



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA DE BIOFÍSICA

**DETERMINACIÓN DE LA TASA DE EXHALACIÓN DE GAS
RADÓN DE LA CEBOLLA, AJO Y ZANAHORIA USANDO LA
TÉCNICA ELECTRET ION CHAMBER**

Trabajo de titulación

Tipo: Trabajo Experimental

Presentado para optar al grado académico de:

BIOFÍSICO

AUTORES: JUAN CARLOS CHIMBO PILCO

ALEX ERNESTO BUÑAY CAIZAGUANO

DIRECTORA: Dra. Jheny Orbe Ordoñez

Riobamba – Ecuador

2021

©2021, Juan Carlos Chimbo Pilco y Alex Ernesto Buñay Caizaguano

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

Nosotros, Juan Carlos Chimbo Pilco y Alex Ernesto Buñay Caizaguano, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos 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, 01 de marzo de 2021

JUAN CARLOS CHIMBO PILCO
020234179-8

ALEX ERNESTO BUÑAY CAIZAGUANO
172689029-4

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE BIOFÍSICA

El Tribunal de Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo trabajo experimental “**DETERMINACIÓN DE LA TASA DE EXHALACIÓN DE GAS RADÓN DE LA CEBOLLA, AJO Y ZANAHORIA USANDO LA TÉCNICA ELECTRET ION CHAMBER**”, realizado por los señores: **JUAN CARLOS CHIMBO PILCO** y **ALEX ERNESTO BUÑAY CAIZAGUANO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Dr. Richard Willians Pachacama Choca PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	_____	2021-03-01
Dra. Jheny del Carmen Orbe Ordoñez DIRECTORA DE TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	2021-03-01
MsC. María Fernanda Heredia Moyano MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	2021-03-01

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación se lo dedico a mis padres, hermanos y profesores.

Juan Carlos.

El presente trabajo lo dedico principalmente a Dios, por darme fuerzas para culminar este proceso de titulación. A mis padres Guillermo Buñay y Dolores Caizaguano quienes han velado por mí durante todo el camino para convertirme en un profesional, y que siempre me apoyaron de manera incondicional en la parte moral y económica para poder culminar mi carrera. A toda mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de mi carrera universitaria y toda mi vida.

Alex.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, por su paciencia, dedicación y cuidado. Por apoyarme incondicionalmente cada segundo de mi vida. A mis hermanos, por ser mi guía y razón para no rendirme jamás.

A mis amigos, los chapulines por ser mi segunda familia. Por el apoyo sincero e incondicional brindado.

A mis estimados profesores de la ESPOCH.

A mi tutora, la Dra. Jheny Orbe por la confianza, apoyo y paciencia brindada en esta parte final de la carrera.

Juan Carlos.

A mis padres Guillermo Buñay y Dolores Caizaguano por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente, por todo su amor, comprensión. Pero sobre todo gracias por la paciencia que me han tenido.

A mis tíos y hermanos Freddy, Maritza y Pamela; por llenarme de alegría día tras día.

A mis amigos, de manera especial a Los Chapulines, con los que compartí dentro y fuera de las aulas, aquellos que serán mis colegas, gracias por todo su apoyo y diversión.

A mis queridos profesores de la ESPOCH. Especialmente a Biof. Cristian Vacacela, al Dr. Richard Pachacama.

A mi tutora Dra. Jheny Orbe por su predisposición y dedicación en el presente trabajo.

Alex.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS	xii
RESUMEN	xiv
SUMMARY	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. Fuentes de radiación ionizante	3
<i>1.1.1. Fuentes naturales</i>	<i>3</i>
<i>1.1.2. Fuentes artificiales</i>	<i>5</i>
1.2. Radón	6
1.3. Propiedades físicas y químicas del radón	7
1.4. Mecanismos de generación y transporte del radón	11
1.4.1. Difusión	11
1.4.2. Convección	12
1.5. Riesgo de cáncer por radón	13
1.6. Magnitudes físicas de interés	14
<i>1.6.1. Actividad</i>	<i>14</i>
<i>1.6.2. Concentración de la actividad</i>	<i>14</i>
<i>1.6.3. Tasa de exhalación másica de radón</i>	<i>15</i>
<i>1.6.4. Tasa de exhalación superficial de radón</i>	<i>15</i>
1.7. Productos estudiados	15
<i>1.7.1. Cebolla (<i>Allium cepa</i> L.)</i>	<i>15</i>
<i>1.7.2. Ajo (<i>Allium sativum</i>)</i>	<i>16</i>
<i>1.7.3. Zanahoria (<i>Daucus carota</i>)</i>	<i>18</i>
CAPÍTULO II	

2.	MARCO METODOLÓGICO	20
2.1.	Población de estudio	20
2.2.	Materiales y Métodos	20
2.2.1.	<i>Preparación de las muestras</i>	20
2.2.2.	<i>Técnica Electret Ion Chamber (EIC)</i>	23
CAPÍTULO III		
3.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	
3.1.	Método Short Term (MST)	29
3.1.1.	<i>Concentración de gas radón</i>	29
3.1.2.	<i>Tasas de exhalación superficial y másica de gas radón</i>	30
3.2.	Método Long Term (MLT)	31
3.2.1.	<i>Concentración de gas radón</i>	31
3.2.2.	<i>Tasas de exhalación superficial y másica de gas radón</i>	31
3.3.	Influencia de la granulometría de la muestra en la exhalación de radón con el Método Short Term.	32
3.4.	Comparación de los Métodos Short Term y Long Term	34
	CONCLUSIONES	37
	RECOMENDACIONES	38
	BIBLIOGRAFÍA	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Dosis media anual e intervalos de dosis individuales de radiación ionizante.....	4
Tabla 2-1:	Propiedades relevantes del radón-222, torón y actinon.....	8
Tabla 3-1:	Valor nutricional de la cebolla (<i>Allium cepa</i> L.)	16
Tabla 4-1:	Composición nutricional del ajo (<i>Allium sativum</i>)	18
Tabla 5-1:	Información nutricional de la zanahoria (<i>Daucus carota</i>)	19
Tabla 1-3:	Descripción de las muestras estudiadas con Método Short Term.....	29
Tabla 2-3:	Concentración de gas radón utilizado el Método Short Term.....	29
Tabla 3-3:	Tasa de exhalación másica y superficial utilizando el Método Short Term...	30
Tabla 4-3:	Descripción de las muestras estudiadas con Método Long Term.....	31
Tabla 5-3:	Concentración de gas radón utilizado el Método Long Term.....	31
Tabla 6-3:	Tasa de exhalación másica y superficial utilizando el Método Long Term...	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Posibles vías de exposición de miembros de la población como resultado de descargas de materiales radiactivos en el medio ambiente.....	6
Figura 2-1: Cadena de desintegración del ^{238}U	9
Figura 3-1: Emanación, transporte y exhalación del gas radón.....	13
Figura 1-2: Ajo y cebolla colorada en la primera etapa de preparación de las muestras (remoción de cascaras, raices, tallos y vástagos).....	20
Figura 2-2: Proceso de rebanado de las muestras (a) cebolla, (b) ajo y (c) zanahoria...	21
Figura 3-2: Ubicación de las muestras en mallas plasticas (a) cebolla, (b) ajo y (c) zanahoria.....	21
Figura 4-2: Ajos, cebollas y zanahorias deshidratadas.....	22
Figura 5-2: Muestras de cebolla, ajo y zanahoria deshidratadas y trituradas.....	22
Figura 6-2: Componentes del sistema de detección E-EPERM: (a) Cámara de ionización modelo S, (b) Lector de voltaje SPER-1E, (c) Electret Short Term (ST) y (d) Contenedor de vidrio.....	23
Figura 7-2: Funcionamiento básico de la Cámara de ionización-Electret para medir radón en aire.....	24
Figura 8-2: Cámara de ionización LUDLUM modelo DP1.....	28

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-1:	Dosis promedio anual que recibe una persona en España.....	5
Gráfico 1-3:	Tasa de exhalación superficial en función de la granulometría, 3mm (azul), 6mm (rojo) y <1mm (verde).....	33
Gráfico 2-3:	Tasa de exhalación másica según la granulometría, 3mm (azul), 6mm (rojo) y <1mm (verde).....	33
Gráfico 3-3:	Comparación de los métodos MST (azul) y MLT (rojo) usados para calcular la tasa de exhalación superficial.....	34
Gráfico 4-3:	Tasa de exhalación másica calculada usando el MTS (azul) y MLT (rojo)...	35
Gráfico 5-3:	Tasa media de exhalación superficial con granulometría de 3mm, 6mm y <1mm (solamente para la zanahoria) calculada con el MST.....	36
Gráfico 6-3:	Tasa media de exhalación másica de radón.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS

^{222}Rn:	Radón-222
^{226}Ra:	Radio-226
^{232}Th:	Torio-232
^{238}U:	Uranio-238
^{40}K:	Potasio-40
A:	Actividad
Am:	Actividad específica
BG:	Background-Fondo Gamma
Bq:	Becquerel
CF:	Factor de Calibración
CF(LT):	Calibration Factor (Long Term)-Factor de calibración para largo plazo
CF(ST):	Calibration Factor (Short Term)-Factor de calibración para corto plazo
Ci:	Curie
CR-39:	Detectores de trazas nucleares
CSN:	Consejo de seguridad nuclear
D:	Dosis absorbida
E:	Dosis efectiva
EICs:	Electret Ion Chambers-Cámara de Ionización Electret
Er:	Promedio de energía de retroceso
ESPOCH:	Escuela Superior Politécnica del Chimborazo
F:	Flujo
Gy:	Gray
H_T:	Dosis equivalente

ICRP:	Comisión Internacional de Protección Radiológica
Kg:	Kilogramo
LT:	Long term-Termino largo
mCi:	Milicurie
MeV:	Megaelectronvoltios
MLT:	Método Long Term
MST:	Método Short Term
mSv:	Milisievert
OIEA:	Organismo Internacional de Energía Atómica
OMS:	Organización Mundial de la Salud
pCi:	Picocurie
RnC:	Concentración de gas Radón
ST:	Short term-Termino Corto
Sv:	Sievert
V:	Volumen
W_R:	Factor de ponderación de la radiación

RESUMEN

En este estudio, se determinó las tasas de exhalación superficial y másica de radón de ajo, cebolla y zanahoria, muestreadas en el cantón Guaranda Provincia de Bolívar, mediante la técnica *Electret Ion Chamber*. Las muestras fueron deshidratadas a 56 grados centígrados durante 48 horas y trituradas a diferente granulometría (3mm, 6mm y menor que 1mm). Se usó el Método Short Term (MST) (periodo de exposición 7 días) y Método Long Term (MLT) (periodo de exposición 8 días). Con el MST se analizaron muestras con granulometría de 3mm, 6mm y menor que 1mm (únicamente para la zanahoria), los resultados de las tasas de exhalación superficial y másica de 3mm, para la mayoría de las muestras, fueron más altos que con granulometría de 6mm, deduciendo que la *granulometría de las muestras influye en la exhalación de gas radón*. Con el MLT se estudiaron muestras de 3mm y menor que 1mm (zanahoria), la *comparación de los métodos* muestra que el MST es *preferible* respecto al MLT, tanto en términos de tiempo necesario para realizar una medida como en precisión del resultado. La cebolla colorada y el ajo macho presentan *tasas medias de exhalación superficial* más altas (0.41 Bq por metro cuadrado por hora), que el ajo hembra, cebolla perla y zanahoria (0.28 Bq por metro cuadrado por hora). La cebolla colorada muestra la más alta *tasa media de exhalación másica* de radón (0.041 Bq por kilogramo por hora) seguido del ajo macho (0.027 Bq por kilogramo por hora). Las tasas más bajas corresponden el ajo hembra, cebolla perla y zanahoria (0.018 Bq por kilogramo por hora). La comparación entre variedades de ajo y cebolla revelaron que el *ajo macho* muestra una tasa media de exhalación superficial y másica mayor que el *ajo hembra* y la *cebolla colorada* más que la *cebolla perla*.

Palabras clave: <BIOFÍSICA>, <TASA DE EXHALACIÓN>, <RADÓN>, <ELECTRET ION CHAMBER>, <CÁMARA (S)>, <SHORT TERM>, <LONG TERM>.



Firmado electrónicamente por:
**ELIZABETH
FERNANDA AREVALO
MEDINA**



0770-DBRAI-UPT-2021

SUMMARY

In this study, the radon mass and superficial exhalation rates of garlic, onion and carrot, sampled in Guaranda province of Bolívar, were determined using the technique Electret Ion Chamber. The samples were dehydrated at 56 degrees centigrade for 48 hours and crushed to different granulometry (3mm, 6mm and less than 1mm). The Short-Term Method was used (MST) (exposure period 7 days) and Long-Term Method (MLT) (exposure period 8 days). With the MST samples with granulometry of 3mm, 6mm and less than 1mm were analysed (carrot only), the 3mm mass and surface exhalation rate results for most samples were higher than with 6mm grading, deducing that the granulometry of the samples influences the radon gas exhalation. With the MLT, samples of 3mm and less than 1mm (carrot) were studied, the comparison of the methods show that the MST is preferable over the MLT, both in terms of the time required to perform a measurement and in terms of the precision of the result. Red onion and male garlic have higher mean superficial exhalation rates (0.41 Bq per square meter per hour) than female garlic, pearl onion and carrot (0.28 Bq per square meter per hour). Red onion shows the highest mean radon mass exhalation rate (0.041 Bq per kilogram per hour) followed by male garlic (0.027 Bq per kilogram per hour). The lowest rates correspond to female garlic, pearl onion and carrot (0.018 Bq per kilogram per hour). The comparison between varieties of garlic and onion revealed that male garlic shows a mean rate of superficial and mass exhalation greater than female garlic and red onion more than pearl onion.

Keywords: <BIOPHYSICS>, <EXHALATION RATE>, <RADON>, <ELECTRET ION CHAMBER>, <CAMERA (S)>, <SHORT TERM>, <LONG TERM>.

INTRODUCCIÓN

Los radioisótopos están naturalmente distribuidos en la naturaleza. Uno de ellos es el uranio-238 (^{238}U) que se encuentra en el suelo desde los orígenes de la formación de la Tierra, es un elemento primario de una cadena de desintegración natural de elementos radiactivos dentro de la cual se haya el isótopo radón-222 (^{222}Rn) (Frumkin H and Samet J, 2001, págs. 337-348).

El radón-222 está presente en la naturaleza en estado gaseoso (Doyle et al, 2012, págs. 1-8), capaz de viajar entre los poros del suelo, llegando a ser absorbido por las raíces de las plantas y a su vez ingerido por el ser humano (Doyle et al, 2012, págs. 1-50).

En el cuerpo humano, el radón resulta altamente peligroso, ya que este isótopo presenta productos de desintegración alfa. Las partículas alfa al ser altamente ionizantes pueden causar efectos estocásticos como cáncer (Doyle et al, 2012, págs. 1-50).

Como el radón es inodoro, incoloro e insípido resulta difícil para el ser humano identificar un producto alimenticio que se encuentre contaminado con este isótopo (Frumkin H and Samet J, 2001, págs. 337-348).

Estudios muestran que la concentración y exhalación de radón en productos alimenticios depende del tipo de suelo en los que fueron cultivados. Investigaciones en papa (A.F. Maged and E.A. Saad, 1998 págs. 1-8), ajo, cebolla y zanahoria (C. P. Ononugboand and G. O. Avwiri, 2018, págs. 1-10) evidencian la presencia de este radioisótopo en estos alimentos.

En la zona centro del Ecuador se cultivan gran variedad de hortalizas de consumo masivo, destacando el ajo, cebolla y zanahoria por su alto valor nutricional. Se estima que la producción anual de ajo es 900 toneladas (Pallo, 2014, págs. 2-3), 41 184 toneladas de cebolla (Meca, 2013, pág. 9) y 28 130 toneladas de zanahoria (Cruz et al., 2018, págs. 26-35).

El propósito de este Trabajo de Titulación consistió en evaluar las tasas de exhalación superficial y másica de radón de muestras de cebolla perla "*Allium cepa*", cebolla colorada "*Allium cepa*", ajo hembra "*Allium sativum*", ajo macho "*Allium ampeloprasum*" y zanahoria "*Daucus carota*", compradas en el mercado 10 de Noviembre del cantón Guaranda, Provincia de Bolívar, usando la técnica Electret Ion Chamber, disponible en el laboratorio de Técnicas Nucleares de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En particular, fueron estudiados

dos métodos y se puso especial interés en la influencia de la granulometría de la muestra sobre las tasas de exhalación superficial y másica de radón.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Fuentes de radiación ionizante

La radiación ionizante es la energía producida a partir de fuentes naturales o artificiales, tiene más energía que la radiación no ionizante, suficiente para provocar cambios químicos al romper los enlaces químicos. Este efecto puede causar daño a los tejidos vivos.

Cada ionización libera energía que es absorbida por el material que rodea al átomo ionizado. La radiación ionizante deposita una gran cantidad de energía en un área pequeña. De hecho, la energía de una ionización es energía más que suficiente para romper el enlace químico entre dos átomos de carbono.

Hay tres tipos principales de radiación ionizante:

- **Partículas alfa**, que incluyen dos protones y dos neutrones
- **Partículas beta**, que son esencialmente electrones
- **Rayos gamma y rayos X**, que son energía pura (fotones)

Las partículas alfa y beta no forman parte del espectro electromagnético; son partículas energéticas en oposición a haces de energía pura (fotones).

Las fuentes de radiación ionizante se encuentran presente en todas partes ya sea de forma natural o artificial, es decir, que la exposición a la radiación ionizante es constante.

1.1.1. Fuentes naturales

Las radiaciones de fuentes naturales se encuentran en la naturaleza por la descomposición radioactiva de materiales que se encuentran presentes en la corteza terrestre, la cantidad de la misma depende del lugar en el cual se encuentre, siendo diferente su concentración en todo el planeta (CSN, Radiación natural y artificial, 2015), por ejemplo: ^{87}Rb , ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U o ^{222}Rn , algunas de estas fuentes se las puede encontrar más cerca de lo que se cree como en las viviendas, formando parte del material de construcción, en alimentos o agua que se consumen, incluso en el

propio organismo debido a que se encuentra constituido por ^{40}K . Por otro lado, la radiactividad natural, es decir, las emisiones espontáneas que parten de ciertos núcleos llamados por eso radiactivos, abren todo un campo de aplicaciones que llegan hasta el día de hoy. Los estudios del radio y otros núclidos radiactivos permitieron caracterizar las diferentes emisiones formadas durante la transmutación espontánea, las cuales consisten tanto en partículas materiales como en liberación de energía (Cortez GL et al, 2014, pág. 81).

Dentro de este marco podemos hallar el ^{238}U radiactivo que se desintegra a través de una serie de etapas. La primera de ellas conduce al ^{234}Th por emisión de una partícula alfa. La vida media de este proceso es de $4,51 \times 10^9$ años y es la etapa más lenta de las que finalmente conducen al isotopo estable del ^{206}Pb (Humphreys G and Baird R, 1990, pág. 1031).

Para tal efecto en la naturaleza existen cuatro isotopos importantes del radio: ^{223}Ra , ^{224}Ra , ^{226}Ra y ^{228}Ra . De ellos el ^{226}Ra es el más conocido y el que acapara el nombre genérico del radio. La actividad de 1g. de radio corresponde por definición a 1 Curio (Ci). (Suárez JA et al, 1987, págs. 3-5).

De lo anteriormente expuesto resaltamos la importancia del ^{226}Ra , el cual es un descendiente radiactivo del ^{238}U y ambos se encuentran en equilibrio secular. La abundancia del radio en la naturaleza está relacionada con la presencia del uranio y el torio, que varían en los distintos tipos de rocas, minerales y sedimentos. El ^{226}Ra es un isotopo radiactivo emisor alfa, de la cadena del uranio natural y su periodo de semidesintegración es de aproximadamente 1600 años.

En este contexto, el isotopo más abundante en nuestra tierra es el ^{222}Rn , este elemento radiactivo es un gas noble proveniente de ^{226}Ra , que a su vez es producto de la desintegración del ^{238}U . Estos dos últimos elementos están presentes de forma natural en la corteza terrestre.

Cada individuo recibe una cantidad de exposición de la radiactividad natural presente en el suelo, el agua, el aire y los alimentos (Heiyam Najy Hady et al, 2016).

Tabla 1-1: Dosis media anual e intervalos de dosis individuales de radiación ionizante.

Fuentes de exposiciones naturales	Dosis media (mSv)	Intervalo típico	Observaciones
<i>Inhalación de (gas Radón)</i>	1,26	0,2 - 10	La dosis es muy superior en algunas viviendas
<i>Radiación Externa</i>	0,48	0,3 - 1	La dosis es superior en algunos lugares
<i>Ingestión</i>	0,29	0,2 - 1	Alimentos

Radiación cósmica	0,34	0,3 - 1	La dosis aumenta con la altitud
Total	2,4	1 - 13	Grupos importantes de población reciben entre 10 y 20 mSv

Fuente: (Obando A, 2019, pág. 4) Dosis media anual e intervalos de dosis individuales de radiación ionizante (en mSv)

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2020.

1.1.2. Fuentes artificiales

La radiación ionizante también puede ser producida de manera artificial a manos del hombre con distintas aplicaciones tanto en el ámbito médico, industrial, petróleos, minerías, fabricación de armas o reactores nucleares, etc.

El Gráfico (1-1) dosis promedio anual que recibe una persona debido a fuentes naturales y artificiales en España.

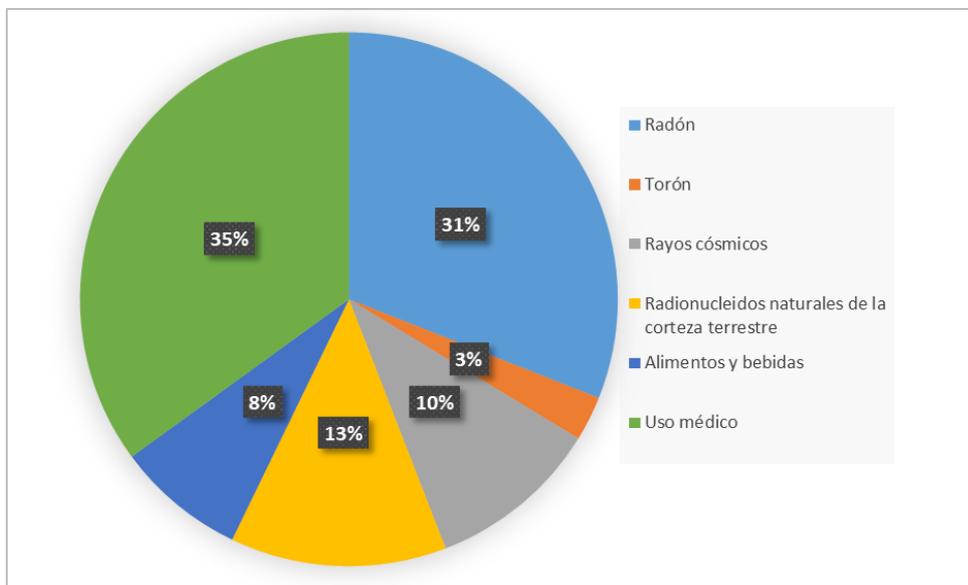


Gráfico 1-1: Dosis promedio anual que recibe una persona en España.

Fuente: (Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), 2010, pág. 4).

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) propone un esquema que permite tener una idea sobre las posibles vías de exposición de miembros de la población como resultado de descargas de materiales radiactivos en el medio ambiente. Ver Figura (1-1).

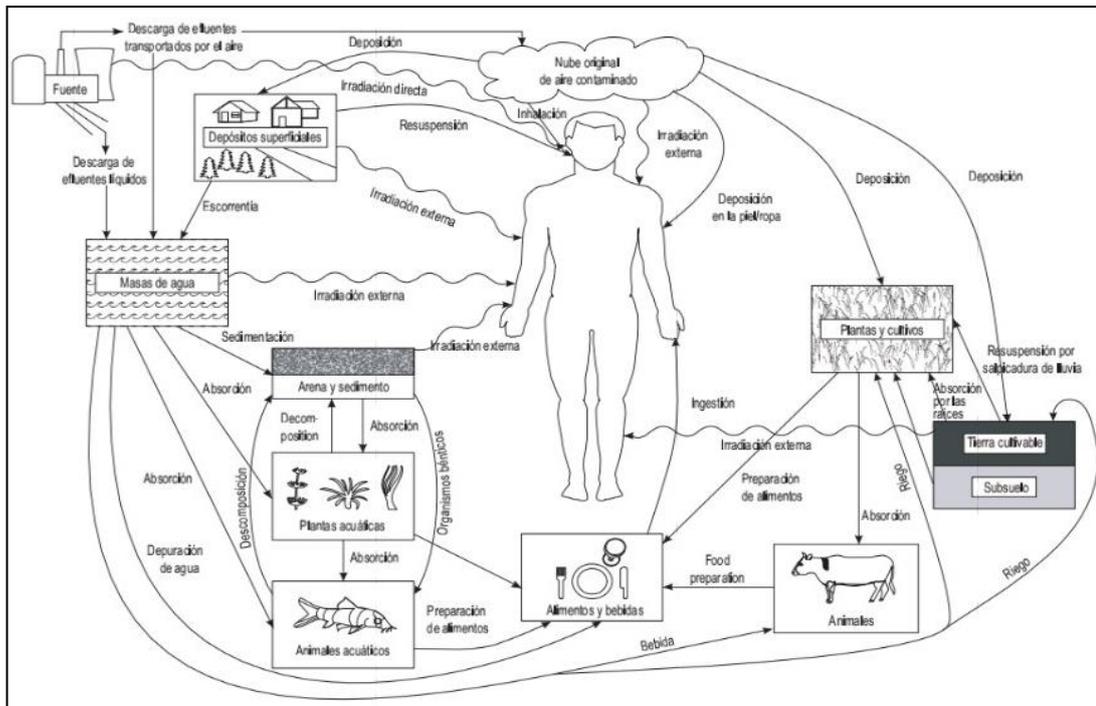


Figura 1-1. Posibles vías de exposición de miembros de la población como resultado de descargas de materiales radiactivos en el medio ambiente.

Fuente: (Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA), 2010, pág. 24)

1.2. Radón

El radón es un gas inodoro e incoloro que se origina por la desintegración del radio 238 y el uranio 238, compuestos radioactivos que se encuentran en la corteza terrestre. El radón emana del suelo, aunque también se puede encontrar en el agua (OMS, 2015). Cabe destacar que el radón se difunde a través del suelo y de las rocas y como consecuencia se acumula en lugares cerrados de muy poca ventilación.

El ^{222}Rn tiene un periodo de semidesintegración de 3,8 días y generalmente tiende a concentrarse en espacios cerrados como minas, estaciones de trenes subterráneas, viviendas entre otros; por lo que destaca la importancia de este elemento químico puesto que a diario está en contacto con el ser humano y lógicamente representa una dosis de radiación importante para el hombre (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2015, págs. 7-13). El gas radón tiende aparecer en cantidades considerable donde existe alto contenido de ^{226}Ra (CSN, El mapa predictivo de exposición al radón en España, 2013, pág. 10).

1.3. Propiedades físicas y químicas del radón

El uranio, torio y actinio están dispersos en el suelo de los cuales se derivan varios isótopos de radón que decaen en un isótopo estable ya sea plomo-206, 207 y 208 para la cadena de desintegración del uranio-238, 235 y thorio-232 respectivamente.

Para estos isótopos, en sus cadenas de desintegración se encuentran varios radionúclidos con un periodo de desintegración muy cortos (micro segundos) o muy largos (miles de años) (Bourdon B et al, 2003, pág. 1). Es así que de la cadena de desintegración del uranio-238 proviene el radón-222 con un periodo de desintegración de 3.82 días, del uranio-235 el radón-219 (actinon) con un periodo de desintegración de 55 segundos y del thorio-232 el radón-220 (torón) con un periodo de desintegración de 4 segundos; la Tabla (2-1) detalla las características de estos isótopos.

La Figura (2-1) muestra que la cadena de desintegración del uranio-238, vemos como este decae en diferentes isótopos, uno de ellos el radio-226 (emisor alfa) decae en radón-222 que también es un emisor alfa.

En radio protección resulta imprescindible el periodo de semidesintegración de los radioisótopos de radón porque isótopos como el torón y el actinon cuyo periodo de semidesintegración es relativamente pequeño para que sean considerados un factor de riesgo para la salud; no así en el caso del radón-222 que, al tener una vida media relativamente mayor, representa un nivel más alto de riesgo a la salud.

Por otra parte, el alcance en metros de los productos de desintegración de estos radioisótopos varía, en el caso del radón-222 puede alcanzar los 2.2 metros mientras que el torón solo puede alcanzar 29 milímetros (Tuccimei P, 2006, págs. 258-259). Esto sugiere que el radón 222 representa un peligro mayor y por ello gran cantidad de investigaciones tienen como objetivo su estudio y los posibles daños relacionados con este isótopo.

Tabla 2-1: Propiedades del radón-222, torón y actinon.

Parámetros		²²² Rn	²²⁰ Rn	²¹⁹ Rn
Nombre		Radón	Torón	Actinon
Periodo de semidesintegración	T1/2	3.8232 d	55.8 s	3.98 s
Constante de decaimiento	λ	$2.098 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$	$1.242 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$	$1.742 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$
Promedio de energía de retroceso	Er	86keV	103keV	104keV
Actividad específica	Am	$5.69 \times 10^{15} \text{ Bq/g}$	$34.00 \times 10^{18} \text{ Bq/g}$	$478.9 \times 10^{18} \text{ Bq/g}$
Coefficiente de difusión en aire	Da	$1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$		
Coefficiente de difusión en agua	Dw	$1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$		
Energía alfa	Q α	5590.3 keV	6404.7keV	6946.1keV

Fuente: (Caty Santillán, 2018)

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2020.

En cuanto a las propiedades químicas del radón podemos mencionar que es un elemento particular ya que está en estado gaseoso. Es muy conocido por ser un gas noble, lo que hace que no pueda reaccionar con otro elemento químico evitando que escape al aire en forma de compuesto sino como isótopo.

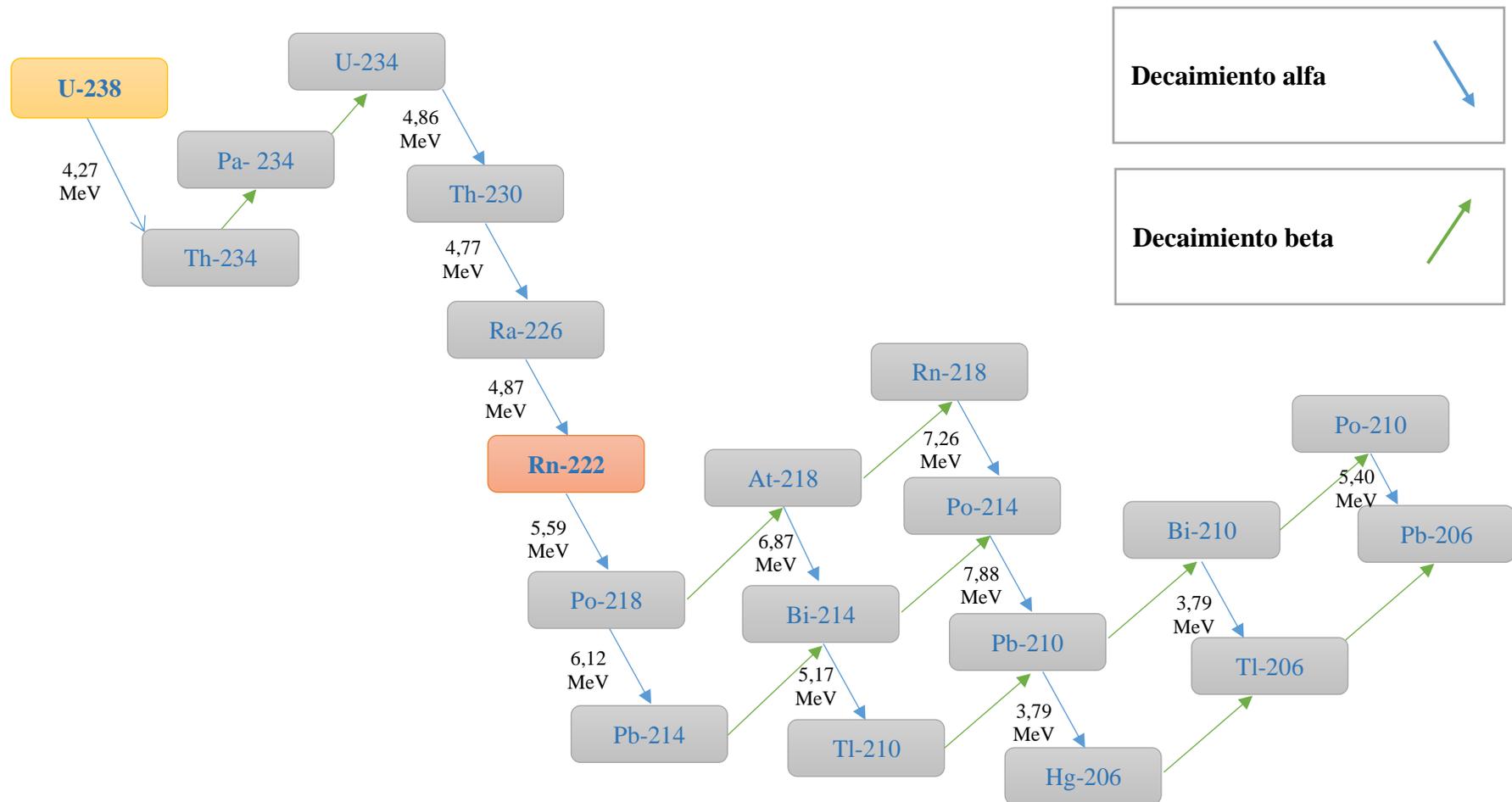


Figura 2-1. Cadena de desintegración del ^{238}U .

Fuente: (Garzón L, 1992, pág. 70).

1.4. Mecanismos de generación y transporte del radón

La emanación del radón se origina en el subsuelo hacia la superficie terrestre donde experimenta la desintegración radiactiva, emitiendo partículas alfa (OMS, Organización Mundial de la Salud, 2016).

En cuanto a la movilidad del radón, el mismo se transporta de forma difusiva entre los gránulos y rocas, Al tratarse de un gas radiactivo el radón puede viajar por el espacio intersticial del material donde se ha formado y puede introducirse en los alimentos como tuberculos que estan en contacto directo con la tierra (World Heath Organization, 2009, pág. x).

1.4.1. Difusión

Es el proceso de migrar partiendo de un soluto originario de un lugar con elevada concentración a una región de menor concentración. El movimiento de un soluto en una solución y la expansión espontánea de un gas son ejemplos de procesos que ocurren por difusión.

La difusión es descrita en general por la Ley de Fick. De acuerdo con ella, la velocidad de difusión, es decir el número de moléculas que atraviesan un área determinada por unidad de tiempo, depende del gradiente de concentración (dC/dx), de la magnitud del área (A), y de un coeficiente característico para cada sistema, conocido como coeficiente de difusión (D) (Olaya M. y Frutos B, 2010, pág. 12).

$$v = dS/dx = -DA dC/dx \quad (1)$$

El coeficiente de difusión caracteriza la facilidad con que cada soluto en particular se mueve en el solvente determinado. La difusión depende de los siguientes factores:

- ✓ Gradiente de concentraciones
- ✓ Tamaño y forma del soluto
- ✓ Viscosidad del solvente
- ✓ Temperatura
- ✓ Porosidad

El aumento del tamaño del soluto o de la viscosidad del solvente dificulta la difusión, mientras que el aumento de la temperatura la acelera.

Este proceso difusivo es poco relevante para el caso del radón, en cuanto a que el flujo que se produce por convección es el que aporta la mayor cantidad de radón al interior frente al flujo por difusión.

1.4.2. Convección

El proceso de convección estriba de la porosidad del suelo y también de la diferencia de presión entre dos ambientes. Por ello, rocas que presentan poca porosidad no se dará este proceso, por ello no se emanará radón en aire.

Además, podemos definir la permeabilidad Intrínseca como la propiedad física que poseen los terrenos y rocas de dejar pasar a su través, líquidos y gases. La permeabilidad está directamente asociada a la porosidad y la constante del gas que atraviesa el medio mediante la Ley de Darcy K igual a $C \cdot d^2$ donde C es la constante del gas y d^2 es el diámetro promedio de los poros del material). La dimensión de la permeabilidad intrínseca es m^2 (Frutos B, 2009, pág. 58).

El radón se puede liberarse en forma gaseosa y dispersarse de esta forma en el medio ambiente, esto se refiere principalmente a los átomos que están presente dentro de la porosidad, en particular debido al retroceso. Por tanto, las emisiones de radón a la atmósfera pueden tener lugar mediante la siguiente serie de procesos:

- ✓ **Emanación:** los átomos de radón formados por la desintegración del radio escapan de los granos (principalmente debido al retroceso) hacia el espacio intersticial entre los granos. Este se caracteriza por el coeficiente de emanación adimensional. Este coeficiente depende principalmente del tamaño del grano de los materiales, el contenido de humedad y la mineralogía (C. Poinssot and H. Geckeis, 2015).
- ✓ **Transporte:** la difusión y el flujo provocan el movimiento de los átomos de radón emanados a través del residuo o del perfil del suelo hasta la superficie del suelo. Los procesos de difusión pueden ser importantes y se caracterizan por un coeficiente de difusión específico de Rn (C. Poinssot and H. Geckeis, 2015).
- ✓ **Exhalación:** átomos de radón que han sido transportados a la superficie del suelo y luego exhalados a la atmósfera. Esta liberación se conoce como exhalación de radón y se caracteriza por la densidad de flujo de exhalación (C. Poinssot and H. Geckeis, 2015).

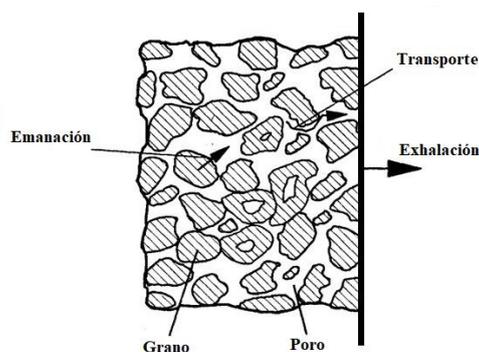


Figura: 3-1: Emanación, transporte y exhalación del gas radón.

Fuente: (Frutos B y Olaya M, 2011, pág. 11)

El gas radón puede ser transferido a las plantas junto con los nutrientes a través de la acumulación de minerales que se acumulan en varias partes y alcanzan porciones comestibles. además es la absorción directa del método a través de partes aéreas de las plantas. La mayor fuente natural de exposición a la radiación a los seres humanos es el gas radón, que existe en el aire, el agua y el suelo.

1.5. Riesgo de cáncer por radón

El daño causado por la radiación en los órganos y tejidos depende de la dosis recibida, o dosis absorbida, que se expresa en una unidad llamada gray (Gy). Según la OMS el radón representa un potente riesgo a la salud humana, sin importar si los niveles de concentración sean bajos o altos, puesto que de alguna manera si el individuo está expuesto a radiación por radón tiene una probabilidad de originar cáncer (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2015, págs. 7-13).

Las afirmaciones anteriores sugieren la importancia de destacar los riesgos que puede ocasionar el gas radón al ser ingerido a través de los alimentos y líquidos. Probabilísticamente este hecho puede ocasionar una lesión cancerígena en el estómago dependiendo de su nivel de concentración de gas radón, cantidad y frecuencia con se consumen los alimentos.

La contaminación por radiación que existe en el agua y el suelo puede ser transportada por la cadena alimentaria a animales y por ende a los humanos. Cuando el hombre come plantas, carne de animales o bebe líquidos, puede ser contaminado con radón. Las plantas contienen isótopos radiactivos que se inician desde el suelo y que lo absorben con otras sustancias naturales.

El radón es un carcinógeno de pulmón humano establecido basado en datos epidemiológicos humanos respaldados por evidencia experimental de estudios de mutagénesis en cultivos celulares y animales de laboratorio. La relación entre el radón y otros tipos de cáncer mostró una asociación

menor. Estudios demostraron que el riesgo de cáncer de estómago y otras neoplasias malignas gastrointestinales por radón son relativamente bajas.

Para que se origine cáncer es necesario al menos que una célula mute, lo que conllevaría a una interminable mitosis, así proliferándose hasta llegar en convertirse en la enfermedad conocida como cáncer (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2015, págs. 7-13).

1.6. Magnitudes físicas de interés

1.6.1. Actividad

La actividad (A) de un radionúclido designa el número de núcleos que se desintegran espontáneamente por unidad de tiempo, obsérvese la Ecuación (2) (Brosed A, 2004, pág. 134):

$$A = \frac{dN}{dT} \quad (2)$$

La unidad especial de la actividad es el Becquerel (Bq)

$$1Bq = 1 \text{ Desintegración por Segundo}$$

Anteriormente, la actividad se expresaba en Curios (Ci)

$$1Ci = 3,7 \times 10^{10} Bq$$

$$1mCi = 37MBq$$

1.6.2. Concentración de la actividad

Esta magnitud mide el número de desintegraciones por segundo en un metro cúbico. Nos dará una estimación de la concentración de radón en los espacios. Se usa para determinar los límites máximos aconsejables, que, según las comisiones de expertos, no se deben sobrepasar en los espacios cerrados, agua, aire y alimentos.

En el sistema internacional la unidad es, Bq m⁻³.

1.6.3. Tasa de exhalación másica de radón

Actividad de radón liberada por unidad de masa y por unidad de tiempo, expresada en Bq kg⁻¹ h⁻¹ (Abbas et al., 2020, pp.102-110).

1.6.4. Tasa de exhalación superficial de radón

Actividad de radón liberada por unidad de área y por unidad de tiempo (Horton, 1979, p.2), se expresa en Bq m⁻² h⁻¹.

1.7. Productos estudiados

1.7.1. Cebolla (*Allium cepa* L.)

La cebolla es originaria de las regiones secas de Asia y tanto la anatomía como la fisiología de la planta indican con claridad que este cultivo se desarrolla bien en condiciones de baja humedad relativa, alta insolación y bajo suministro de agua. Esta especie es bianual.

Su primera fase es la vegetativa, que inicia con la germinación de la semilla y finaliza con la formación del bulbo, que es el órgano de la planta conformado por túnicas, escamas, un tallo verdadero y yemas, las cuales pueden entrar en dormancia o receso. La segunda fase es la reproductiva donde la planta produce tallos florales y semillas (Araya G, 2012, pág. 7).

La temperatura óptima para el desarrollo del cultivo es alrededor de los 14 °C, con temperaturas máximas de 30 °C y mínimas de 7 °C. Se debe resaltar que las temperaturas altas aceleran la formación del bulbo y las temperaturas bajas lo retardan. Este cultivo se produce tanto en suelos arcillosos como en francos, preferiblemente con el pH entre 6,0 y 6,5 (Araya G, 2012, pág. 7).

La cebolla se cultiva en gran parte del país , sin embargo resalta mayormente el interes de este cultivo en la region Sierra Central específicamente en las provincia de Tungurahua y Chimborazo son las de mayor actividad productiva en el Ecuador (Mera A, 2012, págs. 8-22).

Pertenece a la familia de la Liliaceae, su nombre científico es *Allium Cepa*, esta planta posee un tallo pequeño, el bulbo que es la parte de interés, de esta parte se desprenden numerosas raicillas.

El bulbo consta de capas que poseen elementos nutritivos en la dieta humana. El corma se encuentra en el bulbo tiene forma de un cono. También, se presenta el sistema radicular el cual es

ligeramente ramificado con raíces blanquecinas.

Tallo: Mide de 0.8 a 1.50 metros de altura, recto, hueco.

Hojas: huecas, alargadas y puntiagudas.

Flores: Relativamente pequeñas, color verde, blanco o violeta, hermafrodita.

Los alimentos aportan al organismo cantidades específicas de nutrientes. El conjunto de todos ellos constituye el aporte energético, vitamínico, mineral y proteico total que determinará las características de nuestra dieta. La cebolla posee los valores nutricionales que se detallan en la Tabla (3-1).

Estos valores nutricionales hacen que esta hortaliza sea muy apetecida por los ecuatorianos para su uso diario y no solo para gastronomía, sino también como medicina natural y principalmente para problemas respiratorios.

Tabla 3-1: Valor nutricional de la cebolla (*Allium cepa* L.)

Nutriente	Contenido	Nutriente	Contenido
Agua	86g	Hierro	0.50 g
Prótidos	1.4 g	Manganeso	0.25 mg
Lípidos	0.2 g	Cobre	0.10 mg
Cobre	0.10 mg	Glúcidos	10 g
Zinc	0.08 mg	Celulosa	0.8 g
Yodo	0.02 mg	Potasio	180 mg
Ácido ascórbico	28 mg	Azufre	70 mg
Nicotinamida	0.50 mg	Fósforo	44 mg
Ácido pantoténico	0.20 mg	Calcio	32 mg
Riboflavina	0.07 mg	Cloro	25 mg
Tiamina	0.05 mg	Magnesio	16 mg
Carotenoides	0.03 mg	Sodio	7 mg
Calorías	20-35		

Fuente: (Agricultura ecológica online, s.f.)

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2020.

1.7.2. Ajo (*Allium sativum*)

El ajo común (*Allium sativum*), pertenece a la familia de las Alliáceas para la taxonomía moderna. Sería originario del antiguo Turkestan, límite con China, Afganistán e Irán, desde donde se distribuyó hacia el este de China e India y hacia el oeste al norte del continente europeo y a las costas de mar mediterráneo, dando lugar así a las numerosas cultivos que hoy se conocen (Burba J.L, 2003, págs. 5-14).

Es importante realizar los análisis de suelo antes de realizar la plantación por cuanto las características físico-químicas del mismo son determinantes del éxito ó el fracaso del cultivo. Los análisis mínimos son Ph en pasta, textura, nitrógeno, fósforo y potasio.

El contenido de materia orgánica es un factor importante para el manejo del agua del riego (infiltración y retención). Deberan emplearse terrenos que no reciban escurrimientos de otros lotes o propiedades que rieguen ajo fuera de estas directrices.

En terminos generales se recomienda incorporar al suelo, con mas de un mes de anticipación a la plantación, aproximadamente 10 toneladas de guano de gallina por hectárea, luego de esa incorporación, se debe efectuar al menos tres riegos para asegurar la adecuada descomposición del guano en el suelo antes de la implantación del cultivo (Burba J.L, 2003, págs. 5-14).

Las plantaciones de ajo requieren de un ambiente con temperaturas más elevadas (18-21°C), es bajo estas condiciones cuando se produce el verdadero crecimiento de los bulbos (cabezas) (Martinez J et al, 2017, pág. 1).

Los ajos (*Allium sativum*) son plantas herbáceas conformadas por un número variable de bulbos, los cuales son aprovechables para el consumo humano, tanto como condimento como para el uso medicinal. Entre los principales factores que pueden influir en el desarrollo de este cultivo se encuentran: las condiciones ambientales, las condiciones del suelo y el manejo de dicho cultivo como por ejemplo: elección del bulbo-semilla, desinfección de la semilla, plantación, fertilización, control de maleza, entre otros.

El ajo es una planta de clima templado, sin embargo requiere de una acumulación de horas de frío mínima para estimular a la planta en sus etapas de desarrollo (Martinez J et al, 2017, pág. 2). La Tabla (4-1) muestra el contenido nutricional de esta planta (Guapulema M, 2013, pág. 18).

Tabla 4-1: Composición nutricional del ajo (*Allium sativum*).

Ajo Crudo	
Composición alimentaria por cada 100gr	
Energía 150 kcal 620 KJ	
Carbohidratos	33.06 g
Grasa	0.5 g
Proteínas	6.36 g
Aguas	59.00 g
Fibra	2.1 g
Niacina (vit.B3)	0.7 mg
Ácido pantoténico (B5)	0.596 mg
Vitamina B6	1.235 mg
Vitamina C	31.2 mg
Potasio	401 mg
Azufre	70 mg
Calcio	181 mg
Hierro	1.7 mg
Magnesio	25 mg
Fosforo	153 mg
Sodio	17 mg
Zinc	1.16 mg
% CDR diaria para adultos	

Fuente: (Guapulema M, 2013, pág. 18). Composición nutricional del ajo (*Allium sativum*.)

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2020.

1.7.3. Zanahoria (*Daucus carota*)

Se deriva de las formas silvestres originarias del centro de Asia, África y el Mediterráneo. Algunos autores señalan a Afganistán como el origen exacto. Su uso como alimento surge a partir del siglo XVI. Antes de este momento se empleaba únicamente para tratar enfermedades.

Para el óptimo desarrollo del cultivo de zanahoria se requieren suelos profundos y sueltos; con una profundidad efectiva mayor a 80 cm. Debe presentar un contenido de materia orgánica superior al 3,5% y una pendiente inferior al 15% (Cámara de Comercio Bogotá, 2015, págs. 10-12).

Es un cultivo que prefiere los suelos francos y franco-arenosos, profundos, ricos en materia orgánica, bien drenados y aireados; el pH óptimo es entre los 5.5 y 7.0. Los suelos muy pesados dan un crecimiento desuniforme y con riesgos de podredumbre por acumulación excesiva de agua.

La zanahoria es una planta bastante rustica, aunque prefiere los climas templados y semi-templados; la temperatura mínima de crecimiento es alrededor de los 9°C y un óptimo es entre los 16°C y 18°C. Temperaturas elevadas por encima de los 30°C aceleran los procesos de envejecimiento, pérdida de color, etc (Programa de Diversificación, 2005, pág. 1).

La zanahoria es una herbácea que se puede desarrollar el mismo año que se plató (anual) o se puede desarrollar en dos fases: vegetativa y reproductiva, en el transcurso de dos años por ello lleva el nombre de bianual (Cámara de Comercio Bogotá, 2015, págs. 10-12).

El valor nutricional de este alimento se describe en la Tabla (5-1).

Tabla 5-1: Información nutricional de la zanahoria (*Daucus carota*).

Tamaño de la porción 100 g	
Por Porción	
Energía	172 kJ 41kcal.
Proteína	0,93g
Carbohidratos	9,58g
Fibra	2,8g
Azúcar	4,54g
Grasa	0,24g
Grasa saturada	0,037g
Grasa Transgénica	0g
Grasa Poliinsaturada	0,117g
Grasa Monoinsaturada	0,114g
Colesterol	0g
Sodio	69mg
Potasio	320 mg

Fuente: (Fatsecret Mexico, 2020). Información nutricional de la zanahoria (*Daucus carota*)

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2020.

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Población de estudio

La población de estudio de este trabajo de titulación es la cebolla perla, cebolla colorada, zanahoria, ajo hembra y ajo macho, alimentos de consumo masivo en la dieta ecuatoriana por su valor nutricional y asequibilidad. Las muestras fueron compradas en el mercado 10 de Noviembre del cantón Guaranda, Provincia de Bolívar.

2.2. Materiales y Métodos

2.2.1. Preparación de las muestras

El protocolo de preparación de las muestras consta de cinco etapas que se presentan a continuación:

a) Eliminación de la cascara, tallos, raíces y vástagos

Las muestras para analizar no deben contener la cascara, tallos, raíces y vástagos por lo que se removieron con un cuchillo de cocina. La Figura (1-2) ilustra las muestras de ajo y cebolla colorada sin cascara, tallos, raíces y vástagos.



(a) (b)
Figura 1-2. Ajo y cebolla colorada en la primera etapa de preparación de las muestras (remoción de cascara, raíces, tallos y vástagos).

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

b) Rebanado

Los ajos, cebollas y zanahorias se cortaron usando una máquina industrial que permite obtener rebanadas de 2,5 mm de grosor aproximadamente (Figura (2-2)).

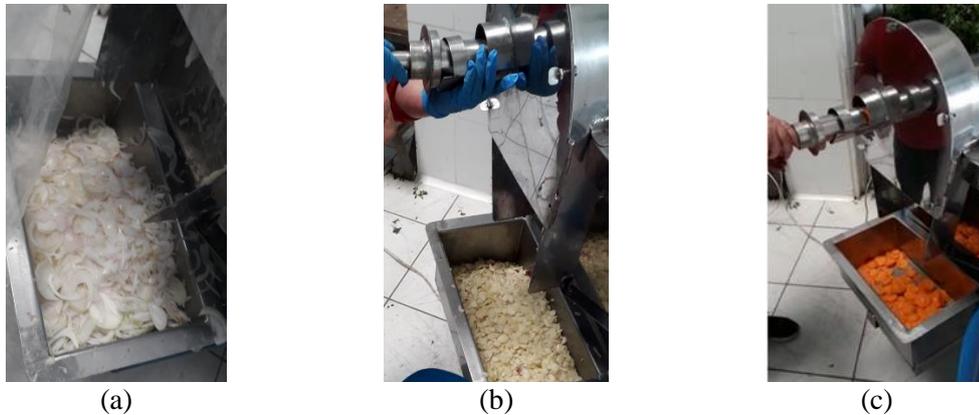


Figura 2-2. Proceso de rebanado de las muestras (a) cebolla, (b) ajo y (c) zanahoria.

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

Las muestras se colocaron en mallas plásticas evitando sobreponerlas, como se muestra en la Figura (3-2):



Figura 3-2. Ubicación de las muestras en mallas plasticas (a) cebolla, (b) ajo y (c) zanahoria.

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

c) Deshidratación

Las mallas plásticas con los ajos, cebollas y zanahorias se insertaron en un horno industrial con un rango de temperatura de 45 °C hasta 115 °C. Para una efectiva deshidratación y evitar contaminación de las muestras, las puertas del horno deben estar bien cerradas. La temperatura

que se utilizó para deshidratar los productos fue 56°C durante 48 horas.

La Figura (4-2) presenta muestras de ajo, cebolla y zanahorias deshidratadas con el procedimiento antes indicado.



Figura 4-2. Ajos, cebollas y zanahorias deshidratadas.

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

d) Triturado-Pulverizado

Después de deshidratar todas las muestras, se trituraron a diferentes granulometrías (3 mm y 6 mm). En el caso de la zanahoria se pulverizó una parte de la muestra.

La Figura (5-2) presenta las muestras trituradas con granulometría de 3mm y 6mm (empaques grandes) y muestras solamente deshidratadas (empaques pequeños).



Figura 5-2. Muestras de cebolla, ajo y zanahoria deshidratadas y trituradas.

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

2.2.2. Técnica Electret Ion Chamber (EIC)

Las tasas de exhalación superficial y másica de radón de las muestras de ajo, cebolla y zanahoria con granulometría de 3mm y 6 mm, se evaluaron con la técnica Electret Ion Chamber. Dos métodos usados por primera vez en el laboratorio de Técnica Nucleares de la ESPOCH fueron estudiados a fin de comprar las bondades de la técnica.

El **primer método** denominado Short Term (MST), emplea un sistema de detección compuesto por un detector (Electret Short Term) que se muestra en la Figura (6-2 c), una cámara de ionización plástica (210 ml) modelo S (Figura (6-2 a)) que cuenta con un sistema para abrir y cerrar la cámara y un contenedor de vidrio (acumulador de radón) de 4 litros (Figura (6-2 d)).

El **segundo método** denominado Long Term (MLT), emplea un sistema de detección compuesto por un detector (Electret Long Term), una cámara de ionización plástica (210 ml) modelo L y un contenedor de vidrio (acumulador de radón) de 4 litros.

Los sistemas Cámara de ionización-Electret para medición de radón son desarrollados, fabricados y comercializados bajo la marca E-PERM®, por la empresa Rad Elec de Estados Unidos.

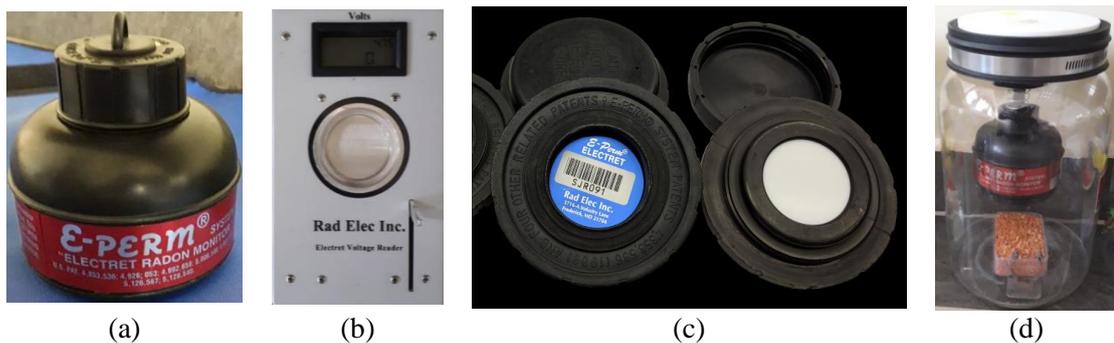


Figura 6-2: Componentes del sistema de detección E-EPERM: (a) Cámara de ionización modelo S, (b) Lector de voltaje SPER-1E, (c) Electret Short Term (ST) y (d) Contenedor de vidrio.

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2020.

Los Electrets Short Term (mediciones de 2 a 7 días) son discos de politetrafluoroetileno (PTFE) Teflón™, de 0,152 cm de grosor, los Electrets Long Term (mediciones de 1 a 12 meses) son discos de tetrafluoretileno (FEP) Teflón™ de 0,0127 cm de grosor. La sensibilidad de los E-PERMS es *inversamente proporcional* al espesor del Electret.

En la Figura (7-2) se presenta el funcionamiento de la Cámara de ionización - Electret. El gas radón ingresa a la cámara a través de los orificios de entrada con filtros ubicados en la parte superior, las partículas alfa emitidas por el proceso de decaimiento ionizan las moléculas de aire dentro de la cámara. Los iones negativos producidos dentro de la cámara son recogidos por el Electret cargado positivamente, lo que provoca una reducción de su carga superficial. La reducción en la carga (carga inicial menos la carga final del Electret) es una función de la concentración de radón que depende de la duración de la prueba y el volumen de la cámara.

El voltaje en la superficie del Electret se mide utilizando un lector de voltaje portátil SPER-1E (Figura (6-2 b)). El Kit Rad Elec, viene con un estuche de transporte seguro y trae un juego de dos Electrets de referencia y un Electret de puesta a cero.

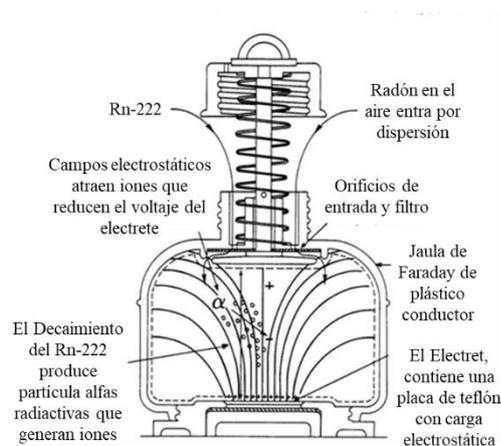


Figura 7-2: Funcionamiento básico de la Cámara de ionización-Electret para medir radón en aire.

Fuente: (Kotrappa P, 2015, pág. 4)

El contenedor de vidrio de 4 litros es hermético, lo que garantiza una mínima pérdida del gas radón. Este ha sido utilizado con éxito para medir el radón en agua y la tasa de exhalación de radón de los materiales de construcción. En este trabajo de titulación fue usado como acumulador de gas radón proveniente de las muestras de ajo, cebolla y zanahoria.

Medición de la concentración de radón en aire usando el sistema E-PERM

El cálculo de la concentración de radón en el aire dentro del acumulador de vidrio se realiza mediante la Ecuación (4) (Kotrappa P et al, 1990).

$$CRn = \frac{(Vi - Vf)}{(T) \times (FC)} - BG \quad (4)$$

Dónde:

CRn: Concentración de radón en el acumulador (Bq m⁻³).

T: Período de exposición en horas.

V_i y V_f: Voltajes inicial y final respectivamente.

BG: Fondo gamma del lugar donde se realiza la medida en Bq m⁻³

FC: Factor de calibración en voltios por (Bq m⁻³ horas).

Los factores de calibración del sistema Cámara de ionización-Electret se ajustan a una ecuación que relaciona los voltajes inicial y final y restringen el uso de los Electrets a lecturas iniciales de 250 V. Las Ecuaciones (5) y (6) permiten calcular el factor de calibración para sistemas E-PERM de corto (ST) y largo plazo (LT) respectivamente (Kotrappa P et al, 1990).

$$CF(ST) = 0.04241 + 0.0000338 \frac{Vi + Vf}{2} \quad (5)$$

$$CF(LT) = 0.00481 + 0.0000168 \frac{Vi + Vf}{2} \quad (6)$$

Evaluación de las tasas de exhalación superficial y másica usando el sistema E-PERM

El cálculo de las tasas de exhalación superficial y másica se puede obtener a partir de la Ecuación (7) (Kotrappa P et al, 1990). Esta fórmula fue usada por Kotrappa (inventor del sistema E-PERM) para evaluar la tasa de exhalación de materiales de construcción, en esta ocasión fue usada para determinar las tasas de exhalación del ajo, cebolla y zanahoria.

$$C(Rn) = \frac{Exh_s \times A}{V \times \lambda Rn} \left[1 - \left(\frac{1 - e^{-\lambda RnT}}{\lambda RnT} \right) \right] \quad (7)$$

Dónde:

$C(\text{Rn})$, concentración de radón en el aire dentro del acumulador en Bq m^{-3}

Exh_s , tasa de exhalación superficial de radón en $\text{Bq m}^{-2}\text{h}^{-1}$.

A , área de exhalación de la muestra en m^2

λRn , constante de decaimiento de radón en h^{-1}

T , tiempo de exposición en horas

V , es el volumen neto de aire en el contenedor de vidrio en m^3 . Se obtiene restando del volumen del contenedor el volumen del sistema Cámara-Electret y el volumen de la muestra.

Si llamamos a la constante K a la cantidad dentro del corchete; podemos reescribir la Ecuación (8) de la siguiente manera:

$$C(\text{Rn})Av = \frac{\text{Exh}_s \times A}{V \times \lambda\text{Rn}} \times K \quad (8)$$

Finalmente, la tasa de exhalación superficial está dada por la Ecuación (9)

$$\text{Exh}_s = \frac{C(\text{Rn}) \times V \times \lambda\text{Rn}}{K \times A} \quad (9)$$

La tasa de exhalación másica se obtiene de la Ecuación (9), reemplazando el valor del área de exhalación (A) por la masa de la muestra (M) :

$$\text{Exh}_m = \frac{C(\text{Rn}) \times V \times \lambda\text{Rn}}{K \times m} \quad (10)$$

Donde Exh_m es la tasa de exhalación másica en $\text{Bq kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ y m la masa de la muestra en kg .

Procedimiento experimental

El procedimiento para evaluar las tasas de exhalación superficial y másica del ajo, cebolla y zanahoria es el mismo para los dos métodos, excepto en el tiempo de exposición y la fórmula para calcular la concentración de radón (FC diferente). A continuación, se detalla las fases del experimento:

- a)** Pesar cada muestra usando una balanza de precisión de 1 gramo y colocar en un recipiente plástico. En este estudio se utilizó dos recipientes, uno de dimensiones 7.8 cm de largo, 5.3 cm de ancho y 2.3 cm de alto y un segundo de 8.9 cm de largo, 7.9 cm de ancho y 2.8 cm de alto. La masa de las muestras varió entre 50 y 111 gramos respectivamente.
- b)** Medir el voltaje inicial del Electret usando lector de voltaje SPER-1E y enroscar el Electret en la base de la cámara cerrada.
- c)** Colocar el recipiente plástico que contiene la muestra en el fondo del contenedor de vidrio de 4 litros, colgar el sistema de detección (cámara abierta) en la tapa del contenedor e introducirlo en el contenedor y cerrar herméticamente, quedando suspendido en el aire (Ver Figura (6-2 d)). Para el MST el sistema de detección es el SST (cámara S y Electret ST) y para el MLT el sistema SLT (cámara S y Electret LT).
- d)** Anotar la fecha y hora de inicio de la medida.
- e)** Esperar un tiempo de exposición de 7 días para el MST y 35 días para el MLT y medir el voltaje final del Electret.
- f)** Anotar la fecha y hora de la finalización de la medida.
- g)** Medir el fondo gamma en el laboratorio, usando una cámara de ionización gaseosa LUDLUM modelo DP1 (ver Figura (8-2)). En el caso del laboratorio de Técnicas Nucleares se midió por 4 horas con intervalos de tiempo de 5 minutos. Se utilizó el siguiente factor de conversión: $0.1\mu\text{Gy/h}$ es igual a 32 Bq m^{-3} (Kotrappa P et al, 1990).



Figura 8-2: Cámara de ionización
LUDLUM 9DP1

Fuente: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2020.

- h)** Calcular la concentración de radón con la Ecuación (4) y usar el factor de calibración dependiendo del método. Ecuaciones (5) y (6) para el MST y MLT respectivamente.
- i)** Calcular las tasas de exhalación superficial y másica de radón mediante las Ecuación (10) y (11) respectivamente.

CAPÍTULO III

3. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Método Short Term (MST)

3.1.1. Concentración de gas radón

La Tabla (1-3) presenta las características (masa y granulometría) de las 11 muestras analizadas con el MST, 4 de ajo, 4 de cebolla y 3 de zanahoria analizadas. Cabe señalar que se estudió dos variedades de ajo (macho y hembra) y dos variedades de cebolla (colorada y perla).

Tabla 1-3: Descripción de las muestras estudiadas con el Método Short Term.

Muestra	Granulometría (mm)	Masa (g)
Ajo hembra	3	61.00
Ajo hembra	6	69.00
Ajo macho	3	65.00
Ajo macho	6	54.90
Cebolla colorada	3	50.00
Cebolla colorada	6	42.00
Cebolla perla	3	49.65
Cebolla perla	6	35.67
Zanahoria	<1	61.00
Zanahoria	6	46.00
Zanahoria	3	49.65

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

La concentración de radón en el aire dentro del contenedor de vidrio se muestra en la Tabla (2-3) columna 5, en la columna 3 está el tiempo de exposición de las muestras y en la columna 4 la caída de voltaje de los Electrets.

Tabla 2-3: Concentración de gas radón utilizado el Método Short Term.

Muestra	Granulometría (mm)	Tiempo de exposición (días)	Caída de voltaje (V)	C(Rn) (Bq m ⁻³)	Incertidumbre absoluta (Bq m ⁻³)
Ajo hembra	3	6.96	19	14.80	2.61
Ajo hembra	6	6.96	18	12.27	2.49
Ajo macho	3	6.96	25	30.11	3.35
Ajo macho	6	6.96	29	40.46	3.86
Cebolla colorada	3	7.00	29	39.80	3.82
Cebolla colorada	6	6.96	21	18.28	2.78
Cebolla perla	3	6.98	21	18.84	2.80

Cebolla perla	6	6.96	18	12.36	2.49
Zanahoria	«1	6.99	21	18.11	2.77
Zanahoria	3	6.96	19	18.79	2.80
Zanahoria	6	6.96	20	16.50	2.69

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

Los rangos de concentración de radón se evidencian en la Tabla (2-3) los cuales varían desde $12.27 \pm 2.49 \text{ Bq m}^{-3}$ hasta $40.46 \pm 3.86 \text{ Bq m}^{-3}$. El valor más bajo reportado corresponde al ajo hembra con granulaciones de 6 mm y el producto en el que se encontró mayor concentración de radón fue en ajo macho con granulaciones de 6mm, que dentro del error experimental es igual a la concentración correspondiente a la cebolla colorada de 3mm.

En cuanto a la cebolla colorada con granulometría de 3 mm encontramos valores de $39.80 \pm 3.82 \text{ Bq m}^{-3}$, compatibles con una investigación hecha por la University of Port Harcourt, en Nigeria la cual reporta un valor de 37.46 Bq m^{-3} (C. P. Ononugbo1 and G. O. Avwiri1, 2018, pág. 4) .

3.1.2. Tasas de exhalación superficial y másica de gas radón

Los resultados de las tasas de exhalación superficial y másica utilizando el Método Short Term se reportan en la Tabla (3-3) junto al error absoluto, dichos resultados fluctúan en un rango de $0.19 \pm 0.03 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (zanahoria 6mm) y $0.71 \pm 0.07 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (cebolla colorada 3mm). Los valores obtenidos en cuanto a la tasa de exhalación másica están comprendidos entre $0.011 \pm 0.002 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (zanahoria 6mm) y $0.059 \pm 0.006 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (cebolla colorada 3mm).

Tabla 3-3: Tasa de exhalación másica y superficial utilizando el Método Short Term.

Muestras	Granulometría (mm)	Tasa de Exhalación Superficial	Tasa de Exhalación Másica
		($\text{Bq m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	($\text{Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$)
Ajo hembra	3	0.33 ± 0.05	0.022 ± 0.003
Ajo hembra	6	0.26 ± 0.05	0.017 ± 0.003
Ajo macho	3	0.54 ± 0.06	0.034 ± 0.004
Ajo macho	6	0.31 ± 0.04	0.021 ± 0.003
Cebolla colorada	3	0.71 ± 0.07	0.059 ± 0.006
Cebolla colorada	6	0.30 ± 0.05	0.030 ± 0.004
Cebolla perla	3	0.37 ± 0.04	0.024 ± 0.002
Cebolla perla	6	0.20 ± 0.04	0.012 ± 0.003
Zanahoria	<1	0.33 ± 0.05	0.022 ± 0.003
Zanahoria	3	0.39 ± 0.05	0.028 ± 0.004
Zanahoria	6	0.19 ± 0.03	0.011 ± 0.002

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

3.2. Método Long Term (MLT)

3.2.1. Concentración de gas radón

La Tabla (4-3) presenta la masa y granulometría de 6 muestras de ajo, cebolla y zanahoria estudiadas con el MLT.

Tabla 4-3: Descripción de las muestras estudiadas con Método Long Term.

Muestra	Granulometría (mm)	Masa (g)
Ajo macho	3	65.00
Ajo hembra	3	61.00
Cebolla colorada	3	50.00
Cebolla perla	3	110.67
Zanahoria	<1	60.00
Zanahoria	3	57.00

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

La concentración de radón utilizando el Método Long Term se muestra en la Tabla (5-3) con un tiempo de exposición de 35 días, en la cual se reflejan fluctuaciones desde $12.96 \pm 2.52 \text{ Bq m}^{-3}$ (zanahoria 3mm) hasta $36.57 \pm 3.66 \text{ Bq m}^{-3}$ (ajo hembra 3mm). También se observa, en la columna 4, la caída de tensión de los detectores para cada una de las muestras.

Tabla 5-3: Concentración de gas radón utilizando el Método Long Term.

Muestra	Granulometría	Tiempo de exposición de las muestras (días)	Caída de voltaje (V)	C(Rn) (Bq m^{-3})
Ajo hembra	3	34.96	15	36.57 ± 3.66
Ajo macho	3		13	27.28 ± 3.21
Cebolla colorada	3		11	19.91 ± 2.86
Cebolla perla	3		12	26.03 ± 3.15
Zanahoria	<1		14	35.40 ± 3.61
Zanahoria	3		9	12.96 ± 2.52

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

3.2.2. Tasas de exhalación superficial y másica de gas radón

En la Tabla (6-3) se representan los resultados encontrados para las seis muestras que fueron estudiadas utilizando el Método Long Term. El valor más bajo encontrado de la tasa de exhalación superficial y másica corresponde a la zanahoria de granulometría 3 mm, cuyos valores fueron de

$0.10 \pm 0.02 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ y $0.006 \pm 0.001 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ respectivamente. El valor más alto reportado de tasa de exhalación superficial corresponde al ajo hembra de granulometría 3mm cuyo valor es $0.29 \pm 0.02 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$; mientras la tasa de exhalación másica más alta corresponde de nuevo al ajo hembra de 3 mm y zanahoria < 1mm cuyo valor $0.017 \pm 0.001 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

Tabla 6-3: Tasa de exhalación másica y superficial utilizando el Método Long Term.

Número de la muestra	Muestras	Granulometría	Tasa de Exhalación Superficial	Tasa de Exhalación Másica
			($\text{Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)	($\text{Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$)
3	Ajo hembra	3	0.29 ± 0.02	0.017 ± 0.001
6	Ajo macho	3	0.22 ± 0.02	0.012 ± 0.001
9	Cebolla colorada	3	0.16 ± 0.02	0.011 ± 0.001
12	Cebolla perla	3	0.20 ± 0.02	0.007 ± 0.001
16	Zanahoria	<1	0.28 ± 0.02	0.017 ± 0.001
17	Zanahoria	3	0.10 ± 0.02	0.006 ± 0.001

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

3.3. Influencia de la granulometría de la muestra en la exhalación de radón con el Método Short Term.

El Gráfico (1-3) muestra la tasa de exhalación superficial según el producto y granulometría. En la mayoría de los casos se observa que las muestras de granulometría 3mm (color azul) exhalan más que las muestras de granulometría 6mm (color rojo). La variación entre estos valores es del 20 al 58% dependiendo de cada caso.

Un caso particular es el ajo hembra, la tasa de exhalación superficial con granulometría 6mm está en el rango de la exhalación con granulometría 3mm. Este mismo caso sucede con la zanahoria con granulometría <1mm (color verde) y 3mm.

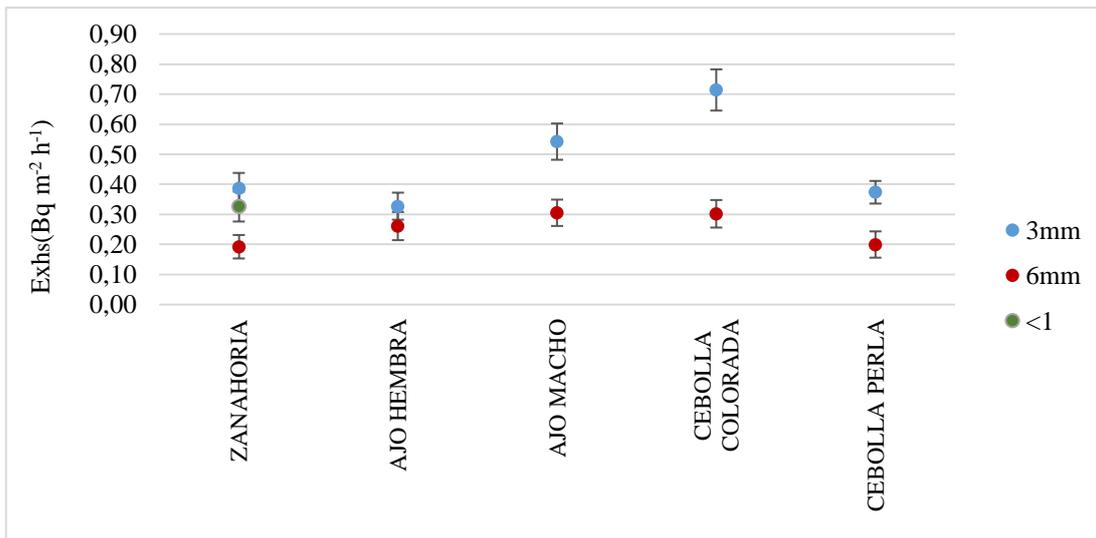


Gráfico 1-3. Tasa de exhalación superficial en función de la granulometría, 3mm (azul), 6mm (rojo) y <1mm (verde).

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

El siguiente Gráfico (2-3) muestra la comparación entre tasas de exhalación másica a diferentes granulometrías de la muestra. Al igual que en lo visto anteriormente, en la mayoría de los casos, la tasa de exhalación másica de las muestras con granulometría 3mm son mayores que las de 6mm. La variación entre estos valores es del 24 al 61% dependiendo del caso.

Casos particulares son el ajo hembra de 6mm y zanahoria de <1mm que muestran igual exhalación que las muestras de 3mm.

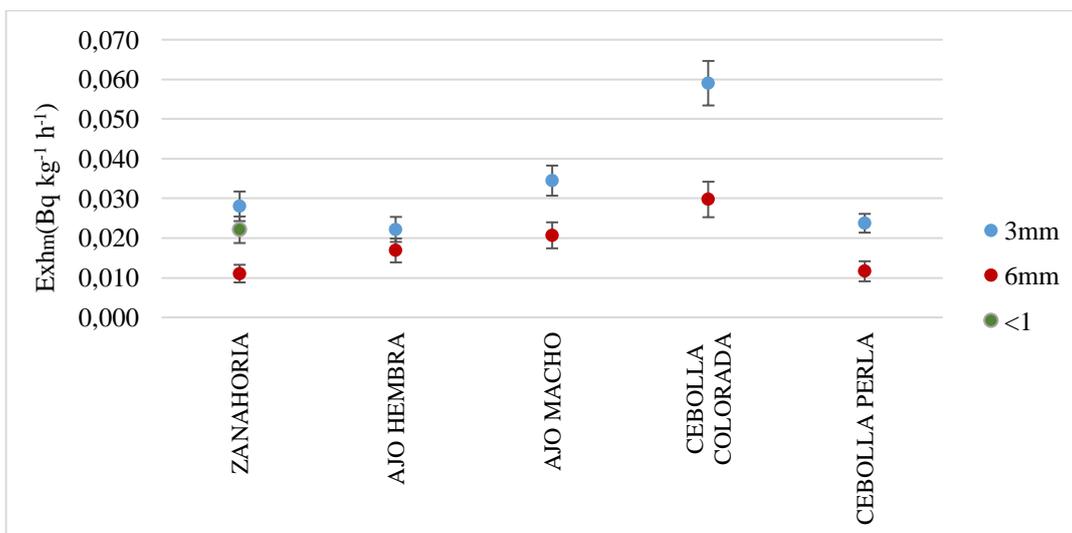


Gráfico 2-3. Tasa de exhalación másica según la granulometría, 3mm (azul), 6mm (rojo) y <1mm (verde).

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

3.4. Comparación de los Métodos Short Term y Long Term

En lo concerniente a tasa de exhalación superficial utilizando los Métodos Short Term y Long Term, con muestras de granulometría de 3mm para el ajo y la cebolla y con granulometría de 3mm y < 1mm para la zanahoria, el Gráfico (3-3) muestra que el MST (color azul), el 60% de los casos, reporta valores mayores que el método MLT. La mayor discrepancia entre los métodos se observa con la muestra de la cebolla colorada.

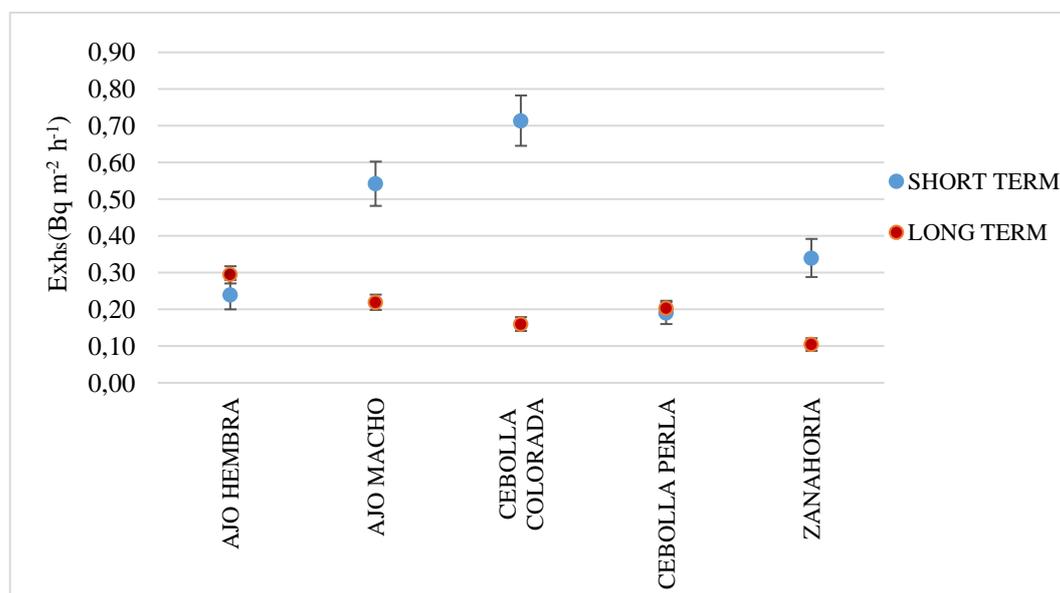


Gráfico 3-3. Comparación de los métodos MST (azul) y MLT (rojo) usados para calcular la tasa de exhalación superficial.

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

La Gráfica (4-3) ilustra los resultados de la tasa de exhalación másica obtenidos con los métodos Short Term y Long Term, al igual que con la tasa de exhalación superficial, es evidente que el MST reporta mayores valores en el MLT, excepto para el ajo hembra (igual exhalación).

La posible causa de la discrepancia entre métodos es que la fuga de radón desde el contenedor en un periodo largo de exposición (35 días) sea significativa, esto conlleva a una concentración menor y por lo tanto tasas de exhalación menores. El Método Short Term es preferible tanto en términos de tiempo necesario para realizar una medida como en términos de precisión de la medida.

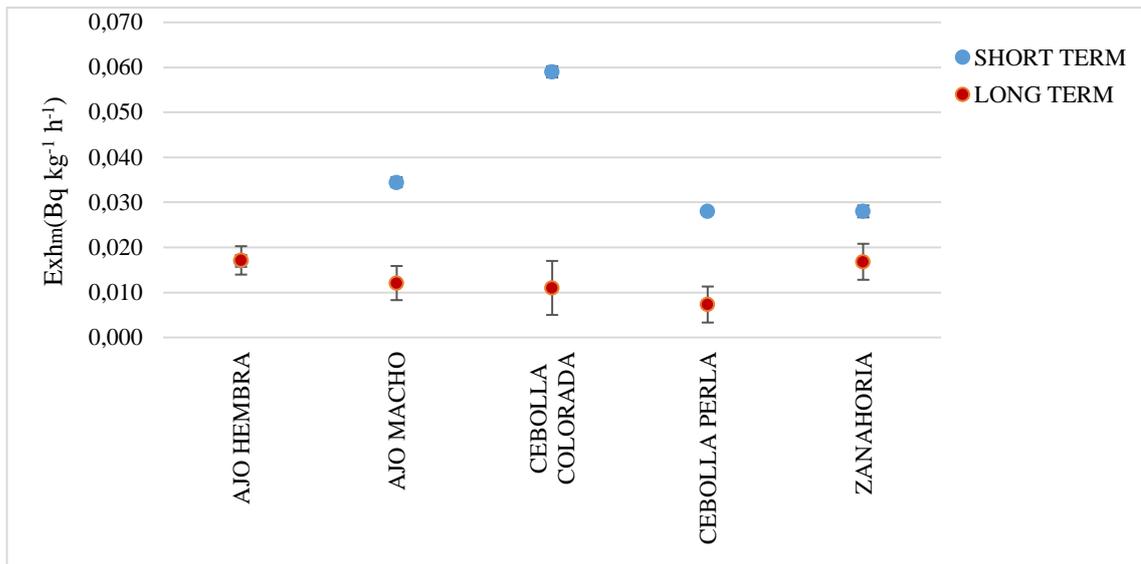


Gráfico 4-3. Tasa de exhalación másica calculada usando el MTS (azul) y MLT (rojo).

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

Tasa media de exhalación superficial y másica de radón

El Gráfico (5-3) muestra la **tasa media de exhalación superficial** de las muestras de ajo y cebolla con granulometría 3mm y 6mm, en el caso de la zanahoria con granulometría 3mm, 6mm y < 1mm, calculadas con el MST. La cebolla colorada es el producto que más exhala (0.43 ± 0.04 Bq m⁻² h⁻¹) mientras que el ajo hembra es la que menos exhala (0.26 ± 0.05 Bq m⁻² h⁻¹).

Dentro de los errores experimentales, la cebolla colorada y el ajo macho presentan los mismos resultados (0.41 Bq m⁻² h⁻¹), y claramente mayores respecto al ajo hembra, cebolla perla y zanahoria, y a su vez los tres últimos productos reportan las mismas tasas de exhalación superficial (0.28 Bq m⁻² h⁻¹).

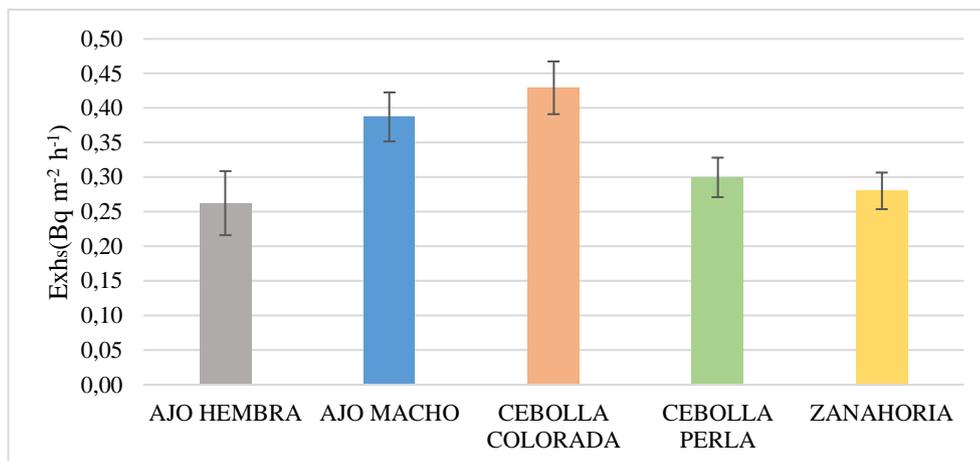


Gráfico 5-3. Tasa media de exhalación superficial con granulometría de 3mm, 6mm y <1mm (solamente para la zanahoria) calculada con el MST

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

La **tasa media de exhalación másica** de radón se muestra en el Gráfico (6-3), es evidente que la cebolla colorada presenta la mayor tasa de exhalación másica respecto a los otros productos y variedades.

Un aspecto interesante es la comparación entre variedades de ajo y cebolla. Las Figuras (5-3) y (5-4) revelan que el *ajo macho* exhala más que el *ajo hembra* y la *cebolla colorada* más que la *cebolla perla*.

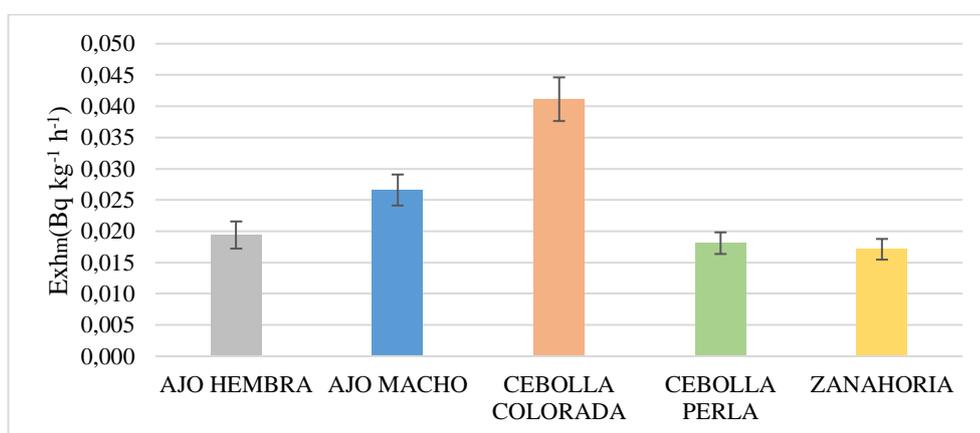


Gráfico 6-3. Tasa media de exhalación másica de radón.

Realizado por: Chimbo, Juan y Buñay, Alex 2021.

CONCLUSIONES

- Los resultados de las tasas de exhalación superficial y másica de dos variedades de ajo (hembra y macho) dos variedades de cebolla (colorada y perla) y zanahoria con granulometría de 3mm, usando la técnica Electret Ion Chamber (Método Short Term), para la mayoría de las muestras son más altos que con granulometría de 6mm, por lo que se puede inferir que *la granulometría de las muestras influye en la exhalación de gas radón.*
- El Método Short Term, para evaluar las tasas de exhalación superficial y másica, *es preferible* respecto al Método Long Term, tanto en términos de tiempo necesario para realizar una medición (7 días) como en precisión del resultado. La fuga de radón del contenedor en un periodo largo de exposición (35 días) puede llegar a ser significativa, lo que implica resultados de tasas de exhalación menores.
- La cebolla colorada y el ajo macho presentan *tasas medias de exhalación superficial* más altas (compatibles dentro de los errores experimentales) ($0.41 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), que el ajo hembra, cebolla perla y zanahoria (equivalentes dentro de los errores experimentales) ($0.28 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).
- La cebolla colorada muestra la más alta *tasa media de exhalación másica* de radón ($0.041 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$) seguido del ajo macho ($0.027 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Las tasas más bajas corresponden el ajo hembra, cebolla perla y zanahoria (compatibles dentro de los errores experimentales) ($0.018 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$).
- La comparación entre variedades de ajo y cebolla revela que el *ajo macho* muestra una tasa media de exhalación superficial y másica de radón mayor que el *ajo hembra* y la *cebolla colorada* más que la *cebolla perla.*

RECOMENDACIONES

- A los interesados en desarrollar este tipo de trabajos, sugerimos enfocarse en un solo producto y estudiar detenidamente el factor de calibración y el desempeño de la técnica y métodos con diferentes tiempos de exposición.
- Es de gran interés darle continuidad a este trabajo estudiando muestras de todas las regiones del país y así poder conocer el nivel radioactividad que tienen los alimentos en todo el país y poder emitir alguna recomendación en cuanto a su consumo.

BIBLIOGRAFÍA

AGRICULTURA ECOLÓGICA ONLINE. *Hortalizas-cebolla* [blog]. [Consulta: 04 junio 2020]. Disponible en: <https://www.infoagro.com/hortalizas/cebolla.htm>

ALI, A. Radon Levels in different types of Plants with Medicinal Properties. *Journal of Food Technology*, 2016, vol. 1, no 1, pp. 18-21.

AMERICAN CANCER SOCIETY. *Radon and cancer* [blog]. [Consulta: 04 junio 2020]. Disponible en: <https://www.cancer.org/es/cancer/causas-del-cancer/sol-y-otras-formas-de-radiacion/radon.html>

ANSSI et al. Radón y otros radionucleidos naturales en el agua potable y riesgo de cáncer de estómago: un estudio de cohortes de casos en Finlandia. *Revista internacional de cáncer*, 2005, vol. 114, no 1, pág. 109-113.

ARAYA G. *Manual de Recomendaciones para el Cultivo de Cebolla (Allium cepa L.)*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria, 2012.

AYALA. *Radón características* [blog]. [Consulta: 30 mayo 2020]. Disponible en: <https://inmaculadaayala.wordpress.com/caracteristicas/>

BOURDON, B. et al. Introduction to U-series Geochemistry. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 2003, vol. 52, no 1, pp. 1-21.

BROSED, A. *Fundamentos de Física Médica*. Madrid: ADI Servicios Editoriales, 2004.

BURBA, J. Producción de ajo. *Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. INTA EEA La Consulta. Mendoza, Argentina*, 2003, pp. 24-27.

CÁMARA DE COMERCIO BOGOTÁ. *Manual: Zanahoria* [blog]. [Consulta: 05 junio 2020]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/14309/Zanahoria.pdf>

CHAUVIN, T. *Radon detector or digital radon sensor, which one to choose* [blog]. [Consulta 25 mayo 2020]. Disponible en: <https://radonvalaboratories.com/radon-detector-or-digital-radon-sensor-which-one-to-choose/>

COMMUNITY AGRECOLOGY NETWORK (CAN) et al. *Manual de Deshidratación*. E.E.U.U, 2015.

CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR (CSN). *Dosis de Radiación/CSN*. Madrid: Consejo de Seguridad Nuclear, 2010.

CORTEZ, et al. *Radiaciones: una mirada multidimensional*. Ministerio de Educación, Ed. Buenos Aires: Ministerio de Educación de la Nación, 2014.

CRUZ, et al. APLICACIÓN DE ABONOS ORGANICOS EN LA PRODUCCIÓN DE ZANAHORIA (*Daucus carota* L.). *Revista de Investigación Talentos*, 2018, vol. 5, no 2, p. 26-35.

CSN. *Dosis de Radiación*. [en línea], 2010. [Consulta: 23 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/914805/Dosis%20de%20radiaci%C3%B3n>

CSN. *El mapa predictivo de exposición al radón en España*. [en línea], 2013. [Consulta: 23 mayo 2020]. Disponible en: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/109567>

CSN. *Conceptos Básicos sobre Protección Radiológica: Módulo 0*. [en línea], 2014. [Consulta: 24 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/950714/Curso+General+de+Formaci%C3%B3n+de+Actuantes+en+Emergencias+Nucleares.+TEMA+00.+Conceptos+b%C3%A1sicos+sobre+protecci%C3%B3n+radiol%C3%B3gica/4fe9a575-d9e0-4683-b9d3-c28a7841ed6a>

CSN. *Radiación natural y artificial*. [en línea], 2015. [Consulta: 28 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.csn.es/radiacion-natural-y-artificial2>

DIAZ, S. E. *CIEMAT*. [en línea], 2014. [Consulta: 22 enero 2020]. Disponible en: <http://www.conama.org/conama/download/files/conama2014/CT%202014/1896711344.pdf>

DOYLE, J. et al. Toxicological profile for radon. 2012, Atlanta-Giogia.

ESPINOZA, G. *Gas Radón en Cuevas*. MÉXICO D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. 2016, doi:978-607-02-7822-8

FATSECRET MEXICO. *Calorías en Zanahoria (100 g) e Información Nutricional* [blog]. [Consulta: 04 de marzo 2020]. Disponible en: <https://www.fatsecret.com.mx/calor%C3%ADas-nutrici%C3%B3n/gen%C3%A9rico/zanahoria?portionid=59051&portionamount=100,000>

FRUTOS, B. *Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones*. 2010. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

FRUTOS, B. y OLAYA, M. Riesgos de Gestión. Soluciones Constructivas. *Revista de Salud Ambiental*, 2011, vol. 11, no 1-2, pp. 38-45.

FRUMKIN, H. y SAMET, J. Radon. *CA: a cancer journal for clinicians*, 2001, vol. 51, no 6, pp. 337-344.

GALLE, P. y PAULIN, R. Generación de una curva preliminar de efecto biológico en función de la dosis absorbida, mediante la irradiación de muestras de sangre periférica en un maniquí de agua con una fuente radiactiva de Cobalto-60, utilizando el ensayo de micronúcleos. Barcelona, España, 2003.

GARCÍA, B. El radón un problema de salud pública.[en línea], 2017. [Consulta: 30 mayo 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=702505>.

HASHIM, A. y NAJAM, L. Radium and Uranium Concentrations Measurements in Vegetables Samples of Iraq. *Scientific Research Publishing*, 2015, vol. 3, no 04, pp. 23-26.

HEALTH CANADA. *Guide for Radon Measurements in Residential Dwellings*. 2017, Canada.

HEALTH PROTECTION AGENCY. *Radon and Public Health: Report of the independent advisory group on ionising radiation*. [en línea], 2009. [Consulta: 03 junio 2020]. Disponible en: file:///C:/Users/SYSTEMarket/Desktop/Articulos%20Rad%C3%B3n%20en%20Alimentos/RC E-11_for_website.pdf

HEIYAM et al. Study of Radon Levels in Fruits Samples using LR-115 Type II Detector. *Journal of Environmental Science and Technology*, 2016, pp.449-450.

HENAO, F. *Riesgos Físicos II Iluminación*. Bogotá: Ecoe Editorial, 2017, doi:9789586484831

HOWARTH C. Result of the 2014 PHE intercomparison of Passive Radon Detectors. *Public Health England*, 2015, p.1.

HUMPHREYS, G. y BAIRD, R. *Química*. Barcelona: Reverte S.A, vol (2), 1990, pp. 13-15.

IAEA. *Technical Report Series No. 295. Measurement of Radionuclides in Food and the Environment: A guide book*. Vienna, 1989, doi:92-0-125189-0

ICRP 103. *Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*. Madrid, 2007.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). *ICRP-Publication No. 60*. Vienna. 1977.

JADWIGA, M. y KRZYSZTOF, K. Complementary system for long term measurements of radon exhalation rate from soil. 1-8. 2014.

KOTRAPPA, P. Electret ion chambers for characterizing indoor, outdoor, geologic and other sources of radon. *Radon. Hauppauge, NY: Nova Science Publishers, Inc*, 2015, pp.2-36.

KOTRAPPA, P. y STIEFF, L. R. Application of NIST 222Rn emanation standards for calibrating 222Rn monitors. *Radiation Protection Dosimetry*, 1994, vol. 55, no 3, p. 211-218.

KOTRAPPA, P., et al. A practical E-PERMTM (electret passive environmental radon monitor) system for indoor 222Rn measurement. *Health Physics*, 1990, vol. 58, no 4, pp.463-466.

KUKK, E. *Radiation and Particle Detectors*. Cambridge, USA, 2011.

KYLE, P. y MARC, L. Lung and stomach cancer associations with groundwater radon in North Carolina, USA. *International Journal of Epidemiology*, 2016, 1–10, 1-8. doi:10.1093/ije/dyw128

MAGED, A. y SAAD. Radon exhalation rate from some fertilizers, clay and potatoes in Egypt,

1998, doi:<https://doi.org/10.1108/09566169810222210>

MARTINEZ, J. et al. *Cultivos de ajo y chalotas* [blog]. 2017, [Consulta: 24 mayo 2020]. Disponible en: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/informativos/NR40738.pdf>

MECA, J. *Análisis Financiero de los Costos de Producción y Comercialización de Cebolla Paiteña en la Finca Sandy, de la Parroquia Limones Cantón Zapotillo*. 2013. Tesis de Ingeniería.

MERA, D. *Análisis de producción y consumo de la cebolla colorada en las provincias de la sierra central ecuatoriana y su impacto en el mercado nacional durante el periodo 2004-2010*. 2012. Tesis de Licenciatura.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Risk assessment of radon in drinking water. 1999

OBANDO, A. *“Medición de Radón 222 atmosférico en la ciudad de Huancayo en el periodo del 2013-2016*. Lima, 2009.

OLAYA, M. y FRUTOS, B. Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios. 2010. pp.10-21.

OMS. Manual de la OMS sobre el radón en interiores: una perspectiva de salud pública. (2015).

OMS. *El radón y sus efectos en la salud* [blog]. 2016, [Consulta: 14 julio 2020]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health#:~:text=EI%20rad%C3%B3n%20se%20produce%20a,desintegra%20y%20emite%20part%C3%ADculas%20radiactivas>.

ONONUGBO, C. P. y AVWIRI, G. O. Estimation of Lung Cancer Risk Due to Radon Exposure in Natural Food Spices. *Archives of Current Research International*, 2018, pp. 1-10.

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA (IAEA). *Monitorización del medio ambiente y de las fuentes de radiación con fines de protección radiológica. Guía de seguridad No. RS-G-1.8*. 2010, Viena.

OUFNI, L., et al. Determination of radon and thoron concentrations in different parts of some plants used in traditional medicine using nuclear track detectors. *American journal of environmental protection*, 2013, vol. 1, no 2, pp. 34-40.

PALLO, J. *Adaptación de cuatro variedades de ajo (allium sativum l.) Con tres niveles de abono orgánico en el cantón La Maná 2013*. 2014. Tesis de Ingeniería

PNUMA. Radiación: efectos y fuentes. 2016, Perú. doi: 9789280735994.

POINSSOT, C. y GECKEIS, H. Radionuclide behaviour in the natural environment: an overview. *Environmental Remediation and Restoration of Contaminated Nuclear and Norm Sites*, 2015, pp. 57-82.

PROGRAMA DE DIVERSIFICACIÓN. *Manual de producción de Zanahoria*. Honduras:

USAID. 2005.

QUINDÓS, L. et al. *Guía: EL Gas Radón en el Ambito Laboral*. Madrid: Ministerio del Trabajo, Migración y Seguridad Social, 2019.

QUINDÓS, S. *Radón: un gas radiactivo en su casa*. Madrid: Consejo de Seguridad Nacional y Universidad de Cantabria, 1995.

RAD ELEC E-PERM. *Sistema per la Misura del Gas Rasón*. Italia, 2011.

SANTILLAN, C. Detección de gas Radón (^{222}Rn) en las unidades educativas de nivel superior del Distrito de Educación 06D01 Chambo-Riobamba con infraestructura antigua de la ciudad de Riobamba [en línea] (trabajo de titulación). (Biofísica) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador. 2018. [consulta en línea]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/9059>

SUÁREZ JA et al. *Análisis Radioquímico del Radio Total, Radio-226 y Radio 224*. Madrid: Ciemat. 1987, doi:84-505-6198-1

TAYSEER I. AL-NAGGAR AND DOAA H. SHABAAN. Radon in Foods. 2020, pp.1-11.

TUCCIMEI, P. Simultaneous determination of ^{222}Rn and ^{220}Rn exhalation rates from building materials used in Central Italy with accumulation chambers and a continuous solid state alpha detector: Influence of particle size, humidity and precursors concentration. 2006, pp. 254-263.

VENTOSO B. *El Radón: Un problema de salud publica* (Primera ed.). Gales: Ciencias y Letras., 2017, doi:<http://dx.doi.org/10.17993/CcyLl.2017.06>

WELSH J. *Beta Radiation*. U.S.A.: Radiation Oncology. 2005, doi:1083-7159/2006

WORLD HEATH ORGANIZATION. Who Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. 2009, pp. x-xi.

XUNTA DE GALICIA. *RADÓN: Guía de recomendaciones de mitigación en viviendas existentes*. España, 2018, vol (1).

YASSER H. y MASHHADANI et al. Radon and Radium Determination in Coffee Using CR-39 Nuclear Track Detector. 2009, pp.105-108.

