



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA FÍSICA

**“DETERMINACIÓN DE CONCENTRACIONES DE RADIO
(^{226}Ra), RADÓN (^{222}Rn) Y TORÓN (^{220}Rn) EN SUMINISTROS DE
AGUA POTABLE DE LOS CANTONES RIOBAMBA, GUAMOTE,
ALAUÍS Y CHUNCHI”.**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto Integrador

Presentado para optar por el grado académico de:

BIOFÍSICO

AUTORES: FIENCO BACUSOY AUGUSTO EUCLIDES

SAMANIEGO LEÓN SHIRLEY ADRIANA

DIRECTORA: Dra. JHENY DEL CARMEN ORBE Ph.D

Riobamba - Ecuador

2021

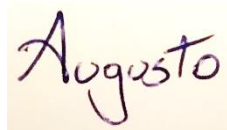
©2021, Augusto Euclides Fienco Bacusoy & Shirley Adriana Samaniego León

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, AUGUSTO EUCLIDES FIENCO BACUSOY y SHIRLEY ADRIANA SAMANIEGO LEÓN 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. 03 de diciembre de 2021.



Augusto Euclides Fienco Bacusoy
131452885-0



Shirley Adriana Samaniego León
060408654-6

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA FÍSICA

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El Trabajo de titulación: Tipo Proyecto Integrador, “**DETERMINACIÓN DE CONCENTRACIONES DE RADIO (^{226}Ra), RADÓN (^{222}Rn) Y TORÓN (^{220}Rn) EN SUMINISTROS DE AGUA POTABLE DE LOS CANTONES RIOBAMBA, GUAMOTE, ALAUSÍ Y CHUNCHI**”, realizado por los señores: **AUGUSTO EUCLIDES FIENCO BACUSOY Y SHIRLEY ADRIANA SAMANIEGO LEÓN**, 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.

FIRMA

FECHA

Biof. Daniela Alejandra Barragán Rivera. Msc

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

2021-12-03

Dra. Jheny del Carmen Orbe Ordoñez. PhD

**DIRECTORA DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

2021-12-03

Biof. María Fernanda Heredia.Moyano Msc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

2021-12-03

DEDICATORIA

Este trabajo Investigativo lo dedico principalmente a Dios, a mi abuelo que a pesar de no estar a mi lado fue mi más grande inspirador, a mi abuela y a mi padre por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años y darme la fuerza y los recursos para culminar la meta propuesta, mi título universitario que lo llevaré con mucho orgullo y al servicio de la patria.

A todas las personas, familiares y amigos que me motivaron con cada palabra de aliento para llegar hasta aquí cuando me parecía complicado e imposible.

Shirley

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme la fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de mis anhelos más deseados. A mis padres Augusto y Judith quienes con su amor, paciencia y sacrificio en todos estos años he logrado convertirme en lo que soy. Ha sido un orgullo y privilegio ser su hijo. A mis hermanos Judith, Augusto, Lolita y Borys por estar presentes y por el apoyo incondicional que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

Augusto

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento al gestor y creador del mundo, a mis padres y abuelos por ser el pilar fundamental en mi vida, gracias por el esfuerzo, dedicación y paciencia, a todas aquellos docentes que con sus vastos conocimientos me sirvieron de guía y me enseñaron las pautas para mi formación profesional, a las diferentes Instituciones públicas de la ciudad, cantón y provincia por abrirnos sus puertas con su sabiduría y experiencia y culminar con éxito la meta propuesta.

Augusto & Shirley

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Los sistemas acuíferos en el planeta.....	3
1.2. Situación de los acuíferos en el Ecuador.....	4
1.3. Aguas subterráneas en la provincia de Chimborazo.....	5
1.4. Radioactividad natural.....	6
1.4.1. <i>Series radiactivas</i>	8
1.4.2. <i>La radioactividad en las fuentes subterráneas de agua</i>	10
1.4.2.1. <i>Radionucleidos naturales en precipitación</i>	12
1.4.2.2. <i>Zona insaturada</i>	12
1.4.2.3. <i>Zona saturada</i>	13
1.4.3. <i>Isótopos de radio</i>	14
1.4.4. <i>Isotopos de radón</i>	15
1.4.5. <i>Isotopos de torio</i>	16
1.4.6. <i>Normativa Internacional de concentraciones de isotopos radiactivos.</i>	16

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO.....	19
2.1. Descripción del área de estudio.....	19
2.1.1. <i>Cantón Chunchi</i>	19
2.1.2. <i>Cantón Alausí</i>	20
2.1.3. <i>Cantón Guamote</i>	22

2.1.4.	<i>Cantón Riobamba</i>	23
2.2.	Protocolo de Muestreo.	26
2.3.	Técnica emanométrica con RAD7	26
2.3.1.	<i>Descripción del detector de radón RAD7</i>	27
2.3.2.	<i>Descripción RAD H₂O</i>	28
2.4.	Procedimiento para determinar la concentración de radón-222	29
2.5.	Procedimiento para determinar la concentración de radio-226 y torón (radón-220)	29
2.6.	Cálculo de las dosis efectivas anuales por ingestión de radón-222 o radio-226.	30

CAPÍTULO III

3.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	31
3.1.	Resultados de las concentraciones de radón-222	31
3.2.	Resultados de la concentración de radio-226	36

	CONCLUSIONES	42
--	---------------------------	----

	RECOMENDACIONES	43
--	------------------------------	----

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Series radioactivas naturales.....	8
Tabla 2-1:	Contenidos de U, Th y K en los principales tipos de rocas	11
Tabla 1-2:	Funcionalidad del monitor RAD7.....	27
Tabla 2-2:	Especificaciones técnicas del RAD 7.....	28
Tabla 1-3:	Dosis efectiva anual por ingestión de radón-222 y monitoreo radiactivo, cantón Chunchi	32
Tabla 2-3:	Concentración media de radón-222, cantón Alausí	33
Tabla 3-3:	Dosis efectiva anual de radón-222, cantón Guamote	34
Tabla 4-3:	Dosis efectiva anual de radón-222, cantón Riobamba	35
Tabla 5-3:	Dosis efectiva anual de radio-226, cantón Chunchi.....	36
Tabla 6-3:	Dosis efectiva anual de radio-226, cantón Alausí.....	37
Tabla 7-3:	Dosis efectiva anual de radio-226, cantón Guamote.....	38
Tabla 8-3:	Dosis efectiva anual de radio-226 del cantón Riobamba.....	39

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3:Resultados de las concentraciones de la actividad de radón-222, cantón Chunchi	31
Gráfico 2-3: Resultados de las concentraciones de la actividad de radón-222, cantón Alausí	32
Gráfico 3-3: Resultados de las concentraciones de la actividad de radón-222, cantón Guamote	33
Gráfico 4-3: Resultados de las concentraciones de la actividad de radón-222, cantón Riobamba	34
Gráfico 5-3: Resultados de concentración de la actividad de radio-226, Cantón Chunchi.....	36
Gráfico 6-3: Resultados de la concentración de la actividad de radio-226, cantón Alausí.....	37
Gráfico 7-3: Resultados de la concentración de la actividad de radio-226, cantón Guamote..	38
Gráfico 8-3: Resultados de la concentración de la actividad de radio-226, cantón Riobamba	39
Gráfico 9-3: Concentraciones de las actividades máximas de radón-222 y radio-226	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Cadena de decaimiento del uranio-238.....	9
Figura 2-1:	Cadena de decaimiento del torio-232	10
Figura 1-2:	Ubicación de las fuentes de agua usadas para consumo humano en el cantón Chunchi.....	20
Figura 2-2:	Ubicación de las fuentes de agua destinadas para el consumo humano en el cantón Alausí.....	22
Figura 3-2:	Ubicación de los acuíferos que abastecen de agua potable al cantón Guamote.	23
Figura 4-2:	Ubicación de las fuentes que proporcionan agua potable a la mayor parte de la población de la ciudad de Riobamba.....	25
Figura 5-2:	Configuración experimental de la técnica emanométrica usando el detector de radón y torón RAD7 y el accesorio RAD H2O.....	27

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-2: Ecuación de concentración de la Actividad del ^{222}Rn	30
Ecuación 2-2: Dosis efectiva del radón.....	30

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: FOTOGRAFÍAS DE LAS FUENTES DE AGUA DEL CANTÓN CHUNCHI

ANEXO B: FOTOGRAFÍAS DE LAS FUENTES DE AGUA DEL CANTÓN ALAUSÍ

ANEXO C: FOTOGRAFÍAS DE LAS FUENTES DE AGUA DEL CANTÓN GUAMOTE

ANEXO D: FOTOGRAFÍAS DE LAS FUENTES DE AGUA DEL CANTÓN RIOBAMBA

RESUMEN

El objetivo de esta investigación radicó en el monitoreo de 25 suministros de agua potable de los cantones Chunchi, Alausí, Guamote y Riobamba pertenecientes a la provincia de Chimborazo. Se analizaron las muestras de agua con el fin de determinar las concentraciones de radón-222, torón (radón-220) y radio-226 usando la técnica emanométrica que aprovecha la predisposición del gas radón a migrar al aire. La configuración experimental consistió en un detector semiconductor de silicio incorporado al monitor RAD7 y el sistema de desgasificación del kit RAD H₂O, fabricados por la Durrige Company. Los resultados más altos para radio-226 se obtuvieron en la fuente Bacún del cantón Chunchi con un valor de $0,526 \pm 0,088$ Bq/l; para radón-222, se dieron en la fuente Chipo Chico ubicada en el cantón Guamote con un resultado de $7,488 \pm 0,211$ Bq/l y para los análisis de torón se detectaron en el pozo Llio 7, del cantón Riobamba, con un valor de $0,141 \pm 0,081$ Bq/l. Los resultados muestran que todas las fuentes estudiadas presentan valores bajos de concentración tanto de radón-222, radio-226 y torón con respecto al nivel de referencia recomendado por la Unión Europea en la Directiva 2013/51/EURATOM (Comunidad Europea de Energía Atómica). A partir de estos procesos básicos se recomienda seguir el protocolo de muestreo para evitar datos erróneos.

Palabras clave: <CALIDAD DE AGUA>, <RADIOISÓTOPOS>, <RADÓN-222>, <RADIO-226>, <TORÓN (RADÓN-220)>, <TÉCNICA EMANOMÉTRICA>.



0209-DBRA-UTP-2022

ABSTRACT

The objective of this research was to monitor 25 drinking water supplies from the cantons of Chunchi, Alausí, Guamote and Riobamba in the province of Chimborazo. The water samples were analysed to determine the concentrations of radon-222, thoron (radon-220) and radium-226 using the emanometric technique that takes advantage of the predisposition of radon gas to migrate into the air. The experimental setup consisted of a silicon semiconductor detector incorporated into the RAD7 monitor and the RAD H2O kit degassing system, manufactured by the DurrIDGE Company. The highest results for radium-226 were obtained at the Bacún source in the Chunchi canton with a value of 0.526 ± 0.088 Bq/l; for radon-222, they were obtained at the Chipo Chico source located in the Guamote cantón with a result of 7.488 ± 0.211 Bq/l and for thoron analysis they were detected at the Llio 7 well, in the Riobamba canton, with a value of 0.141 ± 0.081 Bq/l. The results show that all the sources studied have low concentration values for radon-222, radium-226 and thoron with respect to the reference level recommended by the European Union in Directive 2013/51/EURATOM (European Atomic Energy Community). From these basic processes it is recommended to follow the sampling protocol to avoid erroneous data.

Keywords: <WATER QUALITY>, <RADIOISOTOPES>, <RADION-222>, <RADION-226>, <TORON (RADION-220)>, <EMANOMETRIC TECHNIQUE>.

CARMITA
EULALIA
ROJAS CASTRO



Digitally signed by
CARMITA EULALIA
ROJAS CASTRO
Date: 2022.02.09
19:04:40 -05'00'

INTRODUCCIÓN

La fuente de los radionucleidos disueltos en el agua, destinada al consumo humano, es el lecho de roca circundante en el acuífero. En los entornos geológicos ricos en uranio-235, como, por ejemplo, el granito, se espera altas concentraciones de actividad de la serie del uranio como radio-226 y radón-222. El radio y el radón son esencialmente solubles en agua, por lo tanto, ingresan al agua subterránea por disolución de materiales en este medio y por desintegración radiactiva (Wallner & Steininger, 2007, p.15).

El radio tiene una larga vida media de 1600 años y se comporta como el calcio, trazando la ruta del calcio en el cuerpo y depositándose en el tejido óseo. La emisión de partículas alfa del radio-226 lo convierte en un carcinógeno. La acumulación continua de este radioisótopo en el tejido óseo es una causa conocida de cáncer de hueso. Por otro lado, el radón-222 al ser un gas, con vida media de 3,82 días, que emite partículas alfa cuando se descompone después de ser inhalado o ingerido, libera energía que puede ser perjudicial para el tejido vivo, a tal punto de producir las mutaciones celulares lo que provoca un mayor riesgo de contraer cáncer. (Le et al., 2015a, p.10)

El torón tiene una vida media de 55,6 segundos, es un isótopo que pertenece a la serie de desintegración del torio-232 ($4n$), una fracción de torón (radón-220) escapa de las rocas y minerales a la fase fluida circundante, como el agua subterránea y el aire, cuya proporción depende de factores como la superficie total de sólidos y la concentración, los posibles peligros para la salud debido a este radionucleido natural en el consumo de agua se han considerado a todo el mundo, y están sujetos a las recomendaciones de la OMS (Bonetto et al., 2014, p.10).

La exposición de la población a la radiación a través de la ingesta de radio-226, radón-222 y torón constituye un problema de salud pública, por lo que es de interés mundial la evaluación de la concentración de estos elementos radiactivos en los pozos, vertientes y suministros de agua potable de los pueblos y ciudades. Tasev y Serafimovski (2021, p.12), realizaron un estudio de concentración de radio-226 y radon-222 en agua de consumo humano en la población de Kavadarci, en Macedonia, reportando valores de radio-226 entre 0,09 a 0,21 Bq/l con un promedio de 0,17 Bq/l, estos valores fueron al menos cinco veces menores que los valores referenciales propuestos por la OMS de 0,5 Bq/l. El reporte de radón-222 osciló entre 0,53 y 0,87 Bq/l con un promedio de 0,70 Bq/l, que es de varias magnitudes por debajo de los valores de referencia de 11,1 Bq/l dados por la US-EPA.

En el Brasil, Bonetto (2014, p.10), realizó un trabajo de investigación relacionado con la presencia de radón-222 y torón (radón-220) disueltos en el agua de vertientes utilizada para consumo humano, encontrando que la concentración de actividad de radón-222 osciló entre 0,02 y 112,5 Bq/l, mientras que el intervalo de concentración de actividad de torón <4-895 mBq/l, cuyos datos se encuentran por debajo de los valores establecidos por la UNSCEAR.

En contraste con los abundantes informes que se centran en el radón-222, solo se han realizado unos pocos estudios sobre la determinación cuantitativa del torón, debido a las dificultades para medir la radiactividad de un isótopo gaseoso con una vida media de 55,6 segundos. Entre las excepciones se encuentra la investigación de Misdaq y Chaouqi (2008) que midieron la concentración de actividad de torón (radón-220) en 13 muestras de agua mineral embotellada de Marruecos, Francia e Italia ampliamente consumidas por la población europea residente en la ciudad de (Marruecos), reportaron niveles de torón que van desde 0,91 a 3,4 Bq/l.

En el Ecuador no se han encontrado trabajos de investigación que reporten mediciones de concentración de radio-226, radón-222 y torón (radón-220) en agua de consumo humano, únicamente se han observado reportes bibliográficos sobre la concentración de estos radionucleidos en aguas termales. En el país, particularmente en los diferentes cantones de la provincia de Chimborazo los suministros de agua potable provienen de fuentes subterráneas, por lo que es fundamental investigar sobre la radiactividad del agua de consumo humano.

En este estudio se determinó la concentración de radio-226, radón-222 y torón (radón-220) en suministros de agua potable de los cantones Riobamba, Guamote, Alausí y Chunchi, usando el protocolo de muestreo y medición desarrollado por el grupo de investigación GIDAC-ESPOCH en el marco del proyecto de investigación "*Evaluación de elementos radiactivos de la serie del Uranio-238 en el ambiente en pacientes con cáncer*". Todas las mediciones fueron llevadas a cabo con la técnica emanométrica, cuya configuración experimental consistió en un detector semiconductor de silicio incorporado al monitor RAD7 y el kit H2O.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Los sistemas acuíferos en el planeta

Un acuífero es un cuerpo de roca y/o sedimento que contiene agua subterránea. El agua subterránea es la palabra que se usa para describir la precipitación que se ha infiltrado en el suelo más allá de la superficie y se ha acumulado en espacios vacíos bajo tierra. Hay dos tipos generales de acuíferos: confinados y no confinados. Los acuíferos confinados tienen una capa de roca o arcilla impenetrable sobre ellos, mientras que los acuíferos no confinados se encuentran debajo de una capa permeable de suelo. Muchos tipos diferentes de sedimentos y rocas pueden formar acuíferos, como grava, arenisca, conglomerados y piedra caliza fracturada. A veces, los acuíferos se clasifican según el tipo de roca o sedimentos de los que están compuestos. (Sánchez & Tello, 2018, p.65).

Un error común sobre los acuíferos es creer que son ríos o lagos subterráneos, si bien el agua subterránea puede filtrarse dentro o fuera de los acuíferos debido a su naturaleza porosa, no puede moverse lo suficientemente rápido como para fluir como un río. La velocidad a la que el agua subterránea se mueve a través de un acuífero varía según la permeabilidad de la gran parte del agua que se utiliza en el mundo para fines domésticos, industriales o agrícolas es agua subterránea. La mayor parte del agua subterránea, incluida una cantidad significativa del agua potable, proviene de los acuíferos. Para acceder a esta agua, se debe crear un pozo perforando un agujero que llegue al acuífero. Si bien los pozos son puntos de descarga creados por el hombre para los acuíferos, también se descargan de forma natural en manantiales y humedales.

Los acuíferos contienen casi el 98 % del agua dulce del planeta. La mayoría se encuentra en 37 de los sistemas acuíferos más grandes del mundo (UNESCO, 2018, párr. 4). Muchas regiones del mundo de rápido crecimiento que están sujetas a un mayor estrés hídrico están bombeando sus acuíferos más rápido de lo que estos pueden reponer (Borunda, 2020, párr.5).

El 20 % de la agricultura mundial irrigada depende de acuíferos clave que están mostrando niveles de agua en descenso. (Oscar et al., 2016, p.4).

El agua subterránea puede agotarse si se usa a un ritmo más acelerado de lo que puede reponerse, la reposición de los acuíferos por precipitación se denomina recarga, el agotamiento de los acuíferos ha aumentado principalmente debido a la expansión de las actividades productivas humanas, situación que además provoca la contaminación del agua subterránea que puede ser el resultado del uso excesivo de pesticidas y herbicidas en los campos agrícolas, las fugas de los tanques sépticos o los vertederos que son revestidos o administrados incorrectamente y los

materiales tóxicos que se filtran a través del suelo hacia el acuífero. Los acuíferos filtran naturalmente el agua subterránea forzándola a pasar a través de pequeños poros y entre sedimentos, lo que ayuda a eliminar sustancias del agua. Sin embargo, este proceso de filtración natural puede no ser suficiente para eliminar todos los contaminantes.

Durante los últimos 10 años, según datos satelitales, 21 de los 37 grandes acuíferos en el mundo han disminuido a un ritmo insostenible, su reposición, si es posible, podría llevar cientos de años. El almacenamiento de agua subterránea está disminuyendo en todos los continentes. Más de 2500 millones de personas dependen del agua subterránea para sus necesidades básicas. Algunos países son más dependientes que otros: los acuíferos representan entre el 75 % y el 95 % del uso del agua. El agua subterránea es un amortiguador esencial en períodos de sequía, sin embargo, a medida que se intensifican los impactos del cambio climático, se prevé que los acuíferos sufran una mayor erosión y menores tasas de recarga, la frecuencia de las inundaciones de las áreas costeras también aumentará la salinidad de los acuíferos, lo que reducirá la calidad del agua y su facilidad de uso. (Borunda, 2020, párr.3).

El agotamiento más rápido de los acuíferos se está produciendo en países semiáridos y áridos con una alta dependencia del riego para la agricultura. Estas tendencias son más significativas en el norte de la India, los Estados Unidos, Arabia Saudita, el norte de China, el norte de África y la India, por sí sola extrae 230 km³ de agua subterránea por año, más de una cuarta parte del total mundial, impulsada por la agricultura y la industria. Las estimaciones mundiales del agotamiento del almacenamiento de agua subterránea son inciertas. No se trata solo de su agotamiento, el uso excesivo puede aumentar la tasa de contaminación y salinización de las reservas de agua subterránea restantes, aumentando los costos del suministro de agua.

1.2. Situación de los acuíferos en el Ecuador

En el Ecuador la información sobre el agua subterránea es escasa, sin embargo, se están realizando investigaciones para desarrollar una base de datos confiables. En la actualidad, la Agencia Reguladora para el Control del Agua (ARCA) trabaja para desarrollar regulaciones apropiadas, en el año 2015 se publicó el mapa hidrogeológico del Ecuador distribuido por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (Burbano et al., 2014, p.17).

De acuerdo con estas fuentes de información, se dispone de suficientes suministros de agua dulce subterránea en la mayor parte de Ecuador. Los manantiales y los pozos profundos proporcionan las fuentes de agua subterránea más confiables e importantes para el suministro de agua potable. En los valles de las tierras altas, los acuíferos son pequeños (Agencia Regulatoria, 2021, p.8).

Los suministros de agua subterránea más abundantes están disponibles en aluviones que generalmente consisten en arenas y gravas, estos acuíferos se encuentran en la cuenca del río

Guayas de la región costa y a lo largo de ríos en la región oriente. Se ha observado que los rendimientos en la cuenca del río Guayas llegan a los 7900 litros por minuto. Otras fuentes importantes de abastecimiento de agua subterránea también se encuentran en la región oriente en acuíferos de sedimentos consolidados y no consolidados, principalmente de areniscas y conglomerados (Burbano et al., 2014, p.9).

El agua subterránea es generalmente más segura que los suministros de agua superficial no tratada; sin embargo, muchos acuíferos poco profundos se están contaminando. Sin tratamiento, la mayoría de las fuentes de agua tradicionales se están volviendo inadecuadas para el consumo humano. La contaminación biológica de los acuíferos poco profundos por patógenos debido a la eliminación inadecuada de desechos humanos y animales es un problema común. El problema afecta a las zonas que rodean incluso a los pueblos más pequeños. La superficie de la capa freática generalmente sigue los contornos de la tierra y las columnas de contaminación generalmente se mueven ladera abajo desde áreas pobladas (Agenda Regulatoria, 2021, p.9).

1.3. Aguas subterráneas en la provincia de Chimborazo

De acuerdo con la información proporcionada por el INHAMI (2007) y registrada en el mapa hidrogeológico del Ecuador se indica que en la provincia de Chimborazo existen dos zonas, una donde el agua dulce es siempre abundante, que ocupa aproximadamente el 10 % de la provincia principalmente en el desfiladero del río Cebadas, que se desagua hacia el norte entre la cordillera occidental y la cordillera oriental. La zona dos del mapa ocupa aproximadamente el 90 % de la provincia. Representa áreas donde el agua dulce es abundante estacionalmente en la mayoría de los arroyos, generalmente de octubre a junio, con caudales disminuyendo el resto del año.

Con respecto al agua subterránea, el mapa hidrogeológico del Ecuador reporta 3 zonas en la provincia de Chimborazo. Los acuíferos de la provincia tienen valores de sólidos disueltos en el agua (TDS) que oscilan entre 60 y 1425 miligramos por litro. La vegetación densa y las pendientes pronunciadas pueden limitar el acceso en muchas áreas. (Burbano et al., 2014, p.17)

Alrededor del 60 % de la provincia se encuentra dentro de la zona, donde el agua dulce es abundante a nivel local el 25 % indica pequeñas áreas de agua subterránea dispersas por todo el territorio de la provincia (INAMHI, 2007, párr.3).

Los acuíferos de sedimentos clásticos no consolidados y consolidados consisten típicamente en andesitas, aglomerados y sedimentos volcánicos. Estos acuíferos son locales y discontinuos con permeabilidad baja a media, produciendo cantidades pequeñas a moderadas de agua dulce. Riobamba, la capital de la provincia, se encuentra dentro de esta área. La formación Cangahua de la zona dispersa consiste en sedimentos volcánicos. Los pozos en esta formación tienen rendimientos de 60 a 900 litros por minuto. Esta formación contiene manantiales con valores de

TDS que oscilan entre 223 y 345 miligramos por litro. La mayoría de las áreas dentro de esta zona geohídrica son adecuadas para pozos tácticos y de bombas manuales. La zona de abundantes recursos geohídricos ocupa aproximadamente el 60 % de la provincia y se encuentra en todas partes. Los acuíferos consisten típicamente en sedimentos volcánicos. Producen de muy pequeñas a pequeñas cantidades de agua dulce a partir de zonas de fracturas localizadas con permeabilidad muy baja a media a profundidades inferiores a 60 metros. La formación Macuchi consta de diabasas y andesitas con sedimentos volcánicos, esta formación contiene manantiales con valores de TDS que oscilan entre 135 y 1425 miligramos por litro. La formación Sicalpa consta de aglomerados y lavas piroclásticas-andesíticas, esta formación contiene manantiales con valores de TDS que oscilan entre 340 y 740 miligramos por litro (ARCA, 2021, p.18; INAMHI, 2007, párr. 2). Los sedimentos volcánicos recientes consisten en lavas, tobas andesíticas, brechas y cenizas. Esta formación contiene manantiales con valores de TDS que oscilan entre 96 y 950 miligramos por litro. Se reporta una zona hidrogeológica que ocupa el 15 % de la provincia en un área alargada en la parte sureste. Los acuíferos se encuentran dentro de la formación del grupo Paute y consisten en andesitas, filitas y esquistos, que producen cantidades exiguas o pequeñas de agua dulce. Estos acuíferos tienen propiedades hidrológicas muy pobres y son casi impermeables. Dos manantiales en este acuífero tienen valores de TDS de 125 y 270 miligramos por litro. Estas áreas son las menos deseables para exploraciones de pozos debido a su bajo potencial de rendimiento. Algunas áreas dentro de esta zona, generalmente a lo largo de fracturas a profundidades de menos de 60 metros, son adecuadas para pozos tácticos y de bombeo manual.

1.4. Radioactividad natural

Las sustancias radiactivas son omnipresentes en la tierra. Contienen isótopos radiactivos (radionúclidos) que generan diferentes tipos de radiación ionizante en el transcurso de las transformaciones nucleares. Los radionucleidos presentes en el medio ambiente se agrupan con respecto a su origen en las siguientes clases: (i) radionucleidos primordiales, (ii) radionucleidos cosmogénicos, (iii) radionucleidos producidos en series de desintegración natural y (iv) radionucleidos antropogénicos. Los radionucleidos primordiales comprenden isótopos radiactivos que han estado presentes en la tierra desde su formación. Debido a sus vidas medias muy largas, comparables con la edad del sistema solar, aún no han decaído más allá del punto de su detección. El miembro más destacado de este grupo es el isótopo radiactivo potasio-40, que contribuye con aproximadamente el 16 % a la dosis efectiva anual que reciben los miembros de la población mundial debido a la radiación ionizante procedente de radionúclidos naturales (Morata Rabal 2016, p.1.; UNSCEAR 2020, p.238).

Los radionúclidos cosmogénicos se producen en la atmósfera y en la capa superior de la corteza terrestre, en las interacciones de la radiación cósmica con los componentes de esos depósitos. Este grupo comprende más de 20 isótopos de elementos que van desde el hidrógeno hasta el criptón. La mayoría de los radionúclidos cosmogénicos se producen en tres tipos principales de reacciones nucleares que involucran partículas cósmicas: espalación, captura de neutrones y captura de muones. Las reacciones de espalación son el modo más común de producción de radionúclidos en la atmósfera. Los radionúclidos cosmogénicos contribuyen con menos del 1 % a la dosis efectiva media anual de los radionúclidos naturales, siendo el radiocarbono (^{14}C) el principal contribuyente que representa casi el 100 % de esta dosis (Escareño Juárez, 2019, p.31).

Los radionucleidos pertenecientes a la serie de desintegración natural representan la fuente más importante de radiación ionizante en la tierra, contribuyendo con aproximadamente el 83 % de la dosis efectiva media total recibida por la población mundial de los radionucleidos naturales según Torres (2019, p.55). Se generan en sucesivas desintegraciones de tres radioisótopos primordiales: ^{232}Th , ^{235}U y ^{238}U . La serie de desintegración implica transformaciones nucleares con emisión de partículas alfa o beta y termina con isótopos estables de plomo (^{208}Pb , ^{207}Pb , ^{206}Pb para las series de desintegración ^{232}Th , ^{235}U y ^{238}U , respectivamente). La presencia de isótopos gaseosos de radón (^{219}Rn , ^{220}Rn , ^{222}Rn) y sus progenies en series de desintegración natural es en gran parte responsable de su gran participación (aproximadamente el 50 %) en la dosis efectiva total recibida por la población mundial de fuentes naturales de radiación ionizante. (Kovler et al. 2017, p.16).

Por último, los radionucleidos antropogénicos, que se originan principal o exclusivamente de las actividades tecnológicas del hombre, también están presentes en el medio ambiente y contribuyen a la dosis efectiva global que reciben los habitantes del planeta. Se pueden separar ampliamente en radionúclidos que se produjeron y dispersaron en el medio ambiente durante los ensayos de bombas nucleares atmosféricas en los años cincuenta y sesenta, y los que se liberaron durante el funcionamiento rutinario de las instalaciones nucleares (reactores de potencia, plantas de reprocesamiento) o encontraron su origen camino al medio ambiente en liberaciones accidentales de diversa naturaleza. (Peralta Vital y Gil Castillo, 2015, p.58).

Algunos de los radioisótopos que pertenecen a este grupo (por ejemplo, ^3H o ^{14}C) también se generan por interacciones de los rayos cósmicos con componentes de la atmósfera. Otros, como ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr o isótopos de plutonio (^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu) generalmente no han estado presentes en el medio ambiente en cantidades detectables antes de la era nuclear (Muñoz, 2018, p.7). Las sustancias radiactivas naturales a menudo se clasifican en dos grupos con respecto a su distribución en el medio ambiente: (i) materiales radiactivos naturales y (ii) tecnológicamente mejorados. El segundo grupo comprende materiales naturales o artificiales, que contienen concentraciones elevadas de elementos radiactivos como resultado de transformaciones

tecnológicas de diversa índole. Los ejemplos incluyen la producción de fertilizantes y la combustión de combustibles fósiles (Osore, 2008, p.163).

El uso creciente de los recursos de agua subterránea para fines de agua potable requiere una evaluación cuidadosa de este aspecto de la presencia de sustancias radiactivas en el medio ambiente. Los isótopos radiactivos como el ^3H , ^{14}C , ^{36}Cl o ^{39}Ar se han discutido a menudo en relación con las aguas subterráneas, pero principalmente como herramientas para evaluar escalas de tiempo del flujo de aguas subterráneas (Guevara S., 2015, p. 7).

1.4.1. Series radiactivas

Los elementos radiactivos naturales básicos se incluyen en cuatro series radiactivas (Tabla 1.1). Éstas son: serie de torio, serie de neptunio, serie de uranio y serie de uranio-actinio. Todos los elementos de la serie radiactiva están vinculados por transformaciones recíprocas irreversibles, por tanto, los sistemas cerrados alcanzan el equilibrio durante un período definido. La serie natural contiene los elementos radiactivos acumulados durante millones de años. De acuerdo con Vasilyeva y Starkov (2001, p.5) Grandes cantidades de isótopos radiactivos descendientes están en equilibrio con el uranio y el torio. Los elementos de la serie abandonan el sistema gracias a procesos geoquímicos, diferencia de propiedades físicas-químicas y mimetismo. Por tanto, el sistema puede abrirse provocando la ruptura del equilibrio radiactivo, de ahí, que sea necesario, el grado y el tiempo de estado abierto del sistema para estimar la radioactividad en serie.

Tabla 1-1.: Series radioactivas naturales

Series	Cambio de masa	Isótopo radiactivo progenitor	Isótopo estable descendiente
Thorium	$4n$	^{232}Th ($T_{1/2}=1,405 \times 10^{10}\text{y}$)	^{208}Pb
Neptunium	$4n + 1$	^{237}Np ($T_{1/2} = 2,14 \times 10^6\text{y}$)	^{209}Bi
Uranium	$4n + 2$	^{238}U ($T_{1/2} = 4,47 \times 10^9\text{y}$)	^{206}Pb
Uranium-actinium	$4n + 3$	^{235}U ($T_{1/2} = 7,04 \times 10^8 \text{ y}$)	^{207}Pb

Fuente: Vasilyeva y Starkov 2001 p. 2.

Connor (2020), explica que las cuatro series de radioisótopos mencionadas, que son sucesores de los cuatro núcleos pesados tienen vidas medias muy largas.

- la serie de torio con torio- 232 (con una vida media de 14 mil millones de años),
- la serie de uranio con uranio- 238 (que vive por 4,47 mil millones de años),

- la serie de actinio con uranio-²³⁵ (con una vida media de 0.7 mil millones de años).
- la serie de neptunio con neptunio-²³⁷ (con una vida media de 2 millones de año

Cuando se desintegra, un radionúclido se transforma en un átomo diferente: un producto de desintegración, los átomos continúan transformándose en nuevos productos de desintegración hasta que alcanzan un estado estable y ya no son radiactivos. La mayoría de los radionúclidos solo se desintegran una vez antes de estabilizarse, los que se desintegran en más de un paso se denominan radionucleidos en serie, la serie de productos de descomposición creados para alcanzar este equilibrio se llama cadena de decaimiento (Connor, 2020, párr. 4).

Cada serie tiene su propia cadena de descomposición que es única, los productos de desintegración dentro de la cadena son siempre radiactivos. Solo el átomo estable final de la cadena no es radiactivo. Algunos productos de descomposición son un elemento químico diferente, a continuación, se presentan dos de las cadenas de desintegración, importantes para este trabajo.

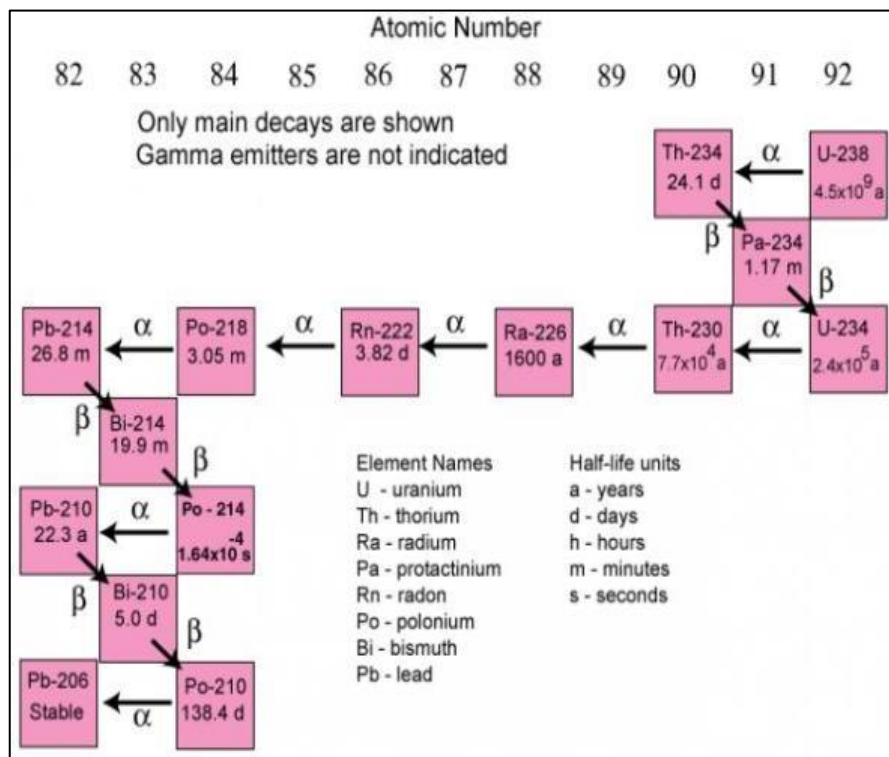


Figura 1-1: Cadena de decaimiento del uranio-238.

Fuente: Adams J., 1970, p.257.

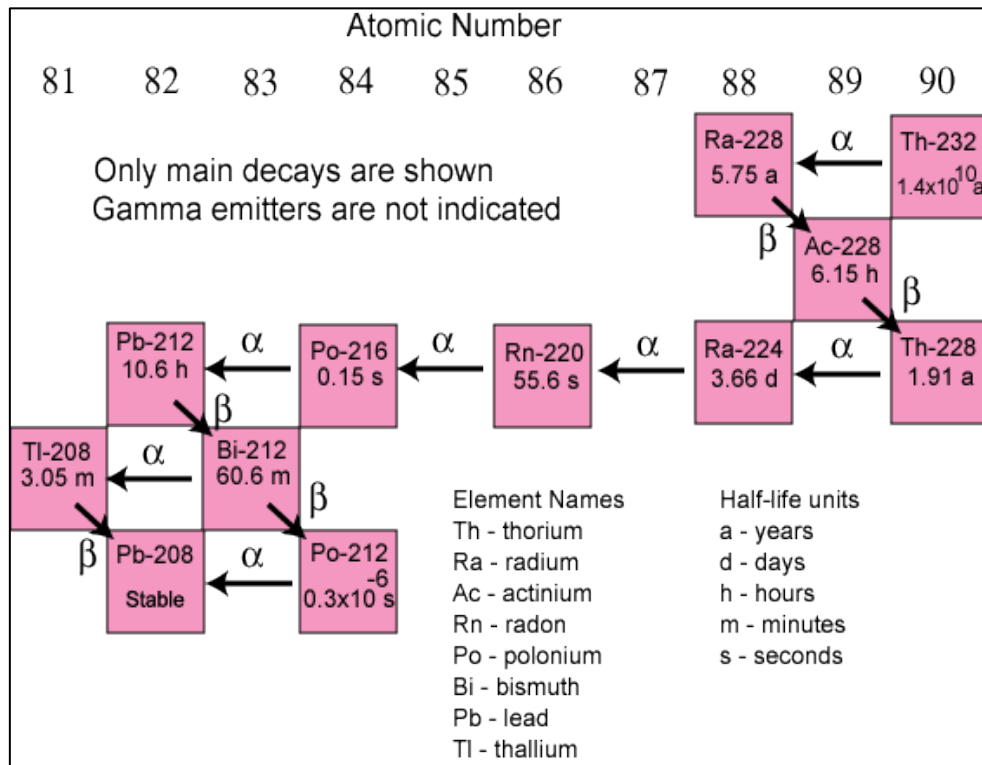


Figura 2-1: Cadena de decaimiento del torio-232.
Fuente: Adams J., 1970, p.257.

1.4.2. La radioactividad en las fuentes subterráneas de agua

Los principales procesos que suministran isótopos radiactivos a las aguas subterráneas implican disolución y lixiviación según Barberá y Abrisqueta (2018, p.1). También juega un papel importante el proceso de retroceso, un efecto puramente físico que opera a microescala. Durante la emisión de radiación ionizante, el núcleo de un elemento radiactivo está sujeto a retroceso, lo que puede transferir el producto resultante directamente al espacio poroso o puede perder su posición dentro de la estructura cristalina de un mineral, facilitando su posterior eliminación de la matriz de la roca, por lixiviación o disolución según Peralta (2015, p.67). Además de la desintegración radiactiva, los radionucleidos pueden eliminarse del agua subterránea mediante una variedad de procesos físicos o químicos como el intercambio iónico, la coprecipitación o la sorción, que se activan en respuesta al estado químico cambiante del agua subterránea (por ejemplo, condiciones redox) o se imponen en la solución durante el tratamiento de aguas subterráneas (Dinh Chau et al., 2011, p.454).

Tabla 2-1: Contenidos de U, Th y K en los principales tipos de rocas

Tipo de Rocas	U (ppm)	Th (ppm)	K(%)
Corteza superior (valores medios)	2.7	9.6	2.1
Rocas ígneas / metamórficas			
Ácido ígneo	2.2-6.1	8-33	
Ígneo Básico	4.0	13	2.8
Ígneo Ultrabásico	1.1	3.9	1.4
Ígneo intermedio	0.03	2.0	4
Granito	<0.015	<0.05	
Basaltos	1.5	4.4	2
Gneis	4.8	17	3.34
Rocas sedimentarias	1-13	17.1-139	1.4-6.4
Sedimentos no consolidados	0.6	2.2	0.83
Caliza	0.1-1	0.2-5	
Dolomita	2.0	5-27	
Arenisca	0.8-9.4	12.7-56.6	2.5-5.5
Pizarra Negra			
Lutitas asociadas al petróleo	1.7	3.3	2.0
Depósitos de fosfato	1.3	0.5	0.3
	-2	0-2.4	
	0.03-2		
	0.5-5.1		I.I
	0.68-3.1	1.7-11.6	0.03-2.39
	5-250	13	2.8
	1.7-6.6	9.5-15.1	1.4-3.96
	10-56		2.5
	más de 120	1-5	
	50-300	1-5	
	77-143	1.74-7	1.21-12

Fuente : Dinh Chau et al. 2011, p.418.

La Tabla 1-2 resume los datos de la literatura disponible sobre los contenidos de U, Th y K en los principales tipos de rocas (ígneas, metamórficas, sedimentarias) que constituyen formaciones portadoras de agua en la gran mayoría de los sistemas de aguas subterráneas activas con niveles de concentración de ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po y ^{40}K en sistemas de aguas subterráneas que consisten en tipos específicos de rocas. Es evidente que se observan amplios rangos de concentraciones de actividad de los radioisótopos en cuestión.

Para un tipo de roca dado (por ejemplo, granito, arenisca), pueden variar desde los valores por debajo de los límites de detección recientemente alcanzables (fracción de mBq.l^{-1}) hasta varios Bq.l^{-1} como dice Dinh Chau et al., (2011, p.420) En general, no existe una relación aparente entre el tipo de roca o sedimento que constituye la formación acuática y los niveles de concentración de actividad observados de los radionucleidos analizados.

1.4.2.1. Radionucleidos naturales en precipitación

Las concentraciones de radionucleidos naturales en las precipitaciones son generalmente bajas. Contenido de tritio en las precipitaciones en la mayor parte del mundo han vuelto ahora a niveles naturales. Actividades típicas de tritio observadas hoy en día en latitudes medias continentales, las precipitaciones son del orden de 1 Bq.l^{-1} . Los valores más bajos se registran en los trópicos ($0.1\text{--}0.5 \text{ Bq.l}^{-1}$). En el agua subterránea, ocasionalmente se pueden encontrar concentraciones más altas de tritio, hasta varios Bq.l^{-1} . Proviene de niveles relativamente altos de tritio en las precipitaciones en la década de 1960 (hasta varios cientos de Bq.l^{-1}), como resultado de las pruebas de bombas nucleares atmosféricas (Aldaba, 2013, p.18).

Debido a su promedio de presencia relativamente corta (12,32 años), el contenido de tritio en las aguas subterráneas recargadas antes de la era de las bombas es hoy en día cercano a cero. También se pueden encontrar en la precipitación cantidades minúsculas de otros radioisótopos cosmogénicos producidos en la atmósfera, como ^{14}C , ^{22}Na y ^7Be , pero sus niveles de concentración de actividad son mucho más bajos que los del tritio (Ferreira Maltez y Pablo, 2016, p.5) Melintescu et al., (2018, p. 12), reportan que el radón-222, el producto de desintegración gaseoso de radio-226, se libera de los suelos y está presente en la troposfera inferior, con actividades típicas que van desde unas pocas hasta algunas decenas de Bq.m^{-3} . Debido a que el radón-222 es altamente soluble en agua, su contenido en la precipitación puede alcanzar valores relativamente altos, hasta cientos de Bq.l^{-1} .

Los productos de larga duración de la descomposición del radón-222 en la atmósfera (^{210}Po y ^{210}Pb) también pueden disolverse en la precipitación y transportarse al suelo como deposición húmeda. Las concentraciones de actividad típicas de plomo-210 en la precipitación son del orden de decenas a cientos de mBq.l^{-1} , con la relación de actividad $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ que varía en el rango entre $\approx 0,1$ y $0,3$. (Mogrovejo y Ávila, 2018, p.18).

Las concentraciones de actividad de otros radionucleidos naturales de interés, como ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra y ^{228}U presentes en la precipitación, son generalmente del orden de mBq.l^{-1} o menos y exhiben una gran variabilidad temporal y espacial. Se cree que la principal fuente de esos radionucleidos en la precipitación es la resuspensión de las partículas del suelo en el aire debido a la acción del viento (Melintescu et al. 2018, p.26).

1.4.2.2. Zona insaturada

Los sistemas de aguas subterráneas se reponen principalmente mediante la infiltración de agua de lluvia a través de la zona no saturada. La zona insaturada es un sistema complejo de tres fases donde las fases sólidas coexisten con las fases líquida y gaseosa. El agua de lluvia se filtra por la

fuerza de la gravedad hacia el nivel freático, ganando constituyentes disueltos a través de interacciones físicas y químicas con la matriz sólida y la fase gaseosa presente en el espacio poroso. La profundidad de la zona no saturada puede variar ampliamente, desde varios centímetros hasta cientos de metros. En consecuencia, los tiempos de viaje del agua que se infiltra hasta la zona saturada de los acuíferos pueden variar de semanas a decenas y cientos de años. Los radionucleidos naturales ingresan al agua infiltrada a través de varios mecanismos, como la lixiviación y disolución de las fases minerales, la difusión del radón-222 de los granos minerales y la disolución en el agua de los poros, el retroceso de los productos secundarios durante la descomposición de los elementos radiactivos unidos en la matriz sólida (por ejemplo, ^{226}Ra , ^{234}U) (Natural radioactivity in groundwater—a review., 2011). El radiocarbono (^{14}C) ingresa al agua subterránea principalmente a través de la disolución del gas CO_2 del suelo que se origina en la respiración de las raíces y la descomposición de la materia orgánica en el suelo. Con la excepción de ^{222}Rn y ^{14}C , los niveles de radionucleidos naturales que ingresan al agua infiltrante son en general significativamente más bajos que los que se encuentran en la zona saturada. La concentración de actividad de ^{14}C en el agua que se infiltra generalmente es del orden de 0.01–0.02 Bq.l^{-1} , dependiendo de la presión parcial del CO_2 del suelo y la disponibilidad de la fase carbonato (Moreira, 2018, p.37).

El mayor contribuyente a la radiactividad natural del agua infiltrada es el ^{222}Rn , cuyos niveles pueden alcanzar varios cientos de Bq.l^{-1} . La lixiviación de radionúclidos de los suelos se ve fuertemente afectada por procesos como el flujo preferencial, el transporte con partículas coloidales, la sorción y desorción, el intercambio iónico, la complejación y la absorción biológica. Los esfuerzos de modelización indican que la liberación de radionucleidos naturales de la zona insaturada es un proceso complejo y muy variable, tanto en el espacio como en el tiempo (Guapizca, 2018, p.41).

1.4.2.3. Zona saturada

Por debajo del nivel freático, el agua subterránea interactúa con la matriz sólida del acuífero. La composición química y el contenido de radiactividad evolucionan a lo largo de las direcciones generales del flujo de agua subterránea, respondiendo a parámetros físico-químicos cambiantes como pH, Eh y temperatura, así como a la litología variable de la matriz del acuífero. En las siguientes secciones, se analizarán con cierto detalle los principales parámetros que controlan los niveles de concentración de actividad de radionucleidos específicos en la parte saturada de los sistemas acuíferos (Melintescu et al., 2018, p.31).

1.4.3. *Isótopos de radio*

El radio es un elemento químico de símbolo Ra y número atómico 88. Es el sexto elemento del grupo 2 de la tabla periódica, también conocido como metales alcalinotérreos. El radio puro es de color blanco plateado, pero reacciona fácilmente con el nitrógeno (en lugar del oxígeno) al exponerse al aire, formando una capa superficial negra de nitruro de radio (Ra_3N_2). Todos los isótopos del radio son altamente radiactivos, siendo el isótopo más estable el radio (^{226}Ra), que tiene una vida media de 1600 años y se desintegra en gas radón (específicamente el isótopo radón ^{222}Rn). Cuando el radio se desintegra, la radiación ionizante es un subproducto que puede excitar las sustancias químicas fluorescentes y causar radioluminiscencia (Tolentino, 2020, p.34).

El radio es el más pesado del grupo de los metales alcalinotérreos. De los cuatro isótopos radiactivos del radio (^{223}Ra , ^{224}Ra , ^{226}Ra , ^{228}Ra), dos (^{226}Ra , ^{228}Ra) son importantes en los sistemas de aguas subterráneas. Pertenecen a dos series de desintegración diferentes: ^{226}Ra (T_{1/2}= 1600 años) pertenece a la serie de desintegración ^{238}U , mientras que ^{228}Ra (T_{1/2}= 5,75 años) es un producto resultante de ^{232}Th . El radio en rocas y depósitos sedimentarios aparece principalmente como compuestos de óxido o hidróxido. Se supone que el ion Ra^{2+} es la forma predominante de radio en un medio acuático. La presencia de isótopos de radio en las aguas subterráneas se rige por tres procesos principales: (i) lixiviación de rocas hospedantes, (ii) fenómenos de sorción/desorción controlados por parámetros físico-químicos del agua y (iii) el efecto de retroceso alfa. En consecuencia, la concentración de actividad de radio en el agua subterránea debería reflejar en cierta medida el tipo de rocas que albergan el sistema acuífero dado (Dinh Chau et al., 2011, pp.420-421).

Ya a principios de la década de 1980, se intentó establecer el vínculo entre las concentraciones observadas de isótopos de radio en las aguas subterráneas y contenido de uranio y torio en las rocas huésped. Se observaron concentraciones de actividad relativamente bajas de ^{226}Ra y ^{228}Ra (por debajo de 1 Bq.l^{-1}) en acuíferos alojados en rocas intrusivas como el gneis. En arenisca y granito meteorizado, se observaron concentraciones de actividad muy altas de ambos isótopos de radio, alcanzando en algunos lugares varios centenares de Bq.l^{-1} . Por el contrario, en los acuíferos alojados en formaciones sedimentarias de origen marino (piedra caliza, dolomita), se midieron contenidos de radio muy bajos en las aguas subterráneas, del orden de unos pocos mBq.l^{-1} (Chau et al., 2009, p. 32).

Los intentos de modelar las concentraciones observadas y los valores de actividad radio activa (AR) de los isótopos de radio en las aguas subterráneas (Moreira, 2018), confirman el importante papel de los fenómenos de adsorción/desorción, así como las escalas de tiempo del flujo de las aguas subterráneas. Las aguas poco profundas con un tiempo de residencia medio significativamente menor que la vida media de ^{226}Ra generalmente deben exhibir una actividad

radioactiva de $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ menor que 1. En contraste, en aguas subterráneas antiguas, el $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ de la actividad radioactiva puede exceder 1 porque ^{226}Ra se puede lixiviar más fácilmente en la roca huésped en comparación con ^{228}Ra . Esta preferencia se debe al hecho de que ^{226}Ra se forma después de tres desintegraciones alfa consecutivas, en comparación con una desintegración alfa de ^{228}Ra . En sistemas de agua circular caracterizados por una desorción relativamente baja y un coeficiente de adsorción alto, como aguas con alto contenido de sulfato, las concentraciones de isótopos de radio son relativamente bajas, con una actividad radioactiva de $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ menor que 1. Por el contrario, los coeficientes de adsorción bajos y de desorción altos conducen a un contenido de radio relativamente alto y una actividad radioactiva de $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ mayor que 1 (Dinh Chau et al. 2011, p. 430).

En aguas relativamente jóvenes ricas en oxígeno, el uranio disuelto permanece en la solución, mientras que el contenido de ^{226}Ra es generalmente bajo porque aún no se ha alcanzado el equilibrio secular para este isótopo en el sistema roca-agua. Las condiciones reductoras, características de las aguas subterráneas antiguas, imponen la eliminación de uranio de la solución, mientras que un mayor tiempo de residencia del agua favorece concentraciones más altas de ^{226}Ra . Este factor de tiempo también explica el aparente aumento de la concentración de radio con la profundidad de las formaciones acuíferas observado en varios estudios de campo (Barberá & Abrisqueta, 2018, p.23; Muñoz-Pedrerros, 2004, p.12; Dinh Chau et al. 2011, p.30).

1.4.4. Isotopos de radón

El radón (Rn), es un elemento químico, un gas radiactivo pesado del Grupo 18 (gases nobles) de la tabla periódica, generado por la desintegración radiactiva del radio. El radón es un gas incoloro, 7.5 veces más pesado que el aire y más de 100 veces más pesado que el hidrógeno. El gas se licua a $-61,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y se congela a $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$. Al enfriarse aún más, el radón sólido se ilumina con una luz amarilla suave que se vuelve roja anaranjada a la temperatura del aire líquido ($-195\text{ }^{\circ}\text{C}$) (González, 2017, p.13).

De los tres isótopos naturales del radón (^{219}Rn , ^{220}Rn , ^{222}Rn), solo el ^{222}Rn tiene importancia en los sistemas de aguas subterráneas. Es un producto de desintegración de ^{226}Ra que se desintegra a ^{218}Po con una vida media de 3,823 días. Como gas inerte, el radón muestra una alta movilidad, también en entornos subterráneos. El radón-222 exhibe el mayor rango de concentración en las aguas subterráneas entre todos los radioisótopos naturales; se informaron concentraciones de actividad desde una fracción de $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ hasta cientos de $\text{kBq}\cdot\text{l}^{-1}$ (Hidrología isotópica, herramienta nuclear para la gestión sostenible del recurso hídrico., 2015). Los niveles de ^{222}Rn en el agua subterránea están controlados principalmente por el término fuente, es decir, la concentración de actividad de ^{226}Ra en la roca anfitriona y su distribución dentro de la matriz de la roca. Igualmente,

importantes son las características mineralógicas y petrológicas de la roca huésped, en particular la extensión del contacto roca-agua y la morfología de la fractura (Natural radioactivity in groundwater—a review., 2011). Aunque la vida media relativamente corta del radón limita su transporte espacial en las aguas subterráneas, el radón todavía puede viajar distancias relativamente grandes bajo tierra a través de fallas y fisuras.

1.4.5. Isotopos de torio

El torio es un elemento químico metálico débilmente radiactivo con el símbolo Th y número atómico 90, es plateado y se vuelve negro cuando se expone al aire, formando dióxido de torio; es moderadamente blando, maleable y tiene un alto punto de fusión. El torio es un actínido electropositivo cuya química está dominada por el estado de oxidación +4; es bastante reactivo y puede encenderse en el aire cuando se divide finamente. (Rubbia, 2016, p.24).

Todos los isótopos de torio conocidos son inestables. El isótopo más estable, ^{232}Th , tiene una vida media de 14.05 mil millones de años, o aproximadamente la edad del universo; se desintegra muy lentamente a través de la desintegración alfa, comenzando una cadena de desintegración llamada serie de torio que termina en ^{208}Pb estables. En la Tierra, el torio y el uranio son los únicos elementos significativamente radiactivos que todavía se encuentran naturalmente en grandes cantidades como elementos primordiales. Se estima que el torio es tres veces más abundante que el uranio en la corteza terrestre, y se refina principalmente a partir de arenas de monacita, como subproducto de la extracción de metales de tierras raras.(Carter et al., 2019, p.51).

En ambientes acuáticos, el torio ocurre solo en estado de oxidación +4. Las concentraciones típicas de este elemento en las rocas de la corteza suelen ser inferiores a ≈ 100 ppm, con valores más altos en las descargas de rocas ígneas y metamórficas. En aguas ácidas, el torio forma complejos de fluoruro, mientras que a pH mayor que 8 se presenta en forma de $\text{Th}(\text{OH})_4$. A pH menor que 3,5 el torio se presenta principalmente como ion Th^{+4} . A valores de pH elevados, forma hidróxidos, que tienen tendencia a precipitar. El torio se adsorbe fuertemente en hidróxidos de hierro y sustancias húmicas. Por tanto, el torio está prácticamente ausente en las aguas subterráneas; su concentración media es inferior a $1\mu\text{g.l}^{-1}$ y es independiente de las condiciones redox .(Dinh Chau et al., 2011, p.20).

1.4.6. Normativa Internacional de concentraciones de isotopos radiactivos.

La radiactividad es un fenómeno y las fuentes naturales de radiación son características del medio ambiente. La radiación y las sustancias radiactivas tienen muchas aplicaciones beneficiosas, que van desde la generación de energía hasta los usos en la medicina, la industria y la agricultura. Los

riesgos de radiación para los trabajadores, el público y el medio ambiente que puedan derivarse de estas aplicaciones deben evaluarse y, si es necesario, controlarse. Por tanto, actividades como los usos médicos de las radiaciones, la explotación de instalaciones nucleares, la producción, transporte y uso de material radiactivo y la gestión de residuos radiactivos deben estar sujetas a normas de seguridad.(Muñoz, 2018, p.30).

Las regulaciones de seguridad trascienden las fronteras nacionales, y la cooperación internacional sirve para promover y mejorar la seguridad a nivel mundial mediante el intercambio de experiencias y la mejora de las capacidades para controlar los peligros, prevenir accidentes, responder a emergencias y mitigar las consecuencias perjudiciales. Los Estados tienen la obligación de presteza y cuidado, y se espera que cumplan con sus compromisos y obligaciones nacionales e internacionales. Las normas internacionales de seguridad brindan apoyo a los estados para que cumplan sus obligaciones en virtud de los principios generales del derecho internacional, como los relacionados con la protección del medio ambiente. Las normas de seguridad internacionales también promueven y garantizan la confianza en la seguridad y facilitan el comercio y el comercio internacional libre de contaminación radiactiva.Existe un régimen mundial de seguridad nuclear que se mejora continuamente. Las normas de seguridad de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA), que respaldan la aplicación de los instrumentos internacionales vinculantes y las infraestructuras de seguridad nacionales, son una piedra angular de este régimen mundial. Las normas de seguridad del OIEA constituyen una herramienta útil para que las partes involucradas evalúen su desempeño en el marco de estos convenios internacionales (OIEA 2020, párr.12).

De acuerdo con la OMS (2008). No se han impuesto valores referenciales para radionucleidos individuales en el agua de consumo, sin embargo, se utiliza un sistema basado en análisis de radioactividad alfa y beta total presente en el agua de consumo. La OMS, no reporta niveles peligrosos de radioactividad en aguas de consumo por lo que asegura que no existen riesgos inmediatos para la salud en comparación con los riesgos existentes en relación con emergencias originadas por la liberación accidental de sustancias radioactivas al medio ambiente.

Los niveles de referencia de radioactividad del agua de consumo recomendados por los organismos vinculados al riesgo por exposición y sus consecuencias para la salud, indican que la radiación ionizante emitida por sustancias químicas presentes en el agua puede ocasionar peligros radiológicos, pero no con consecuencias significativas para la salud pública, por lo que la contaminación del agua por radiactividad debe evaluarse juntamente con la exposición de otras fuentes El consenso de la OMS, (2008) y la UNSCEAR (2008), es que la dosis de referencia (DR) recomendada es igual a 0,1 mSv por el agua consumida en un año, esta dosis alcanza el 10 % del nivel de alerta recomendado por los dos organismos citados para realizar una intervención,

este nivel también equivale al 10 % del límite de dosis al que deben exponerse las personas, esta norma es aceptada en la mayoría de países asociados a la OMS. (OMS, 2003, p.14).

Este coeficiente de radiación se considera bajo, debido a que los efectos estocásticos provocados por la radiación que son el cáncer mortal, cáncer no mortal y efectos hereditarios graves para la población es de $7,3 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$. Si este coeficiente se multiplica por una DR de 0,1 mSv de exposición anual por el agua de consumo se obtiene un valor de riesgo de 10^{-4} que se considera infinitamente pequeño frente a otros riesgos para la salud (OMS, 2003, p.18).

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Descripción del área de estudio

La investigación consistió en monitorear pozos y manantiales del suministro de agua potable de los cantones Riobamba, Guamote, Alausí y Chunchi con el fin de determinar las concentraciones de ^{226}Ra , ^{222}Rn y ^{220}Rn usando la técnica emanométrica. A continuación, se presenta una descripción general de los cantones.

2.1.1. *Cantón Chunchi*

El cantón Chunchi se ubica en la parte sur occidental de la provincia del Chimborazo, está limitada por el cantón Alausí al norte, este y occidente y por la provincia de Cañar al sur, tiene una superficie territorial de 274,9 Km², la altitud va desde los 1500 msnm en la cuenca baja del río Chanchan hasta los 4800 msnm en los páramos de Launag. Está conformada políticamente por cinco parroquias: Chunchi Matriz como cabecera cantonal, Compud, Capsol, Gonzol, y LLagos. (GAD Chunchi, 2019, p.15).

La población del cantón Chunchi de acuerdo con el último censo de población y vivienda (INEC, 2010) fue de 12686 habitantes con una proyección al 2020 de 12795 habitantes, con un incremento de 0,85 %, esto debido a alto nivel de migración existente, el principal problema de salud es la desnutrición crónica con una prevalencia del 65 % de los pacientes atendidos. La vocación productiva del cantón es fundamentalmente agropecuaria, por lo tanto, la mayor parte del suelo se utiliza para la siembra de productos alimentarios y de pasto para el manejo de ganado lechero. Con respecto al agua, el PDOT del GADM de Chunchi (2019) asegura que en el territorio se asientan 10 microcuencas, las mismas que se constituyen en el recurso hídrico de la zona, se han establecido 420 concesiones de agua con un caudal total de aproximadamente 725,23 l/s, recurso que es utilizado para diferentes usos entre ellos el riego de 2760 hectáreas de cultivos. El agua para consumo humano se toma de dos fuentes Bacún y Sagúan que abastecen a la red pública con el 40,48 %, el 44,45 % se abastece de ríos, vertientes, acequias o canales de forma directa, del 15,07 % restante no se sabe con certeza cuales son las formas de acceder al agua de consumo. Bacún es una vertiente ubicada en Ramos Loma, el agua fluye de un tubo plástico, que se encuentra en una de las paredes de un tanque construido de cemento (Ver Anexo 1 sub anexo 1.1). Esta fuente a su vez se abastece del agua proveniente de varias vertientes, situadas al oriente

de la población de Chunchi en los páramos de San Pablo de Bacún, según información proporcionada por la EPMAPACH, estas vertientes son: Artesa, Carbón Norte, Carbón Norte 2, Carbón Centro, Carbón Sur, Túnel de Cushi, Aro, Túnel del Aro, Cabestrillo 2, 3 y 4. El agua se distribuye desde el tanque por tuberías de 4 pulgadas y tiene un recorrido de 7 km hasta la planta de tratamiento.

Sagúan es un abastecimiento superficial que obtiene el agua directamente del cauce del río Chaullabamba, según información proporcionada por un funcionario del municipio, el agua se capta con tuberías de 2 pulgadas y tiene un recorrido de 15 km hasta llegar a la Planta Central de tratamiento. En la Planta Central confluyen las aguas provenientes de las fuentes de Bacún y Sagúan, aquí se realiza el proceso de potabilización con filtros de arena de río, bandejas de aireación con carbón activado para finalmente pasar a un clarificador y se deposita en tres tanques reservorios desde donde se distribuye a la población (Gómez & Landy, 2019, p.7).

En el Anexo 1 (Sub-Anexo 1-1), se muestra fotografías de las fuentes Bacún y Sagúan, donde se puede observar el origen subterráneo y superficial respectivamente.

La Figura (1-2) presenta las coordenadas geográficas de las fuentes de agua estudiadas en el cantón Chunchi.

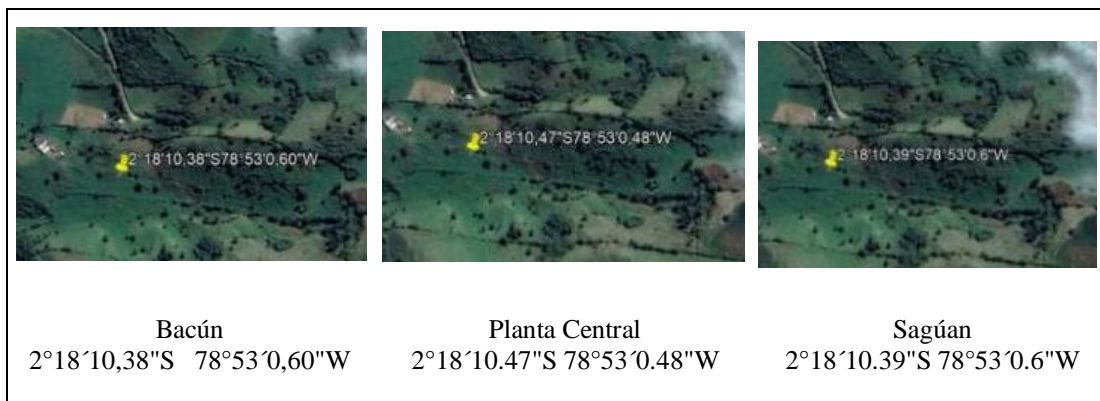


Figura 1-2: Ubicación de las fuentes de agua usadas para consumo humano en el cantón Chunchi.

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021.

2.1.2. *Cantón Alausí*

El Cantón Alausí se ubica al sur de la provincia del Chimborazo, con una superficie territorial de 1658,33 Km² con una altitud que va desde 560 msnm hasta los 4640 msnm, está limitada al norte por los cantones Pallatanga y Guamote, y la provincia de Bolívar; al sur con las provincias de Azuay, Cañar y Morona Santiago y el cantón Chunchi; al este con la provincia de Morona Santiago; y al oeste con la provincia de Bolívar y el cantón Cumandá. Políticamente está conformada por 10 Parroquias: 1 urbana y 9 rurales. La Parroquia urbana es Alausí Matriz y las

rurales son Achupallas, Guasuntos, Huigra, Multitud, Pistishí, Pumallacta, Sevilla, Sibambe y Tixán (PDOT GADM Alausí, 2019). La población del cantón Alausí de acuerdo con el censo de población y vivienda fue de 44089 habitantes según el INEC (2010, párr 3), la proyección para el 2020 fue de 45054 habitantes con un crecimiento de 2,14 %. En salud, el principal problema es la insuficiencia respiratoria aguda con un porcentaje de 31,37 % de mortalidad. En Alausí la mayor parte de su territorio está destinado a la siembra de productos alimentarios, especialmente cereales y pastos utilizados en la crianza y manejo de ganado de carne y lechero. En lo que se refiere al manejo del agua, Alausí posee tres grandes cuencas hidrográficas, la del río Guayas, el río Pastaza y el río Santiago de donde se desprenden las microcuencas de Yaguachi, del río Chambo y del río Upano, es desde este cantón, específicamente de los páramos de la parroquia Achupallas donde se acumula el agua que alimenta la represa del río Paute para la generación de energía. El principal uso del agua es el riego y el consumo humano, siendo las principales fuentes: Aypud, Casual, Chitaquies, Gampala, Plaza de Rastros y Tixán.

Aypud es un suministro de agua que está conformada por la captación de 5 vertientes, ubicadas al noroccidente de la Ciudad de Alausí, la más grande de ellas se le conoce como Aypud-Guitig, las otras cuatro no tienen un nombre asignado, desciende en una sola conducción a los tanques de reservorio de la planta de tratamiento de agua antigua, construida de hormigón armado con una capacidad de tratamiento de 40 l/s. Está compuesta de 4 sedimentadores o decantadores, de 4 filtros lentos y un sistema de desinfección con hipoclorito de sodio, aporta con el 40 % del agua requerida por la ciudad de Alausí (Llangarí , 2019, p.23; GAD Alausí, 2019, p.2).

Gampala, es una vertiente de agua superficial que se conecta a la tubería de captación de Aypud aportando con 1,25 l/s.(GAD Alausí, 2019, p.2).

Casual, Chitaquies y Plaza de Rastro, son tanques reservorios para la distribución de agua ubicados en distintas partes de la ciudad, se alimentan de los suministros de Aypud y Gampala, los tanques de Casual y Plaza de Rastro abastecen de agua al camal Municipal, los dos forman parte de la red interconectada y Chitaquies es independiente. Estos tanques cuentan con rebosaderos, válvulas compuertas para llenado y vaciado. Los tanques que se encuentran a cotas más bajas y que están interconectados con los principales tienen un sistema de control de niveles con válvulas automáticas. (GAD Alausí, 2019, p.2).

Tixán, es un suministro de agua que se alimenta por captaciones de las vertientes superficiales Chaguiña, Atalaya y Laguna de Shucos en los páramos de Shucos, al norte de la población de Alausí, aportando con el 60 % del líquido a las dos plantas de tratamiento (antigua y nueva) y de distribución de agua para la ciudad de Alausí. Las especificaciones de la planta antigua ya fueron mencionadas en la descripción de la fuente de Aypud. La planta “nueva”, es de tipo compacta con capacidad de tratamiento de 30 l/s, está construida de lámina metálica y cumple con los procesos de mezcla rápida, floculación, sedimentación, filtración y desinfección (GADM de Alausí, 2019;

Llangarí, 2019). Las fuentes de agua para consumo humano del cantón Alausí se pueden observar en el Anexo 1 (Sub anexo 1-2).

La Figura (2-2) muestra las coordenadas geográficas de las fuentes de agua monitoreadas en el cantón Alausí.

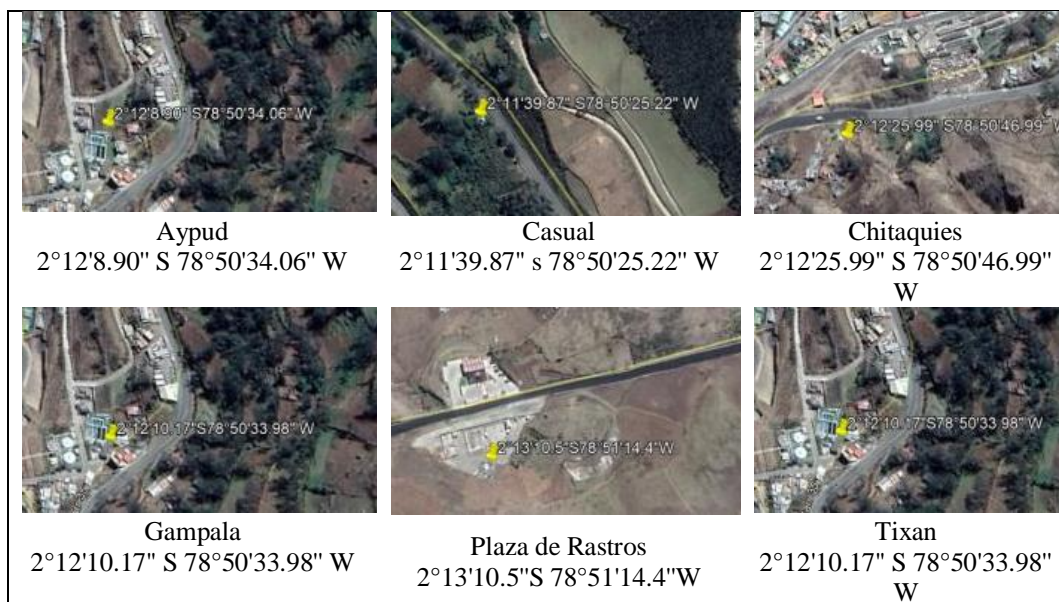


Figura 2-2: Ubicación de las fuentes de agua destinadas para el consumo humano en el cantón Alausí.

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley (2021).

2.1.3. *Cantón Guamote*

El cantón Guamote se encuentra ubicado en el centro de la provincia de Chimborazo hacia el flanco oriental, con una superficie territorial de 1221,80 km², limita al norte con los cantones Riobamba y Colta, por el oeste y sudoeste con el cantón Pallatanga, al sur con el cantón Alausí y al este con la provincia de Morona Santiago, su rango de altitud es de 2600 msnm en la parte baja hasta los 4500 metros en el páramo. El cantón Guamote está políticamente estructurado por tres parroquias Guamote Matriz como cabecera cantonal, Palmira y Cebadas. La población del Cantón Guamote de acuerdo con el censo de población fue de 45153 habitantes (INEC, 2010), con una proyección de 58291 habitantes para el 2020. En salud, el principal problema es la alta tasa de desnutrición infantil que alcanza un promedio de 54,83 %..(GAD Guamote, 2019, p.2).

Guamote es agropecuario, se siembran productos típicos de la sierra en especial tubérculos (papa, melloco, ocas y mashua) y cereales (quinua, trigo y cebada). Una parte del territorio de cultivo se destina a pastizales para la crianza de ganado bobino de leche y ovino para la extracción de lana. Es muy común la crianza de especies menores como cuyes, conejos y aves

El Cantón Guamote forma parte de las grandes cuencas hidrográficas de los ríos Pastaza, Guayas y Santiago, con la presencia de 36 afluentes que forman subcuencas y microcuencas. El agua para el consumo humano en el 41,60 % es potable y en el 47,40 % es agua entubada provenientes de fuentes de agua contaminadas por lo que se evidencia un alto problema relacionado a la calidad de agua que se utiliza en el cantón. Los principales acuíferos de donde se toma el agua para consumo humano de la cabecera cantonal de Guamote son: Ambato Poguio, Chacaza Matipanga y Chipo Chico..(GAD Guamote, 2019, p.2).

Ambato Poguio y Chipo Chico, el agua de estos suministros es superficial y se originan en los páramos de Guamote. En la planta de captación los tanques de reservorio se encuentran separados por apenas cinco metros, aportando Ambato Poguio con 7,14 l/s y Chipo Chico con 2,44 l/s, de acuerdo con los delegados del GADM. Guamote, las aguas de las dos fuentes se recolectan en cisternas para después ser sometidas a un tratamiento de purificación.

Chacaza Matipanga, es un suministro de agua proveniente de vertientes superficiales formadas en los páramos aledaños a la población de Guamote Matriz. La planta de captación de San Juan Alto es actual, tanto las tuberías como los tanques de reservorio se encuentran en excelentes condiciones, el agua recibe un tratamiento por sedimentación y cloración. Fotografías de estas fuentes se presentan en el Anexo 1 (Sub anexo 1-3). (Alcoser, 2014, p.16; GAD Guamote, 2019, p.2).

La Figura (3-2) muestra las coordenadas geográficas de los pozos de agua subterránea, usada como agua doméstica en el cantón Guamote.



Figura 3-2: Ubicación de los acuíferos que abastecen de agua potable al cantón Guamote.

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021.

2.1.4. Cantón Riobamba

El cantón Riobamba se encuentra ubicado al nororiente de la provincia de Chimborazo, tiene una extensión de 99878 km² está limitada al norte por los cantones Guano, Penipe y Chambo, al sur por los cantones Colta y Guamote, al este por la provincia de Bolívar y al oeste por el cantón Chambo y la provincia de Pastaza. La estructura política del cantón Riobamba está constituido por la ciudad de Riobamba como cabecera provincial y cantonal y 11 parroquias Rurales San Juan, Calpi, Lican, San Luis, Cacha, Punin, Licto, Flores, Pungala, Cubijies y Quimiag. Los

rangos altitudinales del cantón son de 2500 metros en las estribaciones orientales a los 5300 en los páramos. (GAD Riobamba, 2019, p.3).

De acuerdo con el censo de población (INEC, 2010), los habitantes del cantón Riobamba llegaron a 225741, con una proyección al 2020 de 264048 habitantes, esto es un incremento de 14,51 %, el más alto índice de crecimiento de toda la provincia. Al igual que en todos los cantones el principal problema de salud es el alto índice de desnutrición infantil que alcanza al 17,16 % en promedio. (GAD Riobamba, 2019, p.3).

En las parroquias rurales se cultiva una diversidad de productos y se siembra pastos para la crianza de ganado lechero fundamentalmente. Con respecto a la situación hidrográfica, el cantón Riobamba forma parte en la cuenca del Pastaza casi en la totalidad de su territorio, pero es parte de la cuenca del Guayas. El agua se distribuye para el riego y el consumo humano, a nivel rural el agua es entubada y a nivel urbano se consume agua potable. Las principales tomas para la ciudad de Riobamba son los siguientes: Abras, Estadio, Hierbas, La Huerta, Llio del 1 al 7, Maldonado, San Pablo y Servidores.

Abras, Estadio, Hierbas, La Huerta y Maldonado son pozos de agua subterránea que se encuentran en el perímetro urbano de la ciudad de Riobamba, la captación del agua se realiza con tubería de hierro y se almacena en pozos de cemento armado, la distribución se realiza utilizando bombas. (Muñoz, 2020, p.33).

Llio son siete pozos de agua subterránea, perforados en 1984, ubicados aproximadamente a 12 km al noroccidente de la ciudad de Riobamba, son producto de los deshielos del glaciar del nevado Chimborazo Seis pozos están en funcionamiento, Llio 3 no se encuentra habilitado. El agua se recolecta en cisternas y es movida utilizando bombas. (Coba, Guillaume & Rodríguez, 2015, p.55).

San Pablo, es un pozo artesiano, que se comenzó a utilizar en el año de 1912 como la primera fuente de agua entubada de distribución general en la ciudad de Riobamba, se encuentra a pocos metros del conjunto de captación Llio, tiene una estructura cerrada y el líquido se recolecta de unos 200 ojos de agua en una piscina. El flujo de agua se une a las cisternas de Llio. Con tubería de conducción, el agua de la fuente de San Pablo y Llio pasa a la planta de tratamiento "Aireadores" sitio en el que se realizan los procesos de aireación y desinfección del agua utilizando gas de cloro. El agua tratada es enviada a los tanques reservorios de El Carmen, La Saboya, El Recreo, San José de Tapi, Maldonado, Veranillo y Piscin, que abastecen a las ocho redes de distribución de la ciudad. La red de distribución Yaruquies se abastece de la captación del pozo El Estadio, que se encuentra en la parte baja de la población de Yaruquies, de donde sube por efecto de una línea de impulsión hasta los tanques de reserva que se encuentran en la parte alta, en donde se realiza la purificación y su distribución. (Muñoz, 2020, p.43).

El Anexo 1 de (sub anexo 1-4) muestra las fuentes de agua para consumo humano en el cantón Riobamba.

La Figura (4-2) presenta las coordenadas geográficas de los pozos y manantiales que abastecen de agua potable a un gran porcentaje de la población de la ciudad de Riobamba.

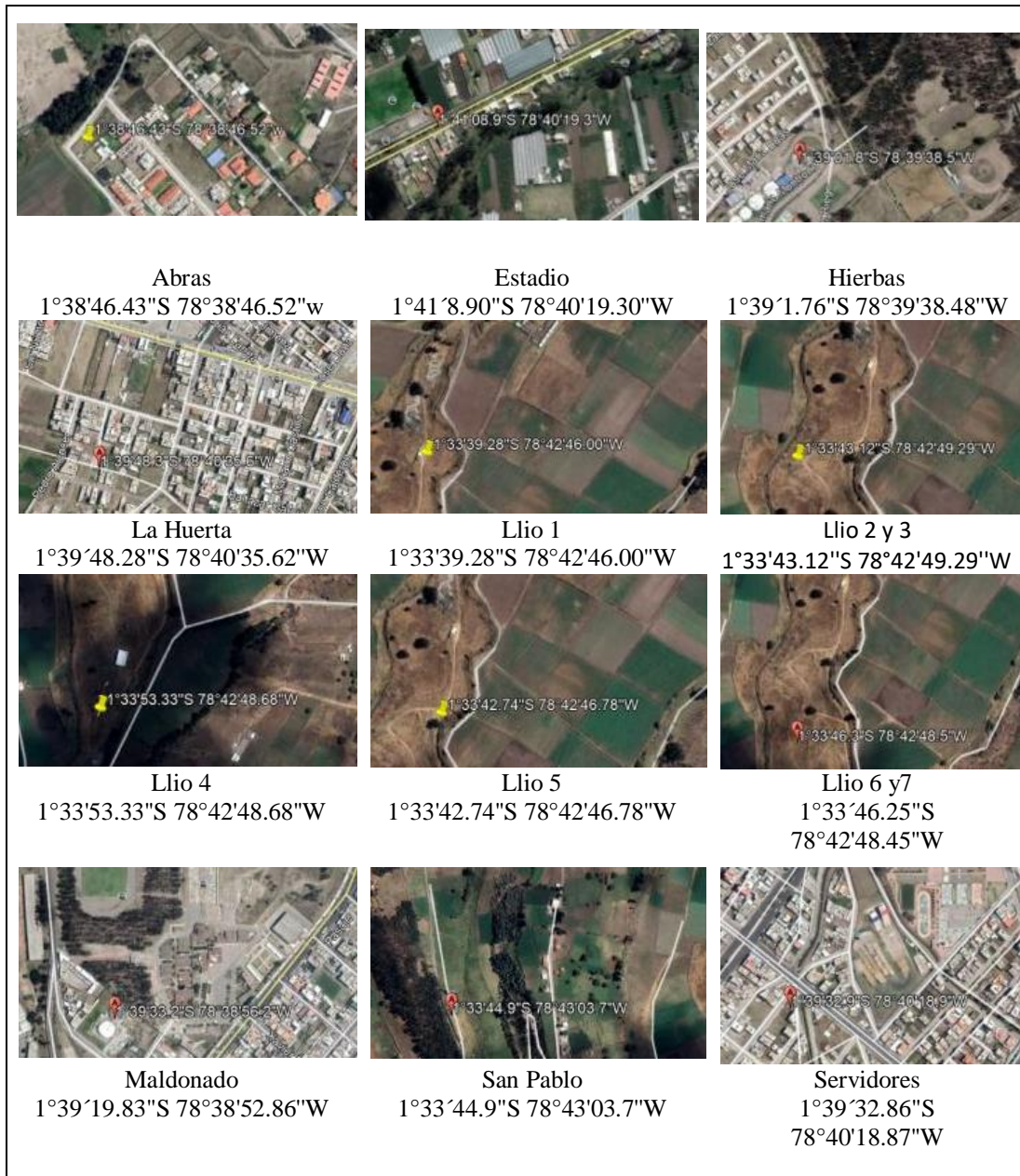


Figura 4-2: Ubicación de las fuentes que proporcionan agua potable a la mayor parte de la población de la ciudad de Riobamba.

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021.

2.2. Protocolo de Muestreo

El protocolo de muestreo utilizado en esta investigación consta de los siguientes ítems:

a) Información sobre las fuentes de agua

Se registró información sobre las fuentes de agua, en lo referente a coordenadas geográficas y características estructurales. Además, se monitoreó la temperatura del aire, temperatura del agua y la tasa de dosis de radiación Gamma, con la ayuda de un espectrómetro Atomtex AT6102, instrumento capaz de detectar algunos radioisótopos presentes en el ambiente. La medición de la tasa de dosis Gamma y detección de radionucleidos se realizó durante 5 minutos.

b) Recolección de las muestras de agua

Se recolectó el agua en botellas de vidrio (250ml) fabricadas por la DURRIDGE Company Inc., estos viales tienen una tapa especial que asegura la hermeticidad, evitando fugas de radón durante el transporte y almacenamiento de la muestra. En todos los casos se recolectó el agua en un recipiente plástico de 12 litros, con la menor turbulencia posible, inmediatamente se sumergió el vial en el fondo del recipiente y se cerró bajo el agua. La muestra de agua no debe tener burbujas.

c). Número de muestras

Se tomó tres muestras bajo las mismas condiciones experimentales, a fin de determinar la variabilidad de las concentraciones de radón en tres experimentos independientes

d). Etiqueta de la muestra

Se etiquetaron las muestras de agua con un código único (primera letra del cantón, dos primeras letras del nombre de la fuente y el número de muestra).

e) Transporte de las muestras

Se colocó las botellas de agua boca abajo en un cooler, a fin de que no incremente la temperatura del agua durante el traslado al laboratorio. Se recomienda colocar las muestras en un refrigerador hasta el momento de realizar la medición.

2.3. Técnica emanométrica con RAD7

La determinación de radio-226, radón-222 y radón-220 de las muestras de agua, recolectadas en los cantones Riobamba, Guamote, Alausí y Chunchi, se llevó a cabo con la técnica emanométrica, usando procedimientos independientes, detallados en las Secciones (2.4) y (2.5).

En términos generales, la emanometría implica la transferencia de ^{222}Rn o ^{220}Rn del agua al aire mediante un sistema de desgasificación comercial que aprovecha la predisposición del gas a migrar al aire si entra en contacto con él, el sistema sopla aire en la muestra de agua, a través de una piedra porosa, para producir numerosas microburbujas de aire que recogen el radón del agua y lo transfieren al aire, a través de un sistema de tubos el aire enriquecido con radón se lleva a un

detector específico. En este estudio, la configuración experimental consiste en un detector semiconductor (RAD7) fabricado y comercializado por la Durrige Company Inc. y un sistema desgasificación propio (RAD H₂O), formando un circuito cerrado (Ver Figura 5-2).

La técnica emanométrica es sensible a la eficiencia de desgasificación, pero presenta una ventaja en términos de tiempo, cada medición individual dura menos de una hora.

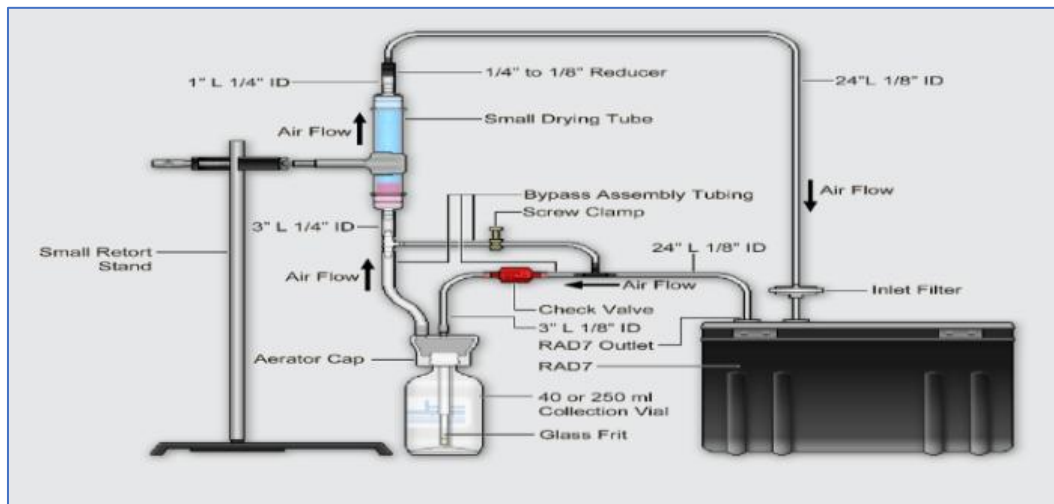


Figura 5-2: Configuración experimental de la técnica emanométrica usando el detector de radón y torón RAD7 y el accesorio RAD H₂O

Fuente: DURRIDGE Company Inc, 2012, p.8.

2.3.1. Descripción del detector de radón RAD7

El monitor RAD7 es marca Durrige, usado para la medición continua de radón de corto y largo plazo, cuantifica el radón en muestras de aire/suelo con el uso de accesorios específicos. El RAD7 utiliza un detector alfa de estado sólido, es un semiconductor de silicio que convierte la radiación alfa en una señal eléctrica, esto hace posible saber con exactitud qué isótopo (polonio-218, polonio-214, entre otros) produjo la radiación, así se logra distinguir el radón del torón. (DURRIDGE Company Inc, 2012, p.8).

Tabla 1-2: Funcionalidad del monitor RAD7

MODOS DE OPERACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Rastreo. - respuesta rápida y eficiente para la adecuada medición de radón. • Torón. - el torón y el radón se miden de manera simultánea e independiente entre sí. • Wat.- análisis automático de muestras de agua con ayuda del kit RAD H₂O.
ALMACENAMIENTO DE DATOS	Tiene una capacidad de almacenamiento de 1000 mediciones. El registro de la impresión también queda almacenado.

BOMBEO DE MUESTRAS	La bomba incorporada posee una velocidad de flujo de 800 ml/min.
IMPRESIÓN	Datos en formato largo, medio o corto, impresos después de cada ciclo. Estas impresiones incluyen el promedio y el espectro de la muestra.

Fuente: DURRIDGE Company Inc, 2012, p.8

Tabla 2-2: Especificaciones técnicas del RAD 7

EXACTITUD DE LAS MEDICIONES	<ul style="list-style-type: none"> • Precisión absoluta de +/-5 % • Humedad relativa de 0-100 %
SENSIBILIDAD NOMINAL	Modo normal.- 0,5 cpm/(pCi/l) 0,013 cpm/(Bq/m ³)
RANGO DE CONCENTRACIÓN DE RADÓN	<ul style="list-style-type: none"> • 0,01-20000 pCi/l • 0,4-750000 Bq/m³
RADIACIÓN DE FONDO INTRÍNSECA	0,005 pCi/l (0,2Bq/m ³) o menos, para la vida del instrumento.
RANGOS DE OPERACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura. - 32-113 °F ó 0-45 °C • Humedad.- 0-100 % sin condensación
RANGO DEL CICLO	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de ciclos controlables por el usuario de 1 a 99 ciclos por serie. • Duración del ciclo controlable desde 2 minutos hasta 24 horas.
SOFTWARE CAPTURE	<ul style="list-style-type: none"> • Compatible con Microsoft Windows XP y 7, Mac OS X. • Descarga de datos, conexión y ubicación automática del RAD7. • Representación gráfica del radón, del torón, de la temperatura y de la humedad a través del tiempo. • Corrección automática de la humedad. • Calculo y exhibición automática del radón en agua para el RAD AQUA.

Fuente: DURRIDGE Company Inc, 2012, p.8

2.3.2. Descripción RAD H₂O

El monitor RAD7 cuenta con un accesorio RAD H₂O, que permite medir radón y torón en agua, con un rango de concentración de 10-400000 pCi/l. El kit se compone de un soporte vertical, con una abrazadera de sujeción ajustable, vial de cristal de 250 ml o de 40 ml, según sea el caso para el que se vaya emplear, con tapones de tabique, un adaptador de grifo de plástico con tubera de vinil de 20 pulgadas, cuenta con un tubo de secado y un tubo de carbón activado, una frita de

vidrio con espaciadores, La tubería de conexión va del tubo del RAD7 a la tapa del aireador (24”), desde la tapa del aireador al tubo de secado (3”) y del tubo de secado al RAD7 (24). Al momento de conectar el accesorio RAD H₂O al equipo RAD7 se convierte básicamente en un sistema pre-calibrado y estándar para la desgasificación de agua, se puede trabajar con muestras de 40 ml y 250 ml. (DURRIDGE Company Inc, 2012, p.5).

2.4. Procedimiento para determinar la concentración de radón-222

El procedimiento para determinar la concentración de la actividad de radón-222 en las muestras de agua se realizó de la siguiente manera:

a) Purga del RAD7

Antes de realizar una medición, el RAD7 debe estar libre de radón y seco. La humedad relativa según las indicaciones del fabricante debe ser menor al 6 %, para lograr esto, se utilizó la unidad de secado de laboratorio conectada a la entrada del RAD7, la purga se realizó de 10 a 30 minutos.

b) Configuración del equipo

Antes de ensamblar el sistema, como muestra la Figura (5.2), se configuró el monitor con el protocolo Wat-250 (calcula la concentración de radón en muestras de agua de 250 ml) y se colocó la muestra de agua para cerrar el circuito. Es importante cuidar que la frita no toque el fondo de vidrio del vial.

c) Ejecución de la prueba

La prueba se inicia presionando ENTER. La bomba funciona durante cinco minutos, para airear la muestra y entregar el radón al RAD7. El sistema espera otros cinco minutos y entonces empieza a contar. Después de cinco minutos, imprime un informe breve y lo mismo ocurrirá durante tres períodos más de cinco minutos. Al final de la carrera (30 minutos después del inicio), el RAD7 imprime un resumen, que muestra la lectura promedio de radón de los cuatro ciclos contados, un gráfico de barras de las cuatro lecturas y un espectro acumulativo.

2.5. Procedimiento para determinar la concentración de radio-226 y torón (radón-220)

Luego de la medición de los niveles de radón-222 de las muestras de agua, las botellas de agua se cerraron herméticamente y se conservaron en refrigeración por 10 días. Transcurridos los 10 días se midió nuevamente la concentración de la actividad de radón-222, usando el procedimiento descrito en la Sección (2.4). La concentración de la actividad de radio-226 se evaluó utilizando la Ecuación 1-2. (Le et al., 2015, p.20).

$$C_{Ra} = \frac{K_C}{1 - e^{-\lambda_{Rn} \cdot t}} \cdot C_{Rn}$$

Ecuación 1-2: Ecuación de concentración de la Actividad del ^{222}Rn

Fuente: Le et al., 2015, p.20.

Donde:

C_{Rn} : concentración de la actividad del ^{222}Rn en el agua después de 10 días

λ_{Rn} : constante de decaimiento del ^{222}Rn

K_C : factor de corrección por fugas

C_{Ra} : concentración de la actividad de ^{226}Ra soluble en agua

t: tiempo en el que se alcanza el equilibrio secular (10 días)

Para el caso del *torón*, el RAD7 cuenta con una configuración estándar para detectar al mismo tiempo radón-222 y torón (radón-220) en la misma muestra. Esta configuración se activó para las muestras de 10 días y se obtuvo la concentración de torón impresa en el reporte de datos.

2.6. Cálculo de las dosis efectivas anuales por ingestión de radón-222 o radio-226

Las dosis efectivas anuales por ingestión de radón-222 o radio-226, se calculó con la Ecuación 2-2.

$$E_W = E \cdot V_W \cdot C_W$$

Ecuación 2-2: Dosis efectiva del radón

Fuente: Le et al., 2015, p.20.

Donde:

E_W : dosis efectiva anual de radón

E : factor de conversión de dosis por ingestión para radón-222, $1 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$

E : factor de conversión de dosis por ingestión para radio-226, $2.8 \times 10^{-7} \text{ Sv/Bq}$

V_W : tasa de consumo humano de agua, 730 l/año

C_W : concentración media de radón, calculada a partir de los cuatro resultados que proporciona el RAD7 (un resultado cada cinco minutos).

CAPÍTULO III

3. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta los resultados de las concentraciones de la actividad de radón-222, radón-220 y radio-226 en muestras de agua de 25 suministros de agua potable de los cantones Chunchi, Alausí, Guamote y Riobamba.

3.1. Resultados de las concentraciones de radón-222

El Gráfico (1-3) presenta las concentraciones de la actividad de radón-222 de los suministros de agua potable del **cantón Chunchi**. La mayor concentración de radón-222 se observa en la fuente de Bacún, reportándose 1,410 Bq/l \pm 0,097 Bq/l (1σ) y la más baja en la fuente de Sagúan con una concentración de 0,106 Bq/l \pm 0,067 Bq/l (1σ). En la Planta Central desembocan Bacún y Sagúan, la muestra analizada mostró una concentración esperada de la combinación de las aguas.

La Tabla (1-3) presenta las coordenadas geográficas de las fuentes de agua, la dosis efectiva anual por ingestión de radón-222, los resultados del monitoreo ambiental in situ y la temperatura del agua y aire. El valor más alto de dosis se observa en la muestra de agua de la fuente Bacún, mientras que la tasa de dosis de radiación gamma es más alta en el lugar donde está ubicada la fuente Saguán.

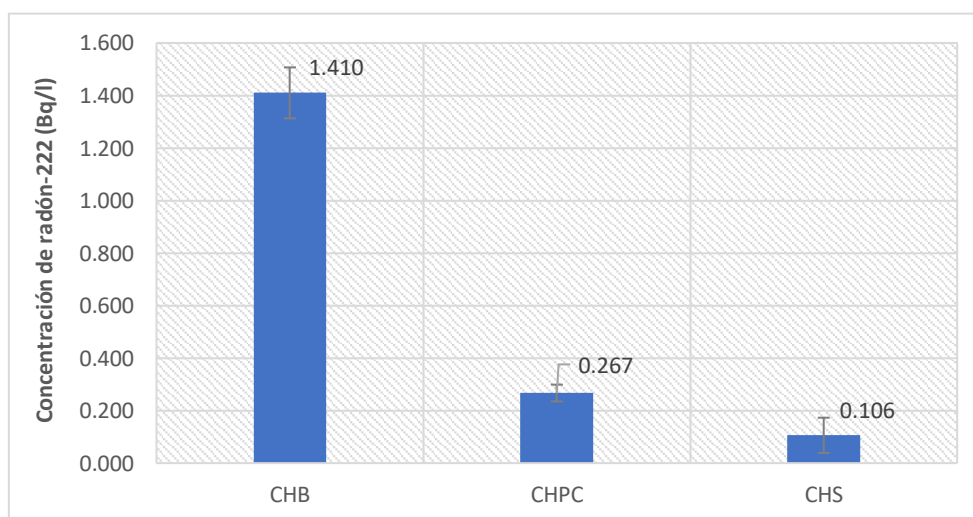


Gráfico 1-3: Resultados de las concentraciones de la actividad de radón-222, cantón Chunchi.

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021.

Tabla 1-3: Dosis efectiva anual por ingestión de radón-222 y monitoreo radiactivo, cantón Chunchi

	Nombre Fuente	Código	Coordenadas	Dosis efectiva anual (mSv/año)	Monitoreo de radioactividad		TEMPERATURA (K)	
				Ingestión	Tasa de dosis de radiación Gamma mSv/año	Radioisótopos	Aire	Agua
CHUNCHI	Bacún	CHB	2°18'10,38" S 78°53'0,60" W	0,010±0,001	0,394	Potasio 40 (K40)	286	285
	Planta Central	CHPC	2°18'10,47" S 78°53'0,48" W	0,0010±0,0002	0,464	NDR	291	287
	Sagúan	CHS	2°18'10,39" S 78°53'0,6" W	0,0007±0,0004	0,525	Potasio 40 (K40)	283	281

NDR: No se detectó radioisótopos.

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021.

El Gráfico (2-3) visualiza las concentraciones de radón-222 de las fuentes de agua doméstica del cantón Alausí. El nivel de radón más alto se observó en la fuente de Chitaquies con una concentración de la actividad de $1,478 \pm 0,092$ Bq/l (1σ) con una dosis efectiva anual en agua de $0,011 \pm 0,001$ mSv/año. En este cantón el espectrómetro Atomtex detectó la presencia de radón-222 a los alrededores de la fuente Plaza de Rastros. Ver Tabla (2-3).

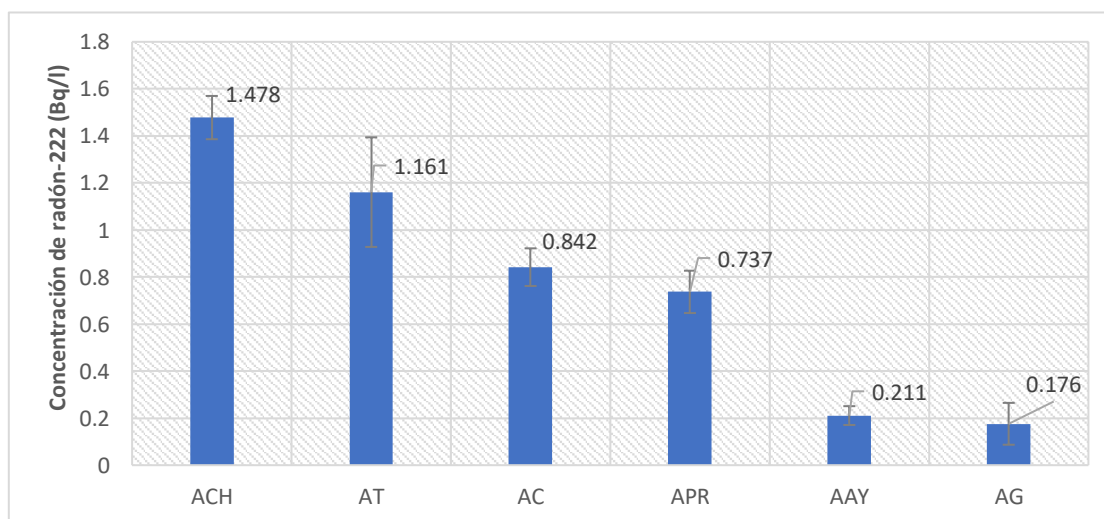


Gráfico 2-3: Resultados de las concentraciones de la actividad de radón-222, cantón Alausí. **Realizado por:** Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021.

Tabla 2-3: Concentración media de radón-222, cantón Alausí

	Nombre Fuente	Código	Coordenadas	DOSIS ANUAL (mSv/año)	Monitoreo de radioactividad		TEMPERATURA (K)	
				Ingestión	Tasa de dosis de radiación Gamma mSv/año	Radioisótopos	Aire	Agua
	Aypud	AAV	2°12'8.90" S 78°50'34.06" W	0,0015±0,0003	0,675	Potasio 40 (K40) Desconocido	284	287
ALAU SÍ	Casual	AC	2°11'39.87" s 78°50'25.22" W	0,006±0,001	0,298	NDR	284	292
	Chitaquies	ACH	2°12'25.99" S 78°50'46.99" W	0,011±0,001	0,298	NDR	284	292
	Gampala	AG	2°12'10.17" S 78°50'33.98" W	0,0013±0,0006	0,675	Potasio 40 (K40) Desconocido	286	287
	Plaza de Rastros	APR	2°13'10.5"S 78°51'14.4"W	0,005±0,001	0,456	Radio (Ra-226)	284	282
	Tixan	AT	2°12'10.17" S 78°50'33.98" W	0,008±0,002	0,271	NDR	287	286

NDR No se detectó radioisótopos.

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021.

En Guamote se reporta el valor más alto en la concentración de radón-222 en la fuente de Chipo Chico con $7,488 \pm 0,211$ Bq/l (1σ) con una dosis efectiva anual de $0,054 \pm 0,002$ mSv/año, como se muestra en el Gráfico (3-3) y la Tabla (3-3) respectivamente. Se evidencia una idéntica tasa de dosis de radiación gamma en los lugares donde se encuentran las fuentes Ambato Pogio y Chipo Chico y, además; la presencia de potasio-40.

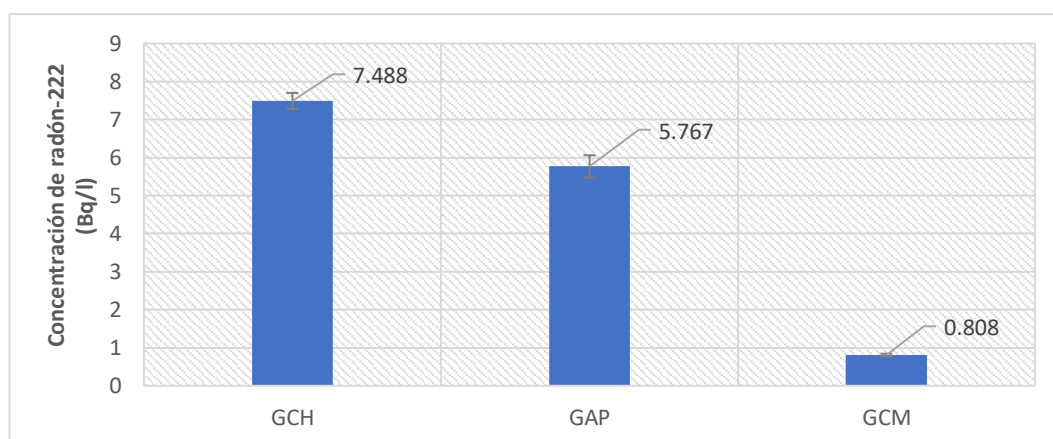


Gráfico 3-3: Resultados de las concentraciones de la actividad de radón-222, cantón Guamote

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021.

Tabla 3-3: Dosis efectiva anual de radón-222, cantón Guamote

	Nombre Fuente	Código	Coordenadas	DOSIS ANUAL (mSv/año)	Monitoreo de radioactividad		TEMPERATURA (K)	
				Ingestión	Tasa de dosis de radiación Gamma mSv/año	Radioisótopos	Aire	Agua
GUAMOTE	Ambato Pogio	GAP	1°56'58.01"S 17°42'50.92" W	0,042±0,002	0,570	Potasio 40 (K40)	286	285
	Chacaza Matipanga	GCM	1°56'55.89"S 78°43'15.59"	0,0059±0,0002	0,482	NDR	286	285
	Chipo Chico	GCH	1°56'58.01"S 17°42'50.92" W	0,054±0,002	0,570	Potasio 40 (K40)	286	285

NDR No se detectó radioisótopos

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley (2021).

Los resultados de la concentración de radón-222 y dosis efectiva anual por ingestión de agua de las fuentes del **cantón Riobamba**, se muestran en el Gráfico (4-3) y Tabla (4-3) respectivamente. Se observó que el pozo Estadio presenta la mayor concentración de actividad de radón-222 de $4,333 \pm 0,369$ Bq/l (1σ) y una dosis efectiva anual en agua de $0,032 \pm 0,003$ mSv/año, mientras que los datos más bajos obtenidos se reportan en la fuente Maldonado con una concentración de actividad de $0,563 \pm 0,057$ Bq/l (1σ) y una dosis efectiva anual en agua de $0,0042 \pm 0,0004$ mSv/año. El monitoreo ambiental mostró la presencia de potasio-40 en los alrededores de los pozos subterráneos LLio 5, LLio 6 y Maldonado y un rango de tasa de dosis gamma entre 0,42 y 0,75 mSv/año.

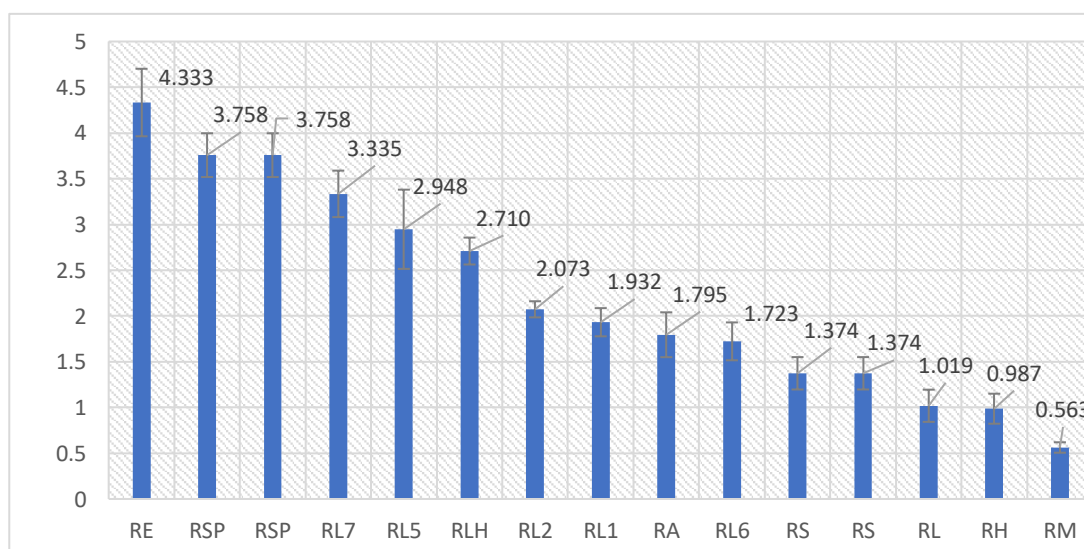


Gráfico 4-3: Resultados de las concentraciones de la actividad de radón-222, cantón Riobamba

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021.

Tabla 4-3: Dosis efectiva anual de radón-222, cantón Riobamba

	Nombre Fuente	Código	Coordenadas	DOSIS ANUAL (mSv/año)	Monitoreo de radioactividad		TEMPERATURA (K)	
				Ingestión	Tasa de dosis de radiación Gamma mSv/año	Radioisótopos	Aire	Agua
RIOBAMBA	Abras	RA	1°38'46.43" S 78°38'46.52" W	0,013±0,002	0,543	NDR	289	287
	Estadio	RE	1°41'8.90" S 78°40'19.30" W	0,032±0,003	0,482	NDR	285	283
	Hierbas	RH	1°39'1.76" S 78°39'38.48" W	0,007±0,001	0,508	NDR	288	285
	La Huerta	RLH	1°39'48.28" S 78°40'35.62" W	0,019±0,001	0,561	NDR	288	288
	Llio 1	RL1	1°33'39.28" S 78°42'46.00" W	0,014±0,001	0,631	NDR	286	284
	Llio 2	RL2	1°33'43.12" S 78°42'49.29" W	0,0151±0,0006	0,421	NDR	286	285
	Llio 4	RL	1°33'53.33" S 78°42'48.68" W	0,007±0,001	0,482	NDR	286	285
	Llio 5	RL5	1°33'42.74" S 78°42'46.78" W	0,021±0,003	0,750	Potasio 40 (K40)	286	285
	Llio 6	RL6	1°33'46.25" S 78°42'48.45" W	0,013±0,002	0,543	Potasio 40 (K40)	284	283
	Llio 7	RL7	1°33'49.59" S 78°42'45.98" W	0,024±0,002	0,456	NDR	286	285
	Maldonado	RM	1°39'19.83" S 78°38'52.86" W	0,0042±0,0004	0,675	Potasio 40 (K40)	289	287
	San Pablo	RSP	1°33'44.9" S 78°43'03.7" W	0,027±0,002	0,693	NDR	285	283
	Servidores	RS	1°39'32.86" S 78°40'18.87" W	0,010±0,001	0,684	NDR	288	288

NDR No se detectó radioisótopos

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021

3.2. Resultados de la concentración de radio-226

Los resultados de concentración de la actividad de radio-226 y de la dosis anual por ingestión agua de las fuentes del **cantón Chunchi**, se visualizan en la Gráfica (5-3) y Tabla (5-3) respectivamente. El valor máximo de radio-226 se encontró en la fuente de Bacún con una concentración de la actividad de $0,527 \pm 0,088$ Bq/l (1σ) y una dosis efectiva anual en agua de $0,128 \pm 0,022$ mSv/año, mientras que la fuente de Sagúan no se reportó concentración de la actividad de radio-226.

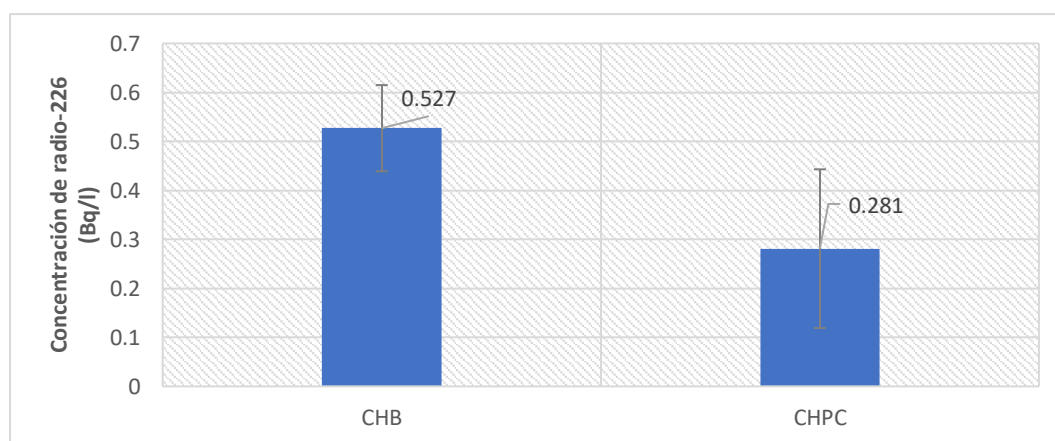


Gráfico 5-3: Resultados de concentración de la actividad de radio-226, Cantón Chunchi
Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021

Tabla 5-3: Dosis efectiva anual de radio-226, cantón Chunchi

	Nombre Fuente	Tipo	Código	Coordenadas	DOSIS ANUAL (mSv/año) Ingestión
CHUNCHI	Bacún	Vertiente	CHB	2°18'10,38"S 78°53'0,60" W	0,128±0,022
	Planta Central	Abastecimiento	CHPC	2°18'10,47"S 78°53'0,48" W	0,068±0,039
	Sagúan	Abastecimiento superficial	CHS	2°18'10,39"S 78°53'0,6"W	0

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley (2021).

En el **cantón Alausí**, la concentración de la actividad más alta de radio-226 se encontró en Tixán con $0.139 \pm 0,056$ Bq/l (1σ) y una dosis efectiva anual de $0,033 \pm 0,014$ mSv/año, en las fuentes de Casual y Plaza de Rastro se reporta la misma concentración de la actividad de $0,071 \pm 0,040$ Bq/l. (1σ) y una dosis efectiva anual en agua de $0,017 \pm 0,009$ mSv/año, en las fuentes de Aypud, Chitaquiz y Gampala el RAD7 reporta un valor de cero para la concentración de radón-222 al día diez; y por tanto, un valor de cero para el radio-226. Ver Gráfica (6-3) y Tabla (6-3).

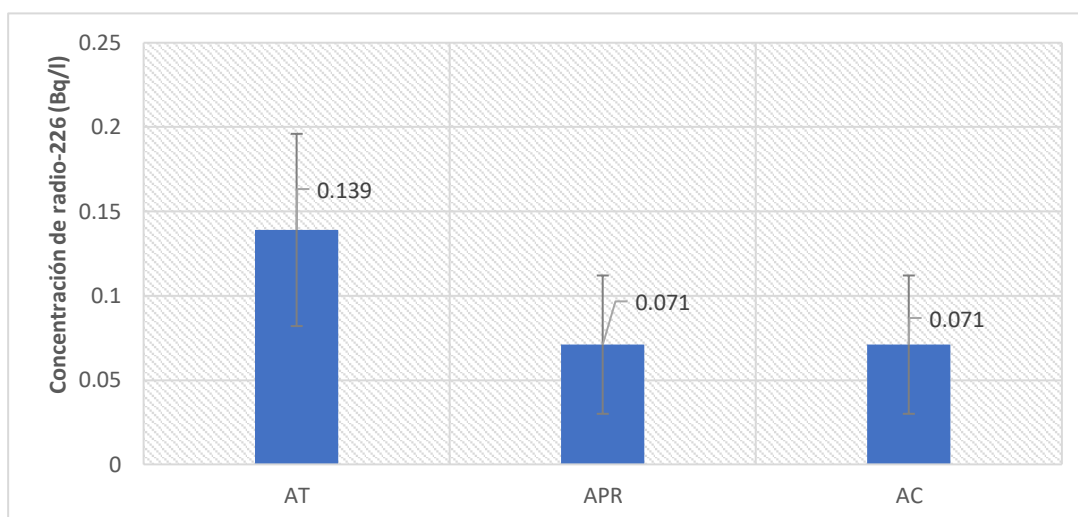


Gráfico 6-3: Resultados de la concentración de la actividad de radio-226, cantón Alausí
Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021

Tabla 6-3: Dosis efectiva anual de radio-226, cantón Alausí

	Nombre Fuente	Tipo	Código	Coordenadas	DOSIS ANUAL (mSv/año)
					Ingestión
ALAU SÍ	Aypud	Suministro de agua	AA Y	2°12'8.90" S 78°50'34.06" W	0
	Casual	Tanque reservorio	AC	2°11'39.87" s 78°50'25.22" W	0,017±0,009
	Chitaquies	Fuente superficial	ACH	2°12'25.99" s 78°50'46.99" W	0
	Gampala	Fuente superficial	AG	2°12'10.17" S 78°50'33.98" W	0
	Plaza de Rastros	Tanque reservorio	APR	2°13'10.5"S 78°51'14.4"W	0,017±0,009
	Tixan	Suministro de agua	AT	2°12'10.17" S 78°50'33.98" W	0,034±0,014

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021

En el **cantón Guamote** en la fuente de Ambato Pogio se encontró la más alta concentración de la actividad de radio-226 de $0,140 \pm 0,067$ Bq/l (1σ) y una dosis efectiva anual de $0,034 \pm 0,013$ mSv/año, la fuente de Chipo Chico reportó los valores mínimos, con una concentración de la actividad de $0,071 \pm 0,040$ Bq/l (1σ) y una dosis efectiva anual de $0,017 \pm 0,009$ mSv/año. Ver Gráfica (7-3) y Tabla (7-3).

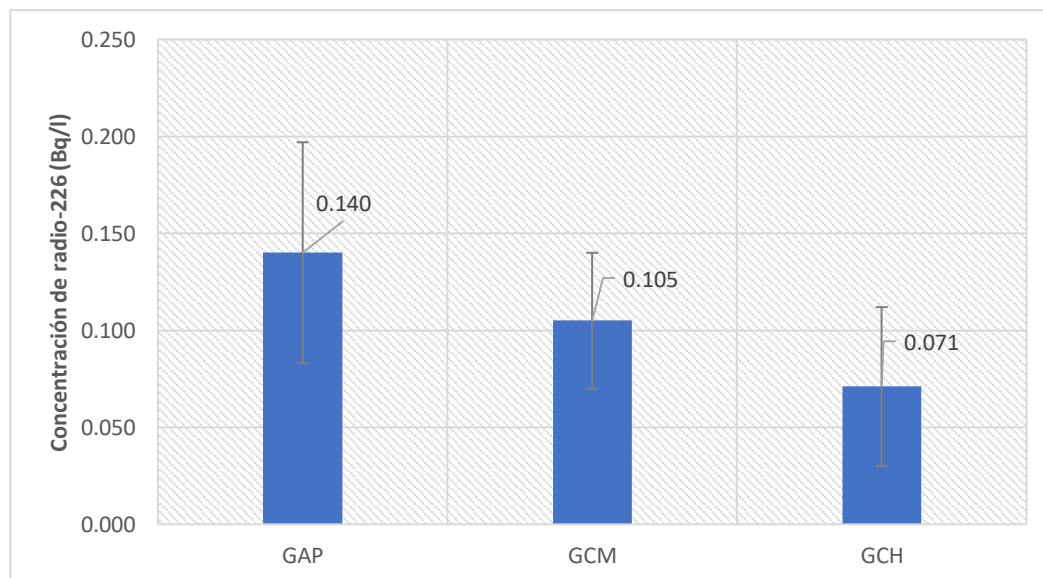


Gráfico 7-3: Resultados de la concentración de la actividad de radio-226, cantón Guamote.

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021

Tabla 7-3: Dosis efectiva anual de radio-226, cantón Guamote

	Nombre Fuente	Tipo	Código	Coordenadas	DOSIS ANUAL (mSv/año) Ingestión
GUAMOTE	Ambato Pogio	Suministro superficial	GAP	1°56'58.01"S 17°42'50.92"W	0,034±0,013
	Chacaza Matipanga	Vertientes superficiales	GCM	1°56'55.89"S 78°43'15.59"	0,026±0,009
	Chipo Chico	Suministro superficial	GCH	1°56'58.01"S 17°42'50.92"W	0,017±0,009

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021

Los resultados obtenidos en las fuentes de agua del **cantón Riobamba**, se muestran en la Gráfica (8-3) y Tabla (8-3). Las fuentes Estadio y Servidores indicaron una concentración de la actividad de radio-226 de $0,211 \pm 0,040$ Bq/l (1σ) y una dosis efectiva anual $0,051 \pm 0,009$ mSv/año. Por el contrario, las fuentes que reportaron los valores más bajos fueron Hierbas y Llio 1 con $0,071 \pm 0,040$ Bq/l (1σ) y $0,017 \pm 0,009$ mSv/año, los pozos abras, Llio 2, Llio 6 y Maldonado presentaron una concentración cero.

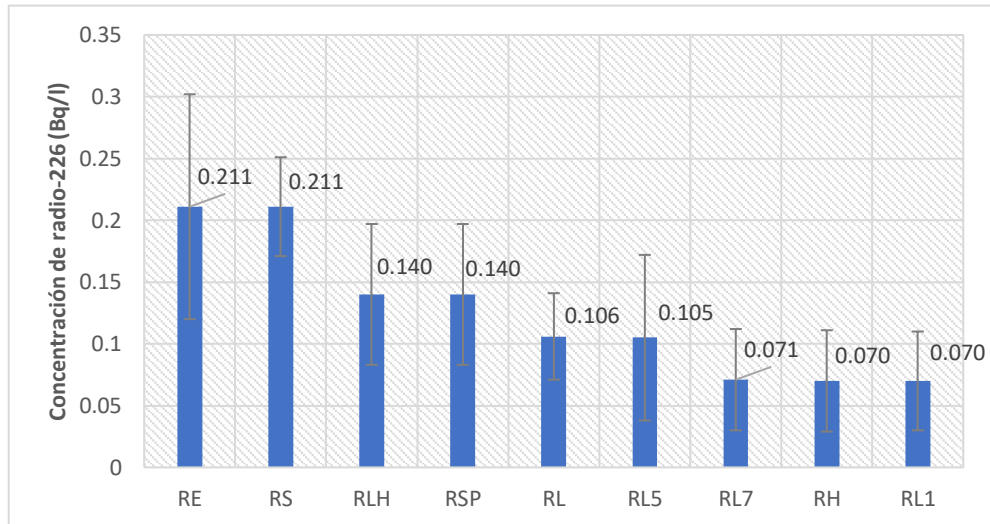


Gráfico 8-3: Resultados de la concentración de la actividad de radio-226, cantón Riobamba.

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley (2021).

Tabla 8-3: Dosis efectiva anual de radio-226 del cantón Riobamba

	Nombre Fuente	Tipo	Código	Coordenadas	DOSIS ANUAL (mSv/año) Ingestión
RIOBAMBA	Abras	Pozo de aguas subterránea	RA	1°38'46.43"S 78°38'46.52"W	0
	Estadio	Pozo de aguas subterránea	RE	1°41'8.90"S 78°40'19.30"W	0,051±0,022
	Hierbas	Pozo de aguas subterránea	RH	1°39'1.76"S 78°39'38.48"W	0,017±0,009
	La Huerta	Pozo de aguas subterránea	RLH	1°39'48.28"S 78°40'35.62"W	0,034±0,014
	Llio 1	Pozo de aguas subterránea	RL1	1°33'39.28"S 78°42'46.00"W	0,017±0,009
	Llio 2	Pozo de aguas subterránea	RL2	1°33'43.12"S 78°42'49.29"W	0
	Llio 4	Pozo de aguas subterránea	RL	1°33'53.33"S 78°42'48.68"W	0,026±0,009
	Llio 5	Pozo de aguas subterránea	RL5	1°33'42.74"S 78°42'46.78"W	0,026±0,016
	Llio 6	Pozo de aguas subterránea	RL6	1°33'46.25"S 78°42'48.45"W	0
	Llio 7	Pozo de aguas subterránea	RL7	1°33'49.59"S 78°42'45.98"W	0,017±0,009
	Maldonado	Pozo de aguas subterránea	RM	1°39'19.83"S 78°38'52.86"W	0
	San Pablo	Pozo Artesiano	RSP	1°33'44.9"s 78°43'03.7"W	0,034±0,014
	Servidores	Suministro de agua	RS	1°39'32.86"S 78°40'18.87"W	0,051±0,009

No se detectó radioisótopos.

Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021.

En el Gráfico 9-3 (A) se observa las **concentraciones máximas de radón-222** de cada cantón, el valor más alto exhibe Chipo Chico del cantón Guamote seguido por Estadio del cantón Riobamba, Chitaquies del cantón Alausí y Bacún del cantón Chunchi. En lo que respecta a los niveles de radio, el Gráfico 9-3 (B) muestra que la concentración más alta fue observada en Bacún de Chunchi, seguido de Estadio y Servidores de Riobamba, Tixán de Alausí y Ambato Pogio de Guamote.

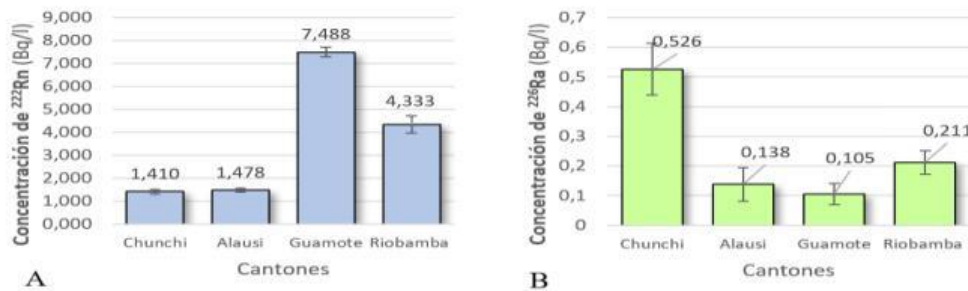


Gráfico 9-3: Concentraciones de las actividades máximas de radón-222 y radio-226.
Realizado por: Fienco Augusto y Samaniego Shirley, 2021.

Las mediciones de las **concentraciones de la actividad de torón** (radón-220) en muestras de agua de las 25 fuentes de los cuatro cantones estudiados, indican que no existe presencia de este radioisótopo en todas ellas a excepción de la fuente de Llio 7 (RL7), que presentó un valor de $0,141 \pm 0,081$ Bq/l, este resultado seguramente se debe al hecho de que las concentraciones son muy pequeñas y el equipo RAD7 no tiene la capacidad para detectarlas, por lo que en el reporte apareció cero.

DISCUSIÓN

El consumo de agua en todo el mundo depende sustancialmente de los acuíferos y aguas subterráneas, en este sentido el contenido de radionúclidos en las aguas subterráneas es de utilidad cuando se consideran las exposiciones de los seres humanos a las radiaciones ionizantes.

De lo antes mencionado, es de interés mundial y obviamente nacional realizar mediciones de las concentraciones de radionucleidos presentes en el agua, destinada para el consumo humano, de manera particular la progenie del uranio-238, a fin de evaluar las dosis efectivas anuales referenciales. En este trabajo de titulación se monitoreó 25 fuentes, ubicadas en los cantones Chunchi, Alausí, Guamote y Riobamba pertenecientes a la provincia de Chimborazo-Ecuador, se midió concentraciones de radón-222, torón-220 y radio 226, usando el método emanométrico con RAD7.

Los resultados muestran que las 25 fuentes de agua estudiadas presentan valores bajos de concentración de la actividad de radón-222 respecto al nivel de referencia recomendado por la Unión Europea en la Directiva 2013/51/EURATOM (100 Bq/l). El valor más alto observado corresponde a la fuente Chipo Chico ubicada en el cantón Guamote ($7,488 \pm 0,211$ Bq/l) (1σ).

En lo que respecta a las concentraciones de radio-226, las 25 fuentes no superan la concentración derivada, mencionada en la Directiva 2013/51/EURATOM (0,5 Bq/l), excepto la fuente Bacún del cantón Chunchi que presenta un valor de $0,527 \pm 0,088$ Bq/l.

Las concentraciones de la actividad de torón (radón-220) de todas las fuentes de agua de los cuatro cantones, presentan un valor de cero; es decir, bajo el nivel de detección de la técnica, excepto el pozo Llio 7 del cantón Riobamba que muestra un valor de $0,141 \pm 0,081$ Bq/l (1σ). Cabe recalcar que el torón (^{220}Rn) no se considera en los informes de UNSCEAR y en las normas de calidad del agua como un contribuyente importante a la dosis efectiva de la ingestión porque se supone que se elimina en gran medida del agua debido a la agitación producto del tratamiento y durante los procesos de purificación.

Las dosis efectivas anuales más altas, calculadas para el radón-222 y radio-226 por ingesta de agua corresponden a $0,054 \pm 0,002$ mSv/año (Chipo Chico, cantón Guamote) y $0,128 \pm 0,022$ mSv/año (Bacún, cantón Chunchi) respectivamente, constituyen el 2% y 44% de la dosis promedio mundial anual de la ingestión de alimentos y agua potable estimada en 0,29 mSv, que constituye aproximadamente el 12 % de la dosis total de todas las fuentes naturales estimada en 2,4 mSv UNSCEAR (2008).

CONCLUSIONES

El monitoreo de veinte y cinco fuentes, que suministran agua potable a los cantones Chunchi, Alausí, Guamote y Riobamba, mostró que el nivel más alto de radón-222 corresponde a la fuente Chipo Chico ubicada en el cantón Guamote ($7,488 \pm 0,211$ Bq/l) (1σ), por lo que se concluye que las concentraciones de radón-222 son muy bajas respecto al nivel de referencia recomendado por la Unión Europea en la Directiva 2013/51/EURATOM (100 Bq/l) y por tanto no representan un riesgo para la salud de la población.

Las mediciones de radio-226 en las muestras de agua de las veinte y cinco fuentes estudiadas, presentaron valores que no superan la concentración derivada, mencionada en la Directiva 2013/51/EURATOM (0,5 Bq/l), excepto la fuente Bacún del cantón Chunchi que presenta un valor de $0,526 \pm 0,088$ Bq/l (1σ), por lo que se infiere que los niveles de radio-226 en el agua de beber de la mayoría de los suministros, de los cantones Chunchi, Alausí, Guamote y Riobamba, se encuentran bajo los niveles de referencia de la Comunidad Europea y por lo tanto existe una baja probabilidad de causar efectos adversos para la salud de los ciudadanos.

Los niveles de torón (radón-220) disuelto en agua de todas las fuentes de agua analizadas, presentan concentración de cero, excepto el pozo Llio 7 del cantón Riobamba que muestra un valor de $0,141 \pm 0,081$ Bq/l (1σ), por lo que se colige que este radionucleido no está presente en los suministros de agua doméstica de los cantones Chunchi, Alausí, Guamote y Riobamba; o a su vez, los valores se encuentran bajo el nivel de detección de la técnica utilizada.

Las dosis efectivas anuales más altas, calculadas para el radón-222 y radio-226 por ingesta de agua corresponden a $0,054 \pm 0,002$ mSv/año (Chipo Chico, cantón Guamote) y $0,128 \pm 0,022$ mSv/año (Bacún, cantón Chunchi) respectivamente, por lo que se concluye que constituyen el 2% y 44% de la dosis promedio mundial anual de la ingestión de alimentos y agua potable estimada en 0,29 mSv, UNSCEAR (2008).

RECOMENDACIONES

- Verificar que la memoria de los equipos Atomtex y RAD7 tengan espacio libre para poder guardar las mediciones realizadas.
- Después de purgar el equipo RAD7 se recomienda que la humedad relativa no sea mayor al 6 % para evitar datos erróneos.
- Al momento de recolectar las muestras se debe cerciorar que no existan burbujas de aire dentro del vial.
- Cuando la recolección de la muestra se realiza a través de una llave, se la debe dejar abierta aproximadamente 10 minutos para que la temperatura del agua se estabilice con la temperatura del ambiente.
- Comprobar que la tapa del vial esté cerrada herméticamente para impedir fugas del gas radón-222 y posibles derrames de la muestra.
- Se debe calibrar al equipo Atomtex en el lugar donde se encuentra la fuente de agua.

GLOSARIO

Acuífero: Depósitos de agua subterráneos naturales encontrados debajo de la superficie terrestre (capas porosas de arena, roca o grava) (Burbano, et al., 2015.p 18).

Adsorción: El proceso físico que ocurre cuando los líquidos, gases o materias suspendidas se adhieren a las superficies o en los poros de un medio adsorbente como el carbón activado. La adsorción es un proceso físico que ocurre sin reacción química (Durrige Company, 2012, p 34).

Afluente: El agua que entra (alimentación) a un dispositivo de tratamiento de agua (Burbano, et al., 2015).

Agua cruda: Agua no tratada de pozos, de fuentes superficiales o cualquier agua antes de que llegue a un dispositivo o proceso de tratamiento de agua (Burbano, et al., 2015,p 5).

Agua potable: Es el agua que se considera segura y apta para el consumo humano, con fines culinarios y domésticos. Este cumple con las especificaciones de calidad establecidos en la versión oficial vigente de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSAA1-1994 (Comprubí, et al., 2015,p 28).

Carga positiva: El potencial eléctrico adquirido por un átomo que ha cedido uno o más electrones; característica de un catión (Barberá, el al, 2018).

Catión: Un ion con carga positiva (Barberá, el al, 2018).

Ciclo: Un curso completo de operación de intercambio iónico. Por ejemplo, un ciclo completo de intercambio de cationes implicaría: regeneración de la resina, enjuague para eliminar el exceso de regenerante, agotamiento, retrolavado y finalmente regeneración nuevamente (Barberá, el al, 2018).

Concentración: Es la proporción o relación que hay entre la cantidad de soluto y la cantidad de disolución. Se expresa en unidades de masa sobre volumen (Durrige Company, 2012).

Contaminación: La presencia en el agua de cualquier sustancia física, química, biológica o radiológica que sea diferente a la fórmula del agua (H₂O) (Burbano, et al., 2015).

Densidad real: La relación de masa por unidad de volumen bajo condiciones específicas, excluyendo el volumen de poros y los espacios vacíos entre partículas (Moreira, 2018,p.21).

Desgaste del medio: El proceso en el que los sólidos se desgastan por fricción, a menudo entre partículas del mismo material. Los medios filtrantes y los materiales de intercambio iónico están sujetos a desgaste durante el retrolavado, la regeneración y el servicio (Aldaba, 2013,p.54).

Efluente: La salida de un sistema de tratamiento de agua (Burbano, et al., 2015,p.32).

Flujo (Caudal): La cantidad de fluido que circula a través de una sección del ducto (tubería, cañería, oleoducto, río, canal,) por unidad de tiempo (Burbano, et al., 2015,p.25).

Intercambio iónico: Proceso químico reversible en el que iones disueltos no deseados son intercambiados por otros iones con una carga similar. La dirección del intercambio depende de las afinidades del intercambiador por los iones y su concentración en la solución (DurrIDGE Company, 2014,p.58).

Ion: Un átomo, o grupo de átomos en una solución que funciona como una unidad, y tiene una carga eléctrica positiva o negativa, debido a la ganancia o pérdida de uno o más electrones. Es más pequeño que un coloide (DurrIDGE Company, 2014,p.35).

Isótopos: Los isótopos de un mismo elemento son las distintas variedades existentes de núcleos que tienen la misma cantidad de protones, pero distinto número de neutrones (Torres, 2019,p.87).

Oxidación: Un proceso químico en el que una molécula, ion o átomo cede electrones a un oxidante y este se reduce. La oxidación nunca ocurre sola, sino siempre como parte de la reacción de oxidación-reducción (redox). La combustión es una forma extremadamente rápida de oxidación (Barberá, et al, 2018,p.26).

Partícula: El fragmento más pequeño de materia que mantiene las propiedades químicas de un cuerpo (Barberá, et al, 2018,p.43).

pH (potencial de hidrógeno): Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones de hidrógeno presente en una solución (Barberá, et al, 2018,p.34).

Radio: Elemento radiactivo natural (radio 226 y el radio 228) originado por el decaimiento de uranio y torio. Se puede eliminar del agua por medio de intercambio catiónico (DurrIDGE Company, 2014,p.23).

Radón: Gas incoloro e inodoro radiactivo de vida corta el cual se produce en la naturaleza por medio del decaimiento de las series de uranio/radio, este es soluble en el agua. El radón es un elemento carcinogénico para los humanos. El método de eliminación de radón del agua es por medio de aireación o carbón activado (Durrige Company, 2014,p.76).

Residual: La cantidad de un material específico que permanece en el agua después de un proceso de tratamiento. Puede referirse a un material indeseado resultado de una eliminación incompleta, como una fuga de dureza, o a una sustancia destinada a permanecer en el agua tratada, como el cloro residual (Connor, 2020,p.43).

Sedimentación: Los sedimentos son materias sólidas, en forma de partículas o granos, que se encuentran en una superficie (Burbano, et al., 2015,p.67).

BIBLIOGRAFÍA

ADAMS, John, *SERIES Methods in Geochemistry and Geophysics. Gamma-Ray Spectrometry of Rocks*. S.l.: s.n., 1970.

ALCOSER, María, *Optimización Del Sistema Tratamiento De Agua Potable En La Planta De San Juan Alto De La Parroquia Matriz Del Cantón Guamote*. Riobamba: s.n. 2014.

ALDABA MUÑOZ, David, Transporte por difusión de radionucleidos en suelos y arcillas. *TDX* (Trabajo de titulación)(Doctorado) [en línea], 2013. . [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <http://www.tdx.cat/handle/10803/131398>.

ARCA, Agenda Regulatoria. . Quito, 2021. 12 August 2021. pp. 8.

BARBERÁ, J.A. and ABRISQUETA, A., Actividad del ²²²Rn en aguas subterráneas de origen mineral y termal de la provincia de Málaga. [en línea], 2018. , pp. 1. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/17005/Barber%c3%a1%20et%20al.%2c%202018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

BONETTO, J.P.;; LOPEZ, F.O. and CANOBA, A., Radon Measurements in Argentina. *Latin American Symposium on Radon* [en línea], 2014. , pp. 1–19. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <https://www.foroiberam.org/documents/193375/199920/Radon+Measurements+in+Argentina/ba0737d2-e968-40ab-a2c9-72b37e224bf7;jsessionid=85F45CE1F7AC9B012B5DE40A234728E8?version=1.0>.

BORUNDA, Alejandra, 2020. La sobreexplotación de los acuíferos está acabando con nuestros ríos. [en línea]. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <https://www.nationalgeographic.es/ciencia/2020/03/sobreexplotacion-acuiferos-esta-acabando-con-rios>.

BURBANO, Napoleón, BECERRA, Simón and PASQUEL, Efrén, *Introducción A La Hidrogeología* [en línea]. 2da. Quito : INAMHI. 2014. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: https://www.inamhi.gob.ec/Publicaciones/Hidrologia/HIDROGEOLOGIA_2%20EDICION_2014.pdf.

CARTER, Korey P., RIDENOUR, J. August, KALAJ, Mark and CAHILL, Christopher L., A Thorium Metal-Organic Framework with Outstanding Thermal and Chemical Stability. *Chemistry – A European Journal*, vol. 25, no. 29, 2019. , pp. 7114–7118. ISSN 0947-6539. DOI 10.1002/chem.201901610.

CHAU, Nguyen, KASPRZYKOWSKI, Paweł, SENIUTA, Rafał, NOWAK, Jakub and OCHMAŃSKI, Paweł, IZOTOPY URANU I RADU WÓD PITNYCH AGLOMERACJI KRAKOWSKIEJ. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* [en línea], vol. 436, no. 436–1, 2009. , pp. 29–34. Disponible en: <https://geojournals.pgi.gov.pl/bp/article/view/29050>.

COBA, José, GUILLAUME, Juan and RODRÍGUEZ, Javier, *Aportes A La Planificación Para La Gestión Integral De Los Recursos Hídricos Contribución Del Comité De La Subcuenca Del Río Chambo* [en línea]. Riobamba: Diseño Editorial. 2015. [Consulta: 12 diciembre 2021]. Disponible en: www.avsf.org.

CONNOR, Nick, 2020. ¿Qué es la serie Radioactive? - Cadena de desintegración - Definición. [en línea]. [Consulta: 12 Diciembre 2021]. Disponible en: <https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-la-serie-radioactive-cascada-radioactiva-definicion/>.

DINH CHAU, Nguyen, DULINSKI, Marek, JODLOWSKI, Paweł, NOWAK, Jakub, ROZANSKI, Kazimierz, SLEZIAK, Monika and WACHNIEW, Przemyslaw, Natural radioactivity in groundwater . *Isotopes in Environmental and Health Studies*, vol. 47, no. 4, 2011. , pp. 415–437. ISSN 1025-6016. DOI 10.1080/10256016.2011.628123.

DURRIDGE COMPANY INC, RAD H2O Manual de Usuario [en línea]. S.l.: s.n. 2012. Disponible en: www.durridge.com.

ESCAREÑO JUÁREZ, Edmundo, *Implicaciones analíticas en la determinación de uranio y torio por diferentes técnicas en suelos no perturbados de Zacatecas, México*. Mexico: s.n. 2019.

FERREIRA MALTEZ, Rodrigues and PABLO, Darío, *Detección de radionucleidos cosmogénicos mediante la técnica de espectrometría de masas con aceleradores*. Buenos Aires.: 2016.

GAD ALAUSÍ, Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial del canton Alausí". . Alausí: 2019.

GAD CHUNCHI, Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Chunchi. [en línea]. Riobamba: 2019. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <https://www.municipiochunchi.gob.ec/phocadownload/Transparencia2016/Literals/PDOT%20CHUNCHI%20Adm.%202014-2019.pdf>.

GAD GUAMOTE, Plan de Desarrollo y ordenamiento territorial del Gobierno Autonomo descentralizado del cantón Guamote. . Guamote: 2019.

GAD RIOBAMBA, Plan de Ordenamiento territorial del Gobierno Aurtonomo Descentralizado del Cantón Riobamba. . Riobamba: 2019.

GÓMEZ CARRIÓN, Silvia Catalina and LANDY ALVAREZ, Sandra Vanessa, *Propuesta De Uso Y Ocupacion Del Suelo En El Límite Urbano Del Cantón Chunch* [en línea]. Riobamba: s.n. 2019. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/5450>.

GONZÁLES, Isahic, *Emanaciones de Radón (222Rn) en aguas termales del Estado de México: Premonitor Geofísico* [en línea]. México: s.n. 2017. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/68452/Emanaciones%20de%20Radon%20en%20aguas%20termales%20del%20Estado%20de%20Mexico.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

GONZÁLEZ MOGROVEJO, Karina Montserrat and VILORIA ÁVILA, Tony, *Correlation Of The Meteorological Variables With The Concentration Of Radon-222 In The Soil, In Eight Points Of The Periphery Of The City Cuenca, Ecuador*. Cuenca: s.n. 2018.

GUAPIZCA, Jinde, *Implementación De Un Método De Detección Del Gas 222rn En Agua Proveniente De Las Vertientes Naturales Del Volcán Carihuairazo*. Riobamba : s.n. 2018.

GUEVARA, Susana, *Riesgos A La Salud Por La Contaminación Radioactiva Del Agua Potable De La Ciudad De Riobamba* [en línea]. Riobamba: s.n. 2015. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3878/1/86T00017%20UDCTFC.pdf>.

INAMHI, 2007. Mapas Hidrológicos . [en línea]. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <https://www.inamhi.gob.ec/>.

INEC, Censo de Población y Vivienda 2010. [en línea]. Quito: 2010. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/base-de-datos-censo-de-poblacion-y-vivienda-2010/>.

KOVLER, K., FRIEDMANN, H., MICHALIK, B., SCHROEYERS, W, TSAPALOV, A., ANTROPOV, S., BITUH, T. and NICOLAIDES, D., *Basic aspects of natural radioactivity*. En: *Wouter SCHROEYERS (ed.), Naturally Occurring Radioactive Materials in Construction [en línea]*. S.l.: Woodhead Publishing, 2017.pp. 13–36. ISBN 978-0-08-102009-8. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081020098000037>.

LE, Cong Hao, HUYNH, Nguyen Phong Thu, NGUYEN, Van Thang and LE, Quoc Bao, Radon and radium concentrations in drinkable water supplies of the Thu Duc region in Ho Chi Minh City, Vietnam. *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 105, 2015. , pp. 219–224. ISSN 09698043. DOI 10.1016/j.apradiso.2015.08.033.

LE, Cong Hao, HUYNH, Nguyen Phong Thu, NGUYEN, Van Thang and LE, Quoc Bao, Radon and radium concentrations in drinkable water supplies of the Thu Duc region in Ho Chi Minh City, Vietnam. *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 105, 2015b. , pp. 219–224. ISSN 09698043. DOI 10.1016/j.apradiso.2015.08.033.

LLANGARÍ DAQUILEMA, José Enrique, Modelado Hidráulico De La Red De Abastecimiento De Agua Potable Al Cantón Alausí, Provincia De Chimborazo-Ecuador. Diagnóstico De La Situación Actual Y Propuesta De Mejoras. [en línea], 2019. . Disponible en: <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/119124>.

MELINTESCU, A., CHAMBERS, S.D., CRAWFORD, J., WILLIAMS, A.G., ZORILA, B. and GALERIU, D., Radon-222 related influence on ambient gamma dose. *Journal of Environmental Radioactivity* [en línea], vol. 189, 2018. , pp. 67–78. ISSN 0265-931X. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.03.012>. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X18301334>.

MORATA RABAL, Gemma, *Determinación de aerosoles radiactivos con muestreadores de bajo caudal* [en línea]. Barcelona: s.n. 2016. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/98290>.

MOREIRA, Lucas, *Física isotópica e radiocarbono: conceitos, generalidades e a aplicação na datação de águas subterrâneas* [en línea]. Ceará: s.n. 2018. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/42167>.

MUÑOZ, María, *Medidas de Radiactividad en Aguas* [en línea]. Valladolid: s.n. 2018. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/1049/TFG-G2997.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

MUÑOZ SHUGULÍ, G.P., *Evaluación de la calidad del agua subterránea de Riobamba mediante el índice de calidad de agua ICA-NSF*. Ribamba: s.n. 2020.

MUÑOZ-PEDREROS, Andrés, La evaluación del paisaje: Una herramienta de gestión ambiental. *Revista Chilena de Historia Natural*, vol. 77, no. 1, 2004. , pp. 139–156. ISSN 0716078X. DOI 10.4067/s0716-078x2004000100011.

OIEA, 2020. Calidad del agua: detección de contaminantes mediante técnicas isotópicas . [en línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/temas/calidad-del-agua>.

OMS, *Guidelines for drinking-water quality, Volume 1 : Recommendations*. Geneva: World Health Organization. 2003. ISBN 9241546387.

OSCAR, •, PALACIOS-VÉLEZ, Luis, BERNARDO, •, ESCOBAR-VILLAGRÁN, Samuel and DE CORRESPONDENCIA, Autor, La sustentabilidad de la agricultura de riego ante la sobreexplotación de acuíferos. *Water Technology and Sciences* [en línea], vol. VII, no. 2, 2016. , pp. 5–16. [Consulta: 12 December 2021]. ISSN 0187-8336. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v7n2/2007-2422-tca-7-02-00005.pdf>.

OSORES, José, Contaminación Radiactiva Ambiental En El Neotrópico. *Biologist* [en línea], 2008., pp. 155–165. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <https://revistas.unfv.edu.pe/rtb/article/view/537/477>.

PERALTA VITAL, José Luis and GIL CASTILLO, Reinaldo, Hidrología isotópica, herramienta nuclear para la gestión sostenible del recurso hídrico. *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL* [en línea], vol. XXXVI, no. 1, 2015. , pp. 57–72. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v36n1/riha05115.pdf>.

RUBBIA, Carlo, *A Future for Thorium Power? Thorium Energy for the World*. Cham: Springer International Publishing, 2016. pp. 9–25.

SÁNCHEZ, Alcides Antúnez and TELLO, Lenin Lucas Guanoquiza, La contaminación ambiental en los acuíferos de Ecuador. *Revista Visión Contable* [en línea], no. 19, 2018. , pp. 64–101. DOI 10.24142/rvc.n19a4. Disponible en: <https://doi.org/10.24142/rvc.n19a4>.

TOLENTINO, Marina López, Isótopos y radioisótopos. *Vida Científica Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 4* [en línea], vol. 8, 2020. , pp. 33–36. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa4/article/view/6132/7377>.

TORRES ASTORGA, Romina, Uso de técnicas nucleares y asociadas para documentar procesos de redistribución de suelo e identificar las principales fuentes de sedimentos en una cuenca hidrográfica de la Región Central de Argentina. [en línea]. S.l.: 2019. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/81130>.

UNESCO, 2018. El agua subterránea en un medio ambiente cambiante. [en línea]. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <https://es.unesco.org/themes/garantizar-suministro-agua/hidrologia/agua-subterranea>.

UNSCEAR, Sources and Effects of Ionizing Radiation. . New York: 2020.

VASILYEVA, A.N. and STARKOV, O. v, Principle Of Natural And Artificial Radioactive Series Equivalency. [en línea]. Obninsk: s.n., 2001. [Consulta: 12 December 2021]. Disponible en: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20187076>.

WALLNER, G. and STEININGER, G., Radium isotopes and ²²²Rn in Austrian drinking waters. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 274, no. 3, 2007. , pp. 511–516. ISSN 0236-5731. DOI 10.1007/s10967-006-6939-4.

ANEXOS

ANEXO A: FOTOGRAFÍAS DE LAS FUENTES DE AGUA DEL CANTÓN CHUNCHI

Fotografías de las fuentes Bacún y Sagúan, descritas en el acápite 2.1.1.



Foto 1: Pozo Bacún.



Foto 2: Sagúan.

Anexo B: FOTOGRAFÍAS DE LAS FUENTES DE AGUA DEL CANTÓN ALAUSÍ

Fuentes de agua estudiadas en el acápite 2.1.2.



Fotos 3 y 4: Ingreso del agua a la planta de tratamiento desde Aypud y Chacaza.



Foto 5: Proceso de filtrado del agua proveniente de la vertiente Aypud.



Foto 6, 7 y 8: Piscinas de captación de agua, provenientes del tanque de reservorio Tixán.



Foto 9: Tanque reservorio Casual.



Foto 10 y 11: Tanque reservorio Plaza de Rastros.

Fotos 9, 10 y 11: Indican los tanques de reservorio del sitio Casual y los tanques reservorios del sitio Plaza de Rastro, que abastece de agua al camal de la Ciudad de Alausí.



Foto 12 Tanque reservorio de Chitaquies, conectado a la red principal.

Anexo C: FOTOGRAFÍAS DE LAS FUENTES DE AGUA DEL CANTÓN GUAMOTE.

Evidencia fotográfica de las fuentes analizadas en el acápite 2.1.3.



Fotos 14, 15 y 16: Planta de captación de las fuentes de Ambato Poggio y Chipochico.



Foto 17: Planta de tratamiento de San Juan Alto de Chacaza Matipanga.

**Anexo D: FOTOGRAFÍAS DE LAS FUENTES DE AGUA DEL CANTÓN
RIOBAMBA**

Fuentes de agua potable estudiadas en el acápite 2.1.4.

En Llio se encuentran 7 pozos de agua subterránea ubicados a 12 km de la ciudad de Riobamba.



Foto 18: Pozo Llio 1.



Foto 19: Pozo Llio 2.



Foto 20: Pozo Llio 4.



Foto 21: Pozo Llio 5.



Foto 22: Pozo Llio 6.



Foto 23: Pozo Llio 7.

La fuente de San Pablo es la más antigua de la ciudad de Riobamba está constituida por unos 200 ojos de agua, inaugurada en el año de 1912, es el primer sistema de captación de agua potable que se dirigió a la ciudad de Riobamba.



Foto 24: Ojos de Agua del pozo San Pablo.



Foto 25: Infraestructura del pozo San Pablo.



Foto 26: Pozo La Huerta.



Fotos 27 y 28: Pozo Servidores.



Fotos 29 y 30: Pozo las Hierbas y Pozo de la Saboya.



Fotos 31: Pozo de las Abras.



Foto 32: Pozo Maldonado.



Foto 33 y 34: Pozo el Estadio, para el abastecimiento de la Parroquia Yaruquies.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**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: 17 / 02 / 2022

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Shirley Adriana Samaniego León</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: <i>Ciencias</i>
Carrera: <i>Física</i>
Título a optar: <i>Biofísica</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: <i>Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.</i>

**LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE**

Firmado digitalmente por LEONARDO
FABIO MEDINA NUSTE
Nombre de reconocimiento (DN): c=EC,
o=BANCO CENTRAL DEL ECUADOR,
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE
INFORMACION-ECIBCE, l=QUITO,
serialNumber=0000621485,
cn=LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE
Fecha: 2022.02.17 16:32:09 -0500'



**0209-DBRA-UTP-
2022**