótopo radiactivo del radio con 226 nucleones.

**C-14**, isótopo radiactivo del carbono con 14 nucleones.

**U-238**, isótopo radiactivo del uranio con 238 nucleones.

**Sr-90**, isótopo radiactivo del estroncio con 90 nucleones.

**Pu-239**, isótopo radiactivo del plutonio con 239 nucleones.

**Xe-131**, isótopo radiactivo del xenón con 131 nucleones.

**C-40**, isótopo radiactivo del carbono con 40 nucleones.

**Ar-40**, isótopo radiactivo del argón con 40 nucleones.

**Ru-106**, isótopo radiactivo del rutenio con 106 nucleones.

**I-129**, isótopo radiactivo del yodo con 129 nucleones.

**U-235**, isótopo radiactivo del uranio con 235 nucleones.

**Sr-89**, isótopo radiactivo del estroncio con 89 nucleones.

**Ru-103**, isótopo radiactivo del rutenio con 103 nucleones.

**C-144**, isótopo radiactivo del cerio con 144 nucleones.

## BIBLIOGRAFÍA

**ADANI.** *Operation manual.* 2013

**AESAN.** 2020. *Contaminación radioactiva.* [Consulta: 13 de enero del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/mkspf>

**AGROFRESH.** 2012. *Ecuador: Las peras, manzanas y mandarinas en apogeo.* [Consulta: 15 de marzo del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/7oqs5>

**AOUIDI et al.** “Transfer of 40K, 226Ra and 210Pb from soil to plants in various locations of El-Jadida agricultural area (north-western Morocco)”. *E3S Web Conf* [En línea], 2001, vol. 314 (1), pp. 1-4. [Consulta: 19 de febrero del 2023]. ISSN 1090-7805. Disponible en: <https://n9.cl/ejhf7>

**ATSDR.** 1999. *Resúmenes de Salud Pública - Radiación ionizante (Ionizing Radiation).* [Consulta: 06 de abril del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/anxe>

**AUDICIO, Paola.** 2010. *Espectrometría de Radiación gamma.* [Consulta: 26 de noviembre del 2022]. Disponible en: <https://n9.cl/6rzfm>

**ÁVILA, María, CALVINO, Vanesa, LÓPEZ, Antonio.** *Introducción a la radioquímica.* 1ª Ed. Madrid-España: UNED, 2018, ISBN 978-84-362-7156-0.

**BARREDO, Fernando.** Determinación y seguimiento de  $^{131}\text{I}$ ,  $^{210}\text{Po}$  y otros radionucleidos en diferentes entornos laborales (Trabajo de titulación) (Doctoral). Universidad de Valladolid. Valladolid-España. 2010. [Consulta: 20 de noviembre del 2022]. Disponible en: <https://n9.cl/9tx9f>

**CHIQUI, Flor, LEMA, Marcia.** Evaluación del rendimiento en el cultivo de fresa (*fragaria sp*) variedad oso grande, bajo invernadero mediante dos tipos de fertilización (orgánica y química) en la parroquia Octavio Cordero Palacios, Cantón Cuenca (Tesis) (Grado). Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca-Ecuador. 2010. [Consulta: 28 de marzo del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/dzbsr>

**CODEX STANDARD, 2013.** *Norma general del codex para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos.* [Consulta: 03 de enero del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/4ijh3>

**CONGOPE.** *Desarrollo territorial en Ecuador, situación actual y perspectivas.* 1ª Ed. Quito-Ecuador: Abya-Yala, 2015, ISBN 978-9942-09-311-0.

**CORTÉS, Leonardo, ARIAS, Julián.** 2007. *El Contador Geiger como Herramienta en la Enseñanza del Concepto de Radiación.* [Consulta: 19 de noviembre del 2022]. Disponible en: <https://n9.cl/rhxua>

**DUNN, William, McGREGOR, Douglas.** *Gamma-Ray Detectors.* 1ª Ed. Berlin-Alemania: Springer, 2012, ISBN 978-3-642-13270-4

**EPA.** 2010. *Efectos de la radiación sobre la salud.* [Consulta: 21 de febrero del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/dt97a>

**FAO, OMS, OPS.** 2015. *Educación en inocuidad de alimentos: Glosario de términos.* [Consulta: 9 de agosto del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/ax2n3>

**GARCÍA, Luz, SCHLATTER, Juan.** "Caracterización de suelos a lo largo de un gradiente altitudinal en Ecuador". *Revista Brasileira De Ciências Agrárias* [En línea], 2012, vol. 7 (3), pp. 456-464. [Consulta: 12 de mayo del 2023]. ISSN 1981-0997. Disponible en: <https://n9.cl/skhue>

**GONZALEZ, Gissela, DELGADO, Cecilia, TOBALINA, Constantino.** Proyecto de producción y comercialización de higo (Tesis) (Grado). Escuela Superior Politecnica de litoral. Guayaquil-Ecuador. 2009. [Consulta: 28 de enero del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/rv1ob>

**GONZÁLEZ, E. R.; BONZI, Edgardo.** "Determinación de K-40 en alimentos por espectrometría gamma con un detector de NaI(Tl) y simulaciones Monte Carlo" (2011). *AnalesAFA* [En línea], 2011, vol 23(01): pp. 185-188. [Consulta: 03 de agosto del 2023]. ISSN 1850-1168. Disponible en: <https://n9.cl/v2r52>

**IAFA.** 1996. *Direct Methods for Measuring Radionuclides in the Human Body.* [Consulta: 24 de abril del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/qjqw4>

**IAFA.** 1996. *Tratamiento con Yodo Radiactivo, <sup>131</sup>I, ¿Comó, Cúando, Dónde?*. [Consulta: 24 de abril del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/fnli0>

**IAEA.** 2017. *Radiactividad natural en los alimentos: expertos discuten la armonización de las normas internacionales*. [Consulta: 09 de diciembre del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/jo46d>

**INEN.** 2008. *Frutas frescas. Limón. Requisitos*. [Consulta: 28 de marzo del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/2prng>

**KIOUPI, Vasiliki, FLOROU, Heleny, KAPSANAKI-GOTSI, Evangelia, GONOU-ZAGOU, Zacharoula.** “Bioaccumulation of the artificial Cs-137 and the natural radionuclides Th-234, Ra-226, and K-40 in the fruit bodies of Basidiomycetes in Greece”. *Environ Sci Pollut Res* [En línea], 2016, vol. 23, pp. 613–624. [Consulta: 28 de noviembre del 2022]. ISSN 1090-7815. Disponible en: <https://n9.cl/6ite0>

**KNOLL, Glenn.** *Radiation Detection and Measurement*. 4<sup>ta</sup> Ed. Nueva York, Estados Unidos: Wiley, 2010, ISBN13 9780470131480.

**INEN.** 2018. *Contaminación de Alimentos por Isótopos radiactivos*. [Consulta: 01 de febrero del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/5fpc1u>

**INLAGO, Carmen.** Evaluación de la variabilidad morfológica de taxo (*passiflora tripartita juss*) cultivado en chacras de agricultores de la provincia de Imbabura (Tesis) (Grado). Universidad Técnica del Norte. 2020. [Consulta: 22 de mayo del 2022]. Disponible en: <https://n9.cl/57pik>

**MÁRQUEZ, Cristina.** 2018. *La tuna atrae a más agricultores*. [Consulta: 18 de febrero del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/kz1k7>

**MARTÍNEZ, Marlon, PUEDMAG, Carmen.** Determinación de índices alfa y gamma de granitos comúnmente usados como materiales de construcción en la ciudad de Riobamba (Tesis) (Grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 2021. [Consulta: 20 de abril del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/y8z26e>

**MÁRQUEZ, Paola.** Diseño de protocolos en control de calidad de medicina nuclear en una IPS de alta complejidad de Bogotá (Trabajo de grado) (maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá-Colombia. 2019. [Consulta: 11 de mayo del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/ihcpt>

**VINUEZA, Susana.** Producción y comercialización de durazno (*Prunus Pérsica L.*) variedad diamante, en la provincia de Imbabura (Tesis) (Grado). Universidad Técnica del Norte. Ibarra-Ecuador. 2021. [Consulta: 03 de julio del 2023]. Disponible en: <https://n9.cl/v54yzh>



## **ANEXOS**

### **ANEXO A: RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA DE MORA**



### **ANEXO B: RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA DE HIGO**



### **ANEXO C: RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA DE TUNA**



**ANEXO D:** RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA DE DURAZNO



**ANEXO E:** RECOLECCIÓN DE LA MUF DE SUELO DE CULTIVO DE TUNA



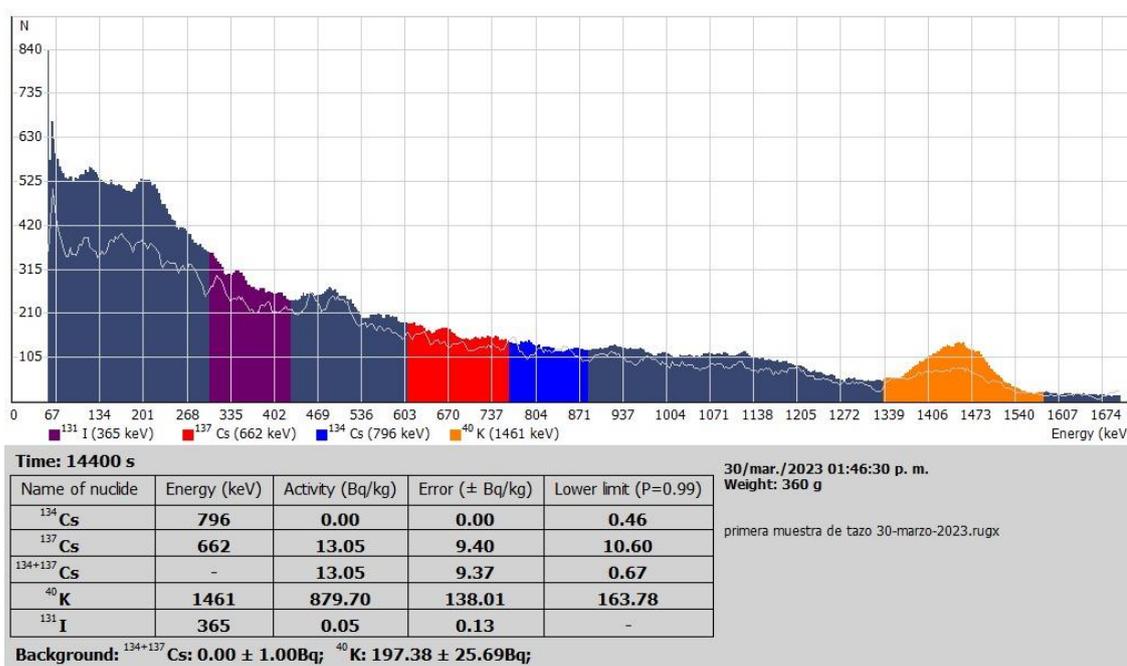
**ANEXO F: RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA DE SUELO DE CULTIVO DE HIGO**



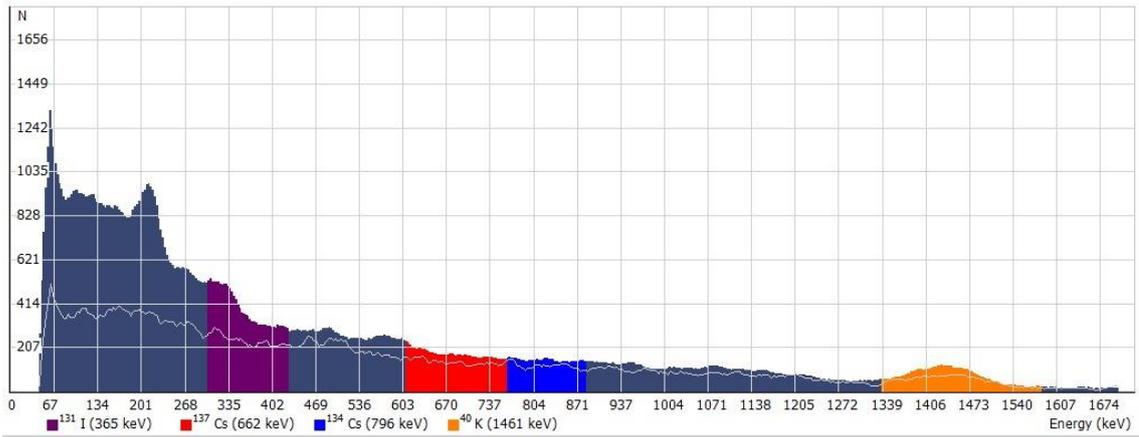
**ANEXO G: RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA DE SUELO DE CULTIVO DE MANZANA**



**ANEXO H: RESULTADO DE ANÁLISIS CON EL ESPECTRÓMETRO RUG 91-2 DE LA MUESTRA DE TAXO**



**ANEXO I: RESULTADO DE ANÁLISIS CON EL ESPECTRÓMETRO RUG 91-2 DE LA MUESTRA DE SUELO DE TAXO**



**Time: 14400 s**

Name of nuclide	Energy (keV)	Activity (Bq/kg)	Error ( $\pm$ Bq/kg)	Lower limit (P=0.99)
<sup>134</sup> Cs	796	0.26	3.79	0.24
<sup>137</sup> Cs	662	5.64	3.92	5.45
<sup>134+137</sup> Cs	-	5.90	3.91	0.35
<sup>40</sup> K	1461	378.47	64.27	84.23
<sup>131</sup> I	365	0.29	0.07	-

**Background:** <sup>134+137</sup>Cs:  $0.00 \pm 1.00$ Bq; <sup>40</sup>K:  $197.38 \pm 25.69$ Bq;

**26/abr./2023 08:04:35 p. m.**  
**Weight: 700 g**  
 Primera muestra de tierra de taxo 27 de abril del 2023.rugx



esPOCH

Dirección de Bibliotecas y  
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y  
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 14 / 12 / 2023

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Brayan Alexander Freire Fiallos
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Ciencias
<b>Carrera:</b> Física
<b>Título a optar:</b> Físico
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

994-DBRA-UPT-202