

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

*Trabajo de titulación previo a obtención del
título de Ingeniera Ambiental*

TRABAJO EXPERIMENTAL:

**EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE Ra-226 EN AGUA, EN EL TEJIDO
MUSCULAR Y ÓRGANOS DE *Oncorhynchus mykiss* (TRUCHA ARCOÍRIS),
MACROINVERTEBRADOS DE LOS RÍOS IRQUIS Y PORTETE, AZUAY-
ECUADOR**

AUTORA:

ROSSY ADRIANA PESÁNTEZ ANDRADE

TUTOR:

TONY JESÚS VILORIA ÁVILA, PhD

Cuenca - Ecuador

2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Rossy Adriana Pesántez Andrade con documento de identificación N° 0105623201, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo de titulación: **EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE Ra-226 EN AGUA, EN EL TEJIDO MUSCULAR Y ÓRGANOS DE *Oncorhynchus mykiss* (TRUCHA ARCOÍRIS), MACROINVERTEBRADOS DE LOS RÍOS IRQUIS Y PORTETE, AZUAY-ECUADOR**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de *Ingeniera Ambiental* en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autora me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, enero de 2019

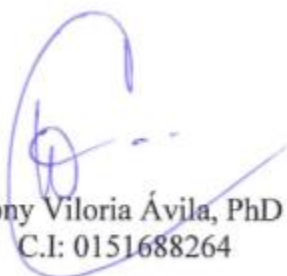


Rossy Adriana Pesántez Andrade
C.I: 0105623201

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE Ra-226 EN AGUA, EN EL TEJIDO MUSCULAR Y ÓRGANOS DE *Oncorhynchus mykiss* (TRUCHA ARCOÍRIS), MACROINVERTEBRADOS DE LOS RÍOS IRQUIS Y PORTETE, AZUAY-ECUADOR**, realizado por Rossy Adriana Pesántez Andrade obteniendo el *Trabajo Experimental* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, enero del 2019



Tony Vilorio Ávila, PhD
C.I: 0151688264

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo Rossy Adriana Pesántez Andrade con cedula de identidad N° 0105623201, autora del trabajo de titulación: **EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE Ra-226 EN AGUA, EN EL TEJIDO MUSCULAR Y ÓRGANOS DE *Oncorhynchus mykiss* (TRUCHA ARCOÍRIS), MACROINVERTEBRADOS DE LOS RÍOS IRQUIS Y PORTETE, AZUAY- ECUADOR**, certifico que el total contenido del *Trabajo Experimental* es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, enero del 2019



Rossy Adriana Pesántez Andrade
C.I: 0105623201

DEDICATORIA

La vida se contempla de varios retos y uno de ellos es la universidad. A lo largo de los años que estuve tras el cumplimiento de este reto, he atravesado y superado un sinnúmero de aprendizajes tanto en el ámbito académico como en lo personal. Por ello, este gran logro se lo dedico a mis pilares fundamentales de mi vida quienes son mis padres Arturo y María Eulalia quienes con todo el esfuerzo y amor me apoyaron incansablemente, a mi hermana Andrea y al pequeño ser de alegría, mi sobrino Mathías quien me incentiva a ser una mejor persona para lograr ser su ejemplo a seguir.

AGRADECIMIENTOS

Este gran logro y anhelo no lo hubiera alcanzado sin la ayuda de personas importantes que marcaron mi vida durante esta travesía, por ello quiero agradecer primero a Dios por bendecirme todos los días, además por darme la perseverancia y paciencia de superar todos los obstáculos que se atravesaron a lo largo de todo este tiempo y que con mi fe impuesta en este ser todopoderoso logré alcanzar cada peldaño para finalmente conseguir cristalizar una meta anhelada y necesaria la cual es titularme.

Agradezco a mi familia por apoyarme y principalmente a mis padres por haberme inculcado valores y enseñanzas para forjarme como la persona que soy actualmente, además por incentivarme a ser mejor ser humano y confiar en mí.

Los conocimientos y logros académicos no se pueden alcanzar sin la instrucción de seres quienes conocemos durante los años de la vida universitaria, es por ello que agradezco a mis Profesores y principalmente a mi tutor de tesis Tony Vilorio Ávila PhD quien fue una persona fundamental para el desarrollo del presente estudio, quien me brindó su tiempo y su instrucción académica para lograr consolidar un trabajo de calidad.

La vida universitaria se comprende de varias situaciones, entre ellas es conocer a personas quienes alegran tu existencia por esto agradezco principalmente a un ser especial quien es y fue mi apoyo durante todo este tiempo de realización de mi tesis quien me brindó incondicionalmente su amor, paciencia y ayuda. Agradezco también a todos mis amigos,

principalmente a mi grupo “La última y nos vamos” por hacer de mi paso por la universidad, una experiencia única y por forjar una amistad sincera y divertida.

RESUMEN

Según IAEA cualquier actividad que involucre minerales, tiene un potencial de aumentar la concentración de radioisótopos, es por ello que identifica a la extracción de minerales dentro de los doce tipos de industrias que deben tener un control a la exposición de fuentes naturales. UNSCEAR afirma que el aumento de radionucleidos causa un desequilibrio ecológico, debido a que los animales son capaces de bioacumularlos e introducirlos a la cadena trófica. Por lo tanto, se evaluaron los niveles de concentración de $^{226}\text{Radio}$ en la trucha arcoíris, macroinvertebrados y agua de los ríos Irquis y Portete en la concesión minera Loma Larga, con la finalidad de generar una línea base radio-ecológica. Para ello el estudio se fundamentó en dos técnicas, centelleo de celda Lucas a través del Pylon AB6-A y “*Can Technique*”. Mediante las cuales se obtuvieron que la trucha bioacumuló el 95,21 % en los huesos y órganos; además los macroinvertebrados-sustrato presentaron un rango de concentración de $^{226}\text{Radio}$ entre 0,65 a 1,29 Bq/kg en el río Irquis y en el río Portete existió concentraciones entre de 1,11 a 19,28 Bq/kg; finalmente las muestras de agua en los tres puntos estratégicos a lo largo del cauce del río Irquis oscilaban entre 37,27 a 119,07 mBq l⁻¹ y del río Portete fluctuó entre 43,49 a 146,39 mBq l⁻¹.

Este trabajo está estructurado por generalidades, un marco referencial seguido de un metodológico para posteriormente generar los análisis de resultados y finalmente presentar conclusiones y recomendaciones.

Palabras clave: $^{226}\text{Radio}$, trucha arcoíris, macroinvertebrados, agua, ríos, minería

ABSTRACT

According to the IAEA, any activity involving minerals has a potential to increase $^{226}\text{Radium}$ concentration, that is why it identifies the extraction of minerals within the twelve types of industries that must have control over the exposure of natural sources. UNSCEAR states that the increase in radionuclides causes an ecological imbalance, because animals are able to bioaccumulate them and introduce them into the food chain. Therefore, the concentration levels of $^{226}\text{Radium}$ were evaluated in rainbow trout, macroinvertebrates and water from the Irquis and Portete rivers in *Loma Larga* mining concession, in order to generate a radio-ecological baseline. For this, the study was based on two techniques known as Lucas cell scintillation through the Pylon AB6-A and Can Technique. By means of which it was obtained that the trout bioaccumulated 95,21% in the bones and organs; In addition, the macroinvertebrates-substrate showed a concentration range of $^{226}\text{Radium}$ between 0,65 a 1,29 Bq/kg in the Irquis river and in the Portete river there were concentrations between 1,11 a 19,28 Bq/kg; finally, the water samples in the three strategic points along the Irquis river ranged from 37,27 to 119,07 mBq l⁻¹ and the Portete river fluctuated between 43,49 to 146,39 mBq l⁻¹.

This research is structured by generalities, a referencial framework followed by a methodological one to subsequently generate the analysis of results and finally present conclusions and recommendations.

Key words: $^{226}\text{Radium}$, rainbow trout, macroinvertebrates, water, rivers, mining.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	VI
ABSTRACT	VII
CAPÍTULO I	1
1. GENERALIDADES	1
1.1. PROBLEMÁTICA.....	1
1.2. DELIMITACIÓN.....	4
1.2.1. DELIMITACIÓN ESPACIAL	4
1.2.2. DELIMITACIÓN TEMPORAL	4
1.2.3. DELIMITACIÓN SECTORIAL	4
1.3. EXPLICACIÓN DEL PROBLEMA.....	5
1.4. OBJETIVOS	5
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	5
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
CAPÍTULO II.....	7
2. MARCO REFERENCIAL	7
2.1. ANTECEDENTES.....	7
2.2. RADIATIVIDAD	10
2.2.1. FUENTES DE RADIATIVIDAD	10
2.2.2. TIPOS DE RADIACIÓN	12
2.2.3. DESINTEGRACIÓN RADIATIVA	17
2.2.4. UNIDADES DE RADIACIÓN.....	20
2.2.5. INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN IONIZANTE CON EL MEDIO BIOLÓGICO	23
2.3. COMPORTAMIENTO DEL ²²⁶ RADIO EN EL AMBIENTE	29
2.3.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL ²²⁶ RADIO	29
2.3.2. INTERACCIÓN DE ²²⁶ RADIO EN EL SUELO	31
2.3.3. INTERACCIÓN DE ²²⁶ RADIO EN EL AGUA	35
2.3.4. INTERACCIÓN DEL ²²⁶ RADIO CON LA BIOTA.....	39
2.3.5. ²²⁶ RADIO EN LA MINERÍA.....	41
CAPÍTULO III.....	44
3. MARCO METODOLÓGICO	44
3.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	44

3.1.1.	UBICACIÓN:.....	44
3.1.2.	MEDIO FÍSICO	46
3.1.3.	MEDIO BIÓTICO.....	50
3.2.	RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	52
3.2.1.	RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA SUPERFICIAL	52
3.2.2.	RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE MATRIZ BIOLÓGICA.....	55
3.3.	PREPARACIÓN DE MUESTRAS	57
3.4.	CAN TECHNIQUE –DETECTOR LR-115 TIPO II.....	59
3.5.	PROCESO QUÍMICO DE REVELADO DE LOS DETECTORES LR-115 TIPO II	61
3.6.	CÁLCULO DE EXHALACIÓN DE ²²² RADÓN POR MASA Y ÁREA Y CONCENTRACIÓN DE ²²⁶ RADIO.....	63
3.7.	MEDICIÓN DE ²²⁶ RADIO DE AGUA POR CENTELLEO DE CELDA LUCAS MEDIANTE PYLON AB6-A.....	66
3.7.1.	DESGASIFICACIÓN AL VACÍO DE LA MUESTRA DE AGUA-VACUUM WATER DEGASSING SYSTEM	68
3.7.2.	CÁLCULO DE ²²⁶ RADIO EN AGUA	72
CAPÍTULO IV		78
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	78
4.1.	RESULTADOS.....	78
4.1.1.	CONCENTRACIÓN DE ²²⁶ RADIO EN LA TRUCHA ARCOÍRIS	78
4.1.2.	CONCENTRACIÓN DE ²²⁶ RADIO EN MACROINVERTEBRADOS	83
4.1.3.	CONCENTRACIÓN DE ²²⁶ RADIO EN EL AGUA DE LOS RÍOS IRQUIS Y PORTETE	90
4.2.	DISCUSIÓN	98
CAPÍTULO V.....		104
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
5.1.	CONCLUSIONES	104
5.2.	RECOMENDACIONES	106
BIBLIOGRAFÍA.....		108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Representación de la onda electromagnética y sus componentes.....	13
Figura 2 Representación del Espectro Magnético.....	14
Figura 3 Capacidad de Penetración de las Radiaciones Ionizantes.....	16
Figura 4 Cadena de Desintegración Radiactiva del ²³⁸ Uranio.....	18
Figura 5 Gráfico de equilibrio secular de un radioisótopo.....	20
Figura 6: Manifestaciones del organismo frente a la irradiación.....	28
Figura 7 El Comportamiento Ambiental del ²²⁶ Radio.....	43
Figura 8 Mapa de Ubicación del Proyecto Loma Larga.....	45
Figura 9 Variación del Clima en el Proyecto Loma Larga.....	47
Figura 10 Geología del Proyecto Loma Larga.....	49
Figura 11 Estaciones de monitoreo de flujo y sub-captaciones.....	50
Figura 12 Vegetación característica de la zona.....	51
Figura 13 Ubicación de puntos de muestreo.....	53
Figura 14 Contenedor de vidrio para obtención de muestra de agua de 450 ml y 250 ml.....	55
Figura 15 Esquema de redes de enmalle.....	56
Figura 16 Recolección de truchas arcoíris.....	56
Figura 17 Red tipo Surber.....	57
Figura 18 Separación de parte de las truchas y pesaje.....	57
Figura 19 Deshidratación de muestras biológicas.....	58
Figura 20 Pesaje y triturado de muestras biológicas.....	59
Figura 21 Disposición de muestras biológicas y exposición al detector LR-115 tipo II.....	60
Figura 22 Inmersión de los detectores en la solución química y reposo en baño maría.....	61
Figura 23 a. Lavado en un agitador magnético y b. secado de los detectores LR-115.....	62
Figura 24 Trazas nucleares en un campo de visión.....	63
Figura 25 Celda Lucas 600A.....	67
Figura 26 Desgasificación de la muestra de agua.....	71
Figura 27 Monitor AB6-A y celda 600 A.....	72
Figura 28 Purga de la Celda Lucas 600A.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Unidad de la Actividad Radiactiva.....	21
Tabla 2: Unidad de la Dosis Absorbida.....	21
Tabla 3: Unidad de la Dosis Equivalente (H).....	22
Tabla 4: Factores de Ponderación de la Radiación.....	22
Tabla 5: Factores de Ponderación del Tejido.....	23
Tabla 6 Efectos deterministas en órganos o tejidos.....	27
Tabla 7 Concentración de ²²⁶ Radio en varias rocas.....	31
Tabla 8 Concentración de ²²⁶ Radio dependiendo del Tipo de Suelo.....	34
Tabla 9 Concentración de ²²⁶ Radio en diferentes ríos en el mundo.....	36
Tabla 10 Factor de bioacumulación de ²²⁶ Ra en diferentes especies de peces.....	41
Tabla 11 Coordenadas de los puntos de muestreo.....	54
Tabla 12 Resultados obtenidos en el primer muestreo de las truchas arcoíris en el río Irquis.....	81

Tabla 13	Resultados obtenidos en el segundo muestreo de las truchas arcoíris en el río Irquis	82
Tabla 14	Resultados obtenidos en el primer muestreo de macroinvertebrados en el Río Irquis.....	85
Tabla 15	Resultados obtenidos del segundo muestreo de macroinvertebrados en el Río Irquis	86
Tabla 16	Resultados Obtenidos de cada punto de muestreo de macroinvertebrados en el Río Portete	89
Tabla 17	Concentración de $^{226}\text{Radio}$ de los tres puntos de muestreo en el río Irquis	91
Tabla 18	Concentración de $^{226}\text{Radio}$ en los tres puntos de muestreo del río Portete.....	95
Tabla 19	Parámetros físico-químicos del río Irquis y Portete	97

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	Exponencial de Desintegración Radiactiva	18
Ecuación 2	Periodo de Semidesintegración	19
Ecuación 3	Vida media de un radionucleido.....	19
Ecuación 4	Velocidad de desintegración radiactiva	19
Ecuación 5	Coeficiente de distribución.....	33
Ecuación 6	Coeficiente empírico de partición.....	34
Ecuación 7	Coeficiente de dispersión vertical.....	37
Ecuación 8	Coeficiente de dispersión horizontal	38
Ecuación 9	Transporte de un radionucleido por la corriente del agua	38
Ecuación 10	Factor de bioacumulación.....	40
Ecuación 11	Densidad de Trazas.....	63
Ecuación 12	Exposición de $^{222}\text{Radón}$ Integrado.....	64
Ecuación 13	Exhalación de $^{222}\text{Radón}$ por Área	64
Ecuación 14	Exhalación de $^{222}\text{Radón}$ por masa.....	64
Ecuación 15	Tiempo efectivo de exposición.....	65
Ecuación 16	Concentración de $^{222}\text{Radón}$	65
Ecuación 17	Concentración de $^{226}\text{Radio}$	66
Ecuación 18	Concentración de $^{226}\text{Radio}$ en agua	73
Ecuación 19	Recuentos netos por minuto.....	73
Ecuación 20	Recuentos totales por minuto	73
Ecuación 21	Total de cuentas	74
Ecuación 22	Factor de corrección de la descomposición	75
Ecuación 23	Tiempo Delta	75
Ecuación 24	Tiempo en el punto medio de medición	76
Ecuación 25	Factor de corrección de crecimiento.....	76
Ecuación 26	Tiempo Delta 1	76

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Comparación de Concentración de $^{226}\text{Radio}$ en la trucha arcoíris perteneciente a los dos muestreos.....	80
Gráfico 2	Porcentaje de $^{226}\text{Radio}$ presente en las truchas arcoíris.....	80
Gráfico 3	Concentración de $^{226}\text{Radio}$ en el Río Irquis (29 junio del 2018)	84

Gráfico 4 Concentración de ^{226}Ra en el Río Irquis (13 julio del 2018).....	84
Gráfico 5 Concentración de ^{226}Ra en macroinvertebrados de los ríos Irquis y Portete	88
Gráfico 6 Media de concentraciones de ^{226}Ra en el rio Irquis y Portete en los tres puntos estratégicos	97

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. PROBLEMÁTICA

Los seres humanos y otros animales pueden estar expuestos a metales pesados radiactivos a través de la ingestión, inhalación y absorción a través de la piel. ^{238}U Uranio y sus elementos secundarios ^{234}Th Torio, ^{234}Pa Protactinio, ^{234}U Uranio, ^{230}Th Torio, ^{226}Ra Radio, ^{222}Rn Radón, ^{218}Po Polonio, ^{218}Pb Plomo, ^{214}Bi Bismuto, ^{214}Po Polonio, ^{210}Pb Plomo, ^{210}Bi Bismuto, ^{210}Po Polonio son emisores de partículas alfa y beta que causan daño a los tejidos internos y el ADN de los genes (Durakovic, 1999)

Los materiales radiactivos de origen natural (NORM) están presentes desde la formación de la Tierra. En el ambiente se encuentran en niveles bajos lo que los hace inocuos para la salud humana. Sin embargo, debido a la actividad antropogénica como la minería o los desastres naturales como los terremotos causan un aumento de niveles de estos materiales en el que resulta un problema grave (Nour, Gabar, & Arabi, 2005). Según *United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation UNSCEAR* (2010) el aumento de los radionucleidos causa un desequilibrio que afecta a matrices ambientales como las plantas y animales, estos tienen la capacidad de bioacumular por lo tanto se introduce a la cadena trófica causando una inestabilidad en el ecosistema.

La Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (USEPA sus siglas en inglés) reconoció en 1987 que los problemas relacionados con los residuos mineros pueden calificarse como superados únicamente por el calentamiento global y el agotamiento del ozono estratosférico en términos de riesgo ecológico. La liberación al ambiente de desechos mineros puede

provocar una destrucción profunda, generalmente irreversible de los ecosistemas (Durand, 2012)

El impacto económico y social de la minería es muy relevante a lo largo del mundo como en Ecuador, según el Ministerio de Minería determina que existe una inversión extranjera de alrededor de US\$ 1 000 millones destinados a la exploración y desarrollo de proyectos mineros durante el 2018 (Latinominería, 2018). El crecimiento exponencial de esta actividad genera un desarrollo para la industria minera del país, así como también un ingreso económico pero los costos ambientales son altos, producidos por los NORM que se acumulan potencialmente en este tipo de industrias. La gran cantidad de residuos generados en la fase de extracción y procesamiento de los minerales, pueden tener altas concentraciones de radiactividad natural, estos niveles dependen de las formaciones geológicas y el tipo de material extraído (Salinas Mantilla, 2016).

Según *International Atomic Energy Agency* IAEA (2006) establece que cualquier operación minera u actividad en el que un mineral esté involucrado, tiene el potencial de aumentar la dosis efectiva que una persona puede recibir proveniente de fuentes naturales como resultado de la exposición a los NORM contenido o liberado de dicho material.

Los sistemas acuáticos contienen NORM, los cuales son responsables de una fracción de la dosis que recibe el ser humano del ambiente. La radiactividad en el agua proviene esencialmente de las emisiones alfa, beta y gamma de los radionucleidos de las series de desintegración del $^{238}\text{Uranio}$ y el $^{232}\text{Torio}$, en ambientes no contaminados antropogénicamente. Para el agua subterránea, los principales isótopos radiactivos que se encuentran son los de $^{238}\text{Uranio}$, $^{226}\text{Radio}$ y $^{222}\text{Radón}$, mientras que sus concentraciones varían dependiendo principalmente de la historia geoquímica del agua. La bioacumulación

de radionucleidos naturales en los organismos acuáticos es el foco de estudios radioecológicos, debido a que estos radionucleidos actúan como una fuente primaria de la dosis de radiación en las cadenas alimentarias acuáticas que conducen al hombre (Stewart, Fowler, & Fisher, 2008)

Los problemas ambientales asociados con NORM en las minas de minerales sólidos y su procesamiento ocurren en el proceso de perforación, lixiviación, manejo, almacenamiento, transporte de minerales y el uso de equipos contaminados o medios de desecho sin controles. Estos generalmente conducen a la propagación de NORM contaminando el ambiente, lo que resulta en una posible exposición a la radiación de los miembros del público (Innocent, Onimisi, & Jonah, 2013).

Las actividades mineras no han estado sujetas a un control regulatorio radiológico y, por lo general, existe un escaso conocimiento de los riesgos radiológicos y los niveles de exposición a los NORM en las áreas mineras (Ademola, Bello , & Adejumobi, 2014)

Es importante llevar a cabo estudios de línea base respecto a estos elementos radiactivos como el ^{226}Ra , considerando que la actividad minera de explotación puede alterar significativamente estos niveles, los cuales a su vez pueden influir en los niveles de concentración de los NORM en la biota de los ríos. Este estudio genera un beneficio tanto a la comunidad aledaña que habita cerca de la actividad minera Loma Larga como también a dicho proyecto. La importancia de este trabajo radica en el hecho de que, toda actividad antropogénica genera un cierto nivel de contaminación, y por ende es fundamental llevar a cabo un monitoreo permanente, con el fin de evitar daños irreversibles tanto al ambiente como a los habitantes del sector, y cerciorarse que las actividades inherentes al proyecto minero se realicen de manera responsable.

1.2. DELIMITACIÓN

1.2.1. DELIMITACIÓN ESPACIAL

La investigación se realizó en un proyecto minero denominado Loma Larga ubicado al sur del Ecuador, en la provincia del Azuay en las parroquias Chumblín, San Gerardo y Victoria del Portete a una altitud de 3 500 a 3 900m.s.n.m.

La actividad minera actualmente se encuentra en fase de exploración avanzada, este proyecto se basa principalmente en la extracción de oro, plata y cobre. El tiempo de explotación estimado es de 12 años, el proyecto ocupa 40 hectáreas de las 7 960 ha que forman parte de la concesión.

1.2.2. DELIMITACIÓN TEMPORAL

Esta investigación se realiza durante el periodo mayo-diciembre del 2018, en el cual se ejecutarán las actividades de preparación de equipos, la recolección y procesamiento de muestras, grabado de los detectores, medición de muestras de agua, para así analizar y generar los resultados obtenidos. Los dos muestreos que se ejecutaron fueron el 29 de junio del 2018 y el 13 de julio del mismo año.

1.2.3. DELIMITACIÓN SECTORIAL

La investigación que se realiza es de interés social e institucional debido a que está dirigido a instituciones como el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable a través de la subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN), al Ministerio de Minería quien es el ente rector que impulsa y garantiza el desarrollo de la minería mediante el aprovechamiento responsable de los recursos minerales. Además, está dirigido a la comunidad aledaña donde se encuentra el proyecto minero, y a la población en general que

tenga interés sobre los niveles de concentraciones de los NORM y su incidencia en el agua, animales y seres humanos.

1.3. EXPLICACIÓN DEL PROBLEMA

Las concentraciones de los NORM generalmente están presentes en niveles bajos en el ambiente, dependiendo de la composición del suelo y el comportamiento geoquímico que tenga cada radioisótopo. Dichas concentraciones se elevan cuando las actividades antropogénicas no se realizan de la manera adecuada y conllevan a una serie de consecuencias negativas tanto para el ambiente como para la salud humana.

La biota de los ríos puede ser afectada debido a la alteración de los niveles de concentración de los NORM por la actividad minera. Cabe recalcar que esta investigación desea marcar un precedente para cuando dicha actividad se encuentre en la fase de explotación y así poder comparar los cambios de concentración de los radioisótopos, por lo tanto, se plantea una pregunta de investigación que se basa en:

¿Cuáles son los niveles de concentraciones de ^{226}Ra en los peces, el agua y macroinvertebrados de los tres puntos estratégicos de los ríos Irquis y Portete, previo a la fase de explotación del proyecto minero Loma Larga?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar los niveles de ^{226}Ra en agua, en el tejido muscular y órganos de *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoíris), macroinvertebrados de los ríos Irquis y Portete, Azuay- Ecuador

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.4.2.1. Calcular la concentración de Radio-226 de los órganos y músculos en *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoiris).
- 1.4.2.2. Calcular la concentración de Radio -226 de los macroinvertebrados.
- 1.4.2.3. Medir la exhalación de Radón-222 en el agua.

CAPÍTULO II

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. ANTECEDENTES

Según (IAEA) en 1937 en la región fronteriza de Alemania y Checoslovaquia donde se ejecutaban actividades de extracción, elaboración y tratamiento en minas de Uranio, en el que tiempo después hubo una incidencia de personas que padecían cáncer de pulmón y los estudios que se realizaron dieron a conocer que se trataba por un envenenamiento a causa de sustancias radiactivas debido a la negligencia con la que se ejecutaban estas labores.

Investigaciones realizadas dan a conocer que el peligro no se centra únicamente en las minas de Uranio, se presenta también en otro tipo de minas y en ciertos casos se encuentran en un grado de concentración suficiente para provocar enfermedades profesionales. El proceso de extracción en las minas para la producción de los metales produce una gran cantidad de residuos tanto sólidos como líquidos, estos se generan debido a que los minerales de valor son una pequeña fracción en cambio, una gran proporción de la extracción son materiales que no son utilizados directamente (Lopez , 2012).

Según la Organización Mundial de la Salud OMS (2016) “la primera vez que se detectó un aumento en la tasa de cáncer de pulmón fue entre los trabajadores de minas de Uranio expuestos a altas concentraciones de gas Radón”, también revela que el Radón es la segunda causa más importante de cáncer de pulmón después del tabaco.

El nivel de NORM en las actividades mineras depende de las formaciones geológicas y la región en la que se encuentra, es esencial obtener un control regular de los niveles de

concentraciones de los radionucleidos para evitar que la contaminación afecte a los recursos hídricos llegando a ser un daño irreparable por lo que la vida media radiactiva es muy larga del $^{226}\text{Radio}$.

Para evaluar los niveles de concentraciones de $^{226}\text{Radio}$ en peces, macroinvertebrados y agua en la concesión minera Loma Larga, es conveniente referir la consulta documental de investigaciones realizadas que guarden relación con los objetivos propuestos en este estudio. Tal es el caso que Castro, Palacios, Urbani, León y Sajo-Bohus (1997) realizaron un estudio de **Radón en Agua Potable del Litoral Central (D.F.) y sus Posibles Efectos sobre la Salud de la Población**, mediante el análisis de 42 muestras de aguas procedente de fuentes de ríos, tuberías de la red de acueductos y dos manantiales de aguas termales, utilizando una celda Lucas acoplada a un sistema de conteo Pylon AB-5. Los resultados que se obtuvieron de este estudio señalan que los ríos que tenían masas graníticas contenían una concentración entre 0,3 y 5,3 Bq l⁻¹, niveles que son más elevados a comparación de las otras fuentes analizadas. Se concluyó también que Urama que presentó una concentración 5,3Bq l⁻¹ presenta un riesgo de contraer cáncer de pulmón estimando una probabilidad de 45 casos por millón de personas expuestas por año.

En 1998 (Clulow, Davé, Lim, & Avadhanula) ejecutaron un estudio de **Radio-226 en agua, sedimentos y peces de lagos cerca de la ciudad de Elliot Lake, Ontario, Canadá**, revelaron que los niveles medios de este radionucleido oscilaban en 76mBq l⁻¹ en el agua del lago más afectado y en el lago de control a <10 mBq l⁻¹, en relación a los estudios en los peces se determinó que existe una mayor concentración de $^{226}\text{Radio}$ en el tejido óseo que en el músculo.

En (2011) se publica un estudio denominado **Radionúclido natural (U y ^{226}Ra) en agua, sedimentos, peces y especies de plantas en el medio ambiente acuático alrededor del sitio de procesamiento de mineral y mineral de uranio en Jaduguda, India**. En este trabajo se destaca que la acumulación de elementos radiactivos en las plantas acuáticas y los peces puede llegar a la cadena alimentaria con el fin de determinar estos niveles de concentraciones, se recolectaron en 3 puntos estratégicos muestras, en aguas arriba del río Juria, punto de mezcla de Juria-Gara y en el punto de descarga del efluente aguas abajo en el río Gara, a su vez la recolección de sedimentos, peces y plantas acuáticas en el que el procesamiento de dichas muestras fue deshidratarlas e incinerarlas a una temperatura de 110°C durante 24 horas para el posterior análisis de los radionucleidos. Los análisis realizados en peces revelan que la dosis de ingestión es de $1,1\mu\text{Sv y}^{-1}$ y además se establece que existe mayor cantidad de concentración de $^{226}\text{Radio}$ en el punto 2, Río Juria-Gara.

Salman y Al-Khalifa en (2013) realizaron una **Determinación de la concentración de actividad de radón en peces locales e importados de la Gobernación de Basora / (Iraq) mediante el uso de la técnica SSNTD**, mediante el muestreo de los dos tipos de peces, estos fueron sometidos durante 4 horas a temperaturas de 270°C , sus cenizas se colocaron en envases plásticos cilíndricos expuestos a detectores de trazas nucleares de estado sólido (SSNTD), después de exponerlos durante 3 meses se revelaron químicamente y obtuvieron que los niveles de concentración de $^{222}\text{Radón}$ estaban dentro del nivel permisible recomendado por la ICRP (1987) para alimentos, estas concentraciones variaron entre los peces locales de $309,3 \text{ Bq/m}^3$ a $1\,600 \text{ Bq/m}^3$ y en los peces importados de $507,3 \text{ Bq/m}^3$ a $1\,100 \text{ Bq/m}^3$.

Un **Análisis de ^{238}U , ^{232}Th , ^{222}Rn y ^{220}Rn en muestras de pescado marino fresco y en conserva utilizando detectores de pista nuclear de estado sólido y las dosis de radiación alfa resultantes para consumidores adultos** realizado por (Misdaq, Aitayoub, & Chaouqi, 2018) demuestra que la dosis total de radiación alfa para los consumidores de diferentes especies de peces en Marruecos es de $8,5 \mu\text{Sv y}^{-1}$ menor que el valor medio mundial ($0,2$ a $0,8 \text{ mSv y}^{-1}$).

2.2. RADIATIVIDAD

Henri Becquerel, físico francés descubrió en 1896 la radioactividad, debido al estudio de los minerales de uranio a través del cual se presenció que estos emiten radiaciones. A raíz de este hecho, se produjo cambios significativos en el conocimiento de varias disciplinas como la física, química, ambiente, salud, biología, industrias, alimentos, medicina, entre otras. Posteriormente finales del siglo XIX Pierre y Marie Curie realizaron estudios sobre los minerales de uranio y torio donde descubrieron dos elementos como el polonio y el radio. Se demostró que dichos elementos tienen una propiedad de emitir energía en forma de radiación que al desintegrarse Curie la denominó “radiactividad” (Bulbulian & Rivero Espejel, 2012).

La radiactividad es un fenómeno físico espontáneo que se caracteriza por la desintegración de los núcleos atómicos inestables, emitiendo gran cantidad de energía en forma de radiaciones ionizantes. El ritmo de emisión, el tipo y la energía de las radiaciones emitidas son característicos de cada elemento.

2.2.1. FUENTES DE RADIATIVIDAD

Los seres humanos estamos expuestos a la radiación tanto de forma natural como artificial; la radiactividad natural es la única fuente que ha existido desde el origen de la Tierra

procedentes del espacio (radiación cósmica) , y también asociadas en el sustrato o en la corteza terrestre (radiación terrestre) en cambio, la radiactividad artificial como su nombre lo indica fue producida o creada por el hombre hace aproximadamente un siglo con el fin de emplearlos en aplicaciones industriales, médicas así como también para la investigación.

- **Radiactividad natural**

La radiactividad natural es la fuente principal de radiación a la que está expuesto el hombre y proviene de partículas principalmente de protones cargados de energía desde el espacio exterior y también del Sol denominándola como **radiación cósmica**.

Las dosis de radiación cósmica varían conforme a los siguientes factores:

- Las partículas que ingresan a la atmósfera se ven afectadas por el campo magnético terrestre, lo que resulta que lleguen más cerca de los polos que en el ecuador, por ende, la dosis aumenta con la latitud.
- La altitud es otro factor que influye en la tasa de dosis de radiación cósmica debido a que cuando dichas partículas penetran la atmósfera, surgen reacciones nucleares que las van absorbiendo, por ello se reducen a medida que la altura disminuye.

Tomando en cuenta los factores de variabilidad que afectan a la radiación cósmica, la tasa de dosis efectiva anual a nivel del mar según el UNSCEAR (2000) calcula un promedio de 0,4 mSv/año.

Además de la radiación cósmica existen elementos radiactivos naturales presentes en los materiales de la corteza terrestre, estos son el Uranio (^{238}U) y Torio (^{232}Th) que existen en la Tierra desde su formación dado sus muy largos períodos de semidesintegración (Ver sección 2.2.4.). Estos radionucleidos naturales liberan una energía que aporta al

mantenimiento de la temperatura interna de la Tierra por lo tanto, esta es la **radiación terrestre** (Gonzalez Neila, 2008).

El ^{238}U Uranio como uno de los elementos principales de la radiación terrestre es el progenitor de una larga cadena de elementos radiactivos que debido a su decaimiento alcanza una serie de productos, entre ellos da lugar a un gas radiactivo denominado que se transporta hasta la atmósfera emitiendo así radiación al ser humano. El producto final de la cadena de desintegración a la cual pertenece este radionucleido natural es un elemento estable denominado el ^{206}Pb Plomo.

La dosis de radiación terrestre absorbida también varía de acuerdo a factores puntuales como:

- La geología de la zona debido a que existen lugares en donde el suelo contiene mayores concentraciones de elementos radioactivos tal es el caso en Kerala (India) y también en partes de Brasil y Francia.
- Existen materiales utilizados para la construcción de los edificios como el hormigón, granito y estos contienen concentraciones relativamente altas de radionucleidos naturales según el tratamiento que se ejecute en ellos.

Según UNSCEAR (2000) la dosis media efectiva anual emitida por la radiación terrestre es 0,5 mSv considerando los factores de variabilidad.

2.2.2. TIPOS DE RADIACIÓN

Como se mencionaba en el apartado anterior todos los seres humanos, animales y plantas estamos expuestos a radiaciones constantes, las cuales no las podemos percibir a excepción de la luz visible, ahora bien, se le denomina radiación al fenómeno físico que emite una

cantidad de energía a un cuerpo mediante ondas electromagnéticas o partículas atómicas, por lo tanto, existen dos tipos de energía o radiación que son:

1. Radiación electromagnética

Es la propagación de energía mediante ondas electromagnéticas, estas ondas radican en la propagación de una doble vibración; de un campo magnético y campo eléctrico, no requieren de un medio para transportarse. Estas viajan siempre a una misma velocidad (300 000 km/s) y se diferencian en función a su longitud de onda o frecuencia.

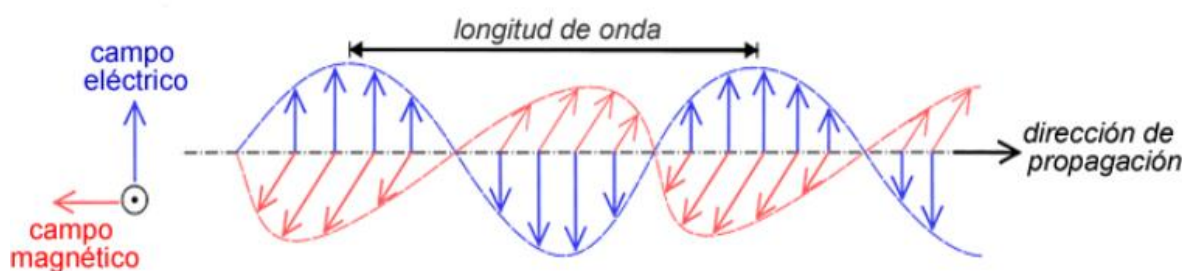


Figura 1 Representación de la onda electromagnética y sus componentes.
Fuente: (Fonrouge, 2015)

La radiación electromagnética se ejecuta gracias al tipo de partícula de la que está compuesta, el fotón, esta partícula carece de masa y carga eléctrica. La ausencia de masa hace que se transporte a la velocidad de la luz y que nunca se detenga. La carencia de carga eléctrica la convierte en no-ionizante por lo que por sí sola es incapaz de alterar el equilibrio de carga eléctrica por donde se transporte (Plaza, s.f.).

Para diferenciar los tipos de ondas se utiliza el espectro electromagnético en el que se visualiza desde las ondas de mayor longitud como la radio hasta las de menor longitud que son los rayos gamma (Ver Figura 2). El espectro magnético está en función de la longitud de onda y la frecuencia.

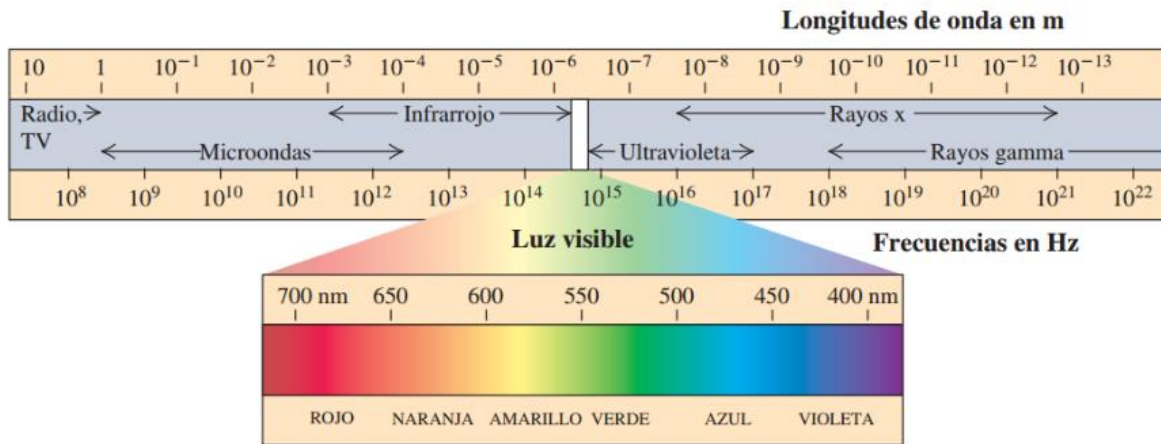


Figura 2 Representación del Espectro Magnético.
Fuente: (Fonrouge, 2015)

2. Radiación corpuscular

Es un tipo de radiación que emite energía mediante la propagación de partículas subatómicas que, a diferencia de las electromagnéticas, estas están asociadas a una masa determinada y se transportan en línea recta a gran velocidad, pero nunca superan los 300 000 km/s.

Las partículas capaces de emitir este tipo de radiación son:

- Partículas alfa,
- Partículas beta,
- Neutrones.

Un átomo cuando tiene el número de electrones igual al número de protones se le denomina átomo neutro (sin carga eléctrica) u estable, pero cuando existe una desigualdad entre la cantidad de protones y electrones, se habla de un **ion**, considerándolo un átomo con carga eléctrica u átomo inestable. Entonces, el proceso de emisión de esta carga eléctrica de las partículas o las radiaciones electromagnéticas (fotones) que interactúan con otros átomos o moléculas liberando electrones, se denomina **ionización**.

➤ Radiaciones Ionizantes

Las radiaciones corpusculares como algunas radiaciones electromagnéticas tienen la capacidad de ionización, por ende, emiten energía suficiente que provoca reacciones, cambios químicos o hasta genéticos en las células capaces de modificar la estructura atómica del material con el que interaccionan. Estas radiaciones se les llama **radiaciones ionizantes**.

Las radiaciones ionizantes se clasifican en:

➤ Radiaciones corpusculares:

- **Radiación alfa:** Emisión de partículas constituidas por dos protones (carga positiva) y dos neutrones (carga neutra) generando el núcleo atómico Helio.
- **Radiación beta:** Existen dos tipos, la radiación beta negativa y beta positiva, estas contienen una energía más elevada a las radiaciones alfa y su capacidad de penetración es mayor.
- **Neutrones:** La emisión de energía y la capacidad de penetración es elevada. Sus partículas contienen neutrones que son generadas en reactores nucleares y aceleradores de partículas, por lo que no existe fuentes naturales de dicha radiación.

➤ Radiaciones electromagnéticas:

- **Radiaciones Gamma:** Conjunto de ondas electromagnéticas que no contiene ni masa ni carga, su longitud de onda es muy corta provoca que tenga un gran poder de penetración.

- **Rayos X:** Al igual que las radiaciones gamma posee una longitud de onda corta y su capacidad de ionización es mínima.

Las radiaciones ionizantes tienen capacidad de penetración, por ejemplo, las radiaciones alfa recorren pocos centímetros y puede ser detenida por una hoja de papel, las radiaciones beta transportan un par de metros hasta alcanzar madera o vidrio, en cambio las radiaciones gama tienen un elevado potencial de penetración que es detenido por materiales como plomo u hormigón (Ver figura 3).

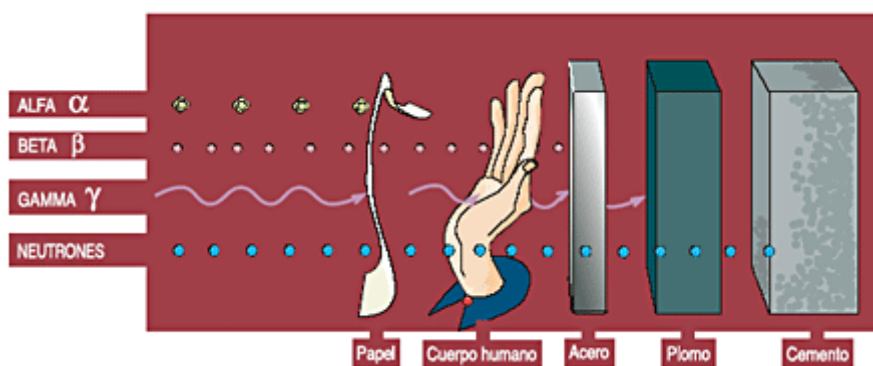


Figura 3 Capacidad de Penetración de las Radiaciones Ionizantes

Fuente: (Foro Nuclear, 2010)

2. Radiación no Ionizante

Son aquellas radiaciones electromagnéticas formadas por fotones de frecuencia media y baja (Ver figura 2). Estas se diferencian de la radiación ionizante debido a que no poseen la energía suficiente para ionizar las moléculas con las que interactúan, simplemente producen excitaciones electrónicas.

Las radiaciones no ionizantes producen un efecto térmico, fotoquímico y electromagnético, mas no, modifica la composición interna del átomo. Este tipo de radiaciones son:

- Radiación Ultravioleta (UV),
- Luz Visible,

- Radiación Infrarroja,
- Láser,
- Microondas,
- Radiofrecuencia.

2.2.3. DESINTEGRACIÓN RADIATIVA

Existen átomos con núcleos estables e inestables, estos últimos son aquellos que contienen carga eléctrica que son capaces de ionizar o liberar energía, modificando el cuerpo o elemento con el que interactúan. Este proceso de liberación de energía en forma de radiación es una característica de los átomos inestables denominándolos también **radionucleidos o radioisótopos**.

Los radionucleidos tienen la capacidad de transformarse a lo largo del tiempo, como es el caso del $^{238}\text{Uranio}$, su núcleo está formado por 92 protones y 146 neutrones, su núcleo inestable emite partículas alfa, dos protones y dos neutrones, transformándose el $^{238}\text{Uranio}$ en $^{234}\text{Torio}$ compuesto por 90 protones y 144 neutrones, así sucesivamente los núcleos inestables se modifican en varios radionucleidos hasta el instante de convertirse en una partícula estable, en este caso en la cadena de desintegración de $^{238}\text{Uranio}$ (Ver Figura 4), la partícula estable es el $^{206}\text{Plomo}$. A este proceso de transformación se le denomina **desintegración radiactiva** (PNUMA, 2016).

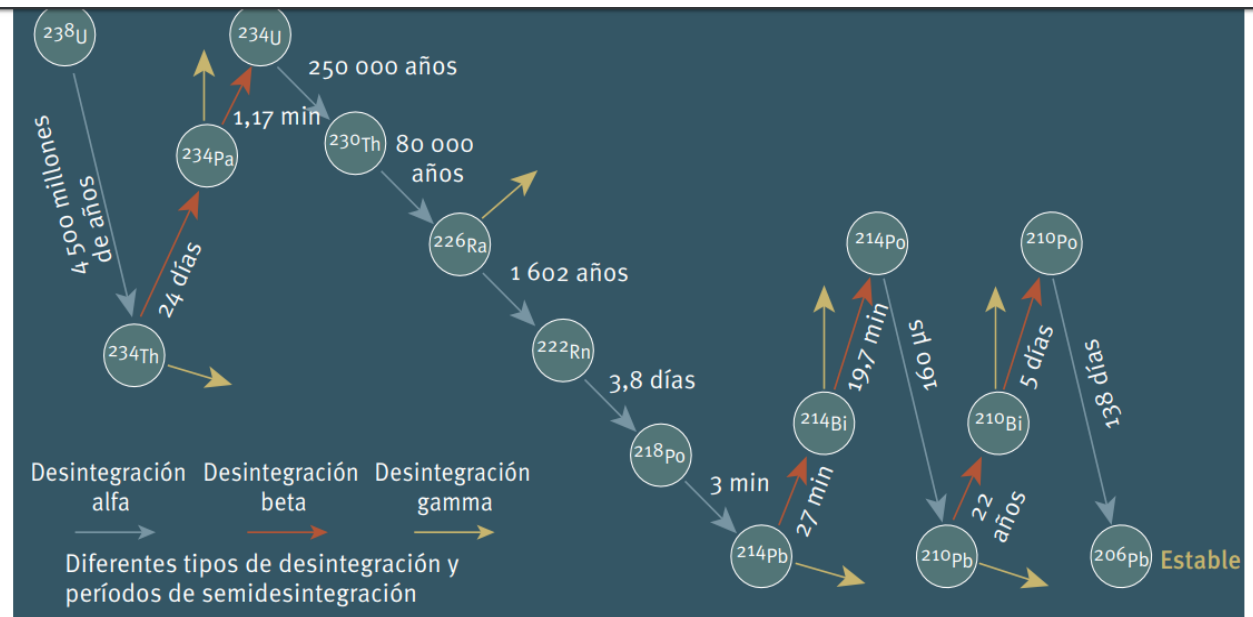


Figura 4 Cadena de Desintegración Radiactiva del ^{238}U Uranio
Fuente: (PNUMA, 2016)

➤ Ley de Desintegración Radiactiva

La ley de desintegración radiactiva se fundamenta cuando el núcleo progenitor tiene un tiempo de transición hasta convertirse en un núcleo hijo, este es un proceso netamente estadístico y característico de cada radionucleido.

$$N(t) = N_0 \exp^{-\lambda t} \quad (1)$$

Ecuación 1 Exponencial de Desintegración Radiactiva

Donde:

N= Número de núcleos radiactivos final

N_0 = Número de núcleos radiactivos inicial

λ = Constante de desintegración radiactiva.

t= Tiempo

➤ **Periodo de Semidesintegración**

Una de las características de la ley de desintegración radiactiva se basa en que es un proceso aleatorio, motivo por el cual se conoce que el número de átomos se reduce, sin embargo, se desconoce cuáles, simplemente cuántos y recae en una probabilidad del 50%. Entonces el periodo de semidesintegración ($T_{1/2}$) es el tiempo que tarda en reducirse a la mitad el número de núcleos de un radioisótopo en específico.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (2)$$

Ecuación 2 Periodo de Semidesintegración

➤ **Vida Media**

La vida media es aquel promedio de vida o tiempo que dura un núcleo en desintegrarse. Esta es la inversa de la constante de desintegración.

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

Ecuación 3 Vida media de un radionucleido

Donde:

τ = Vida media de un radionucleido

λ = Probabilidad de que un determinado radioisótopo se desintegre en la unidad de tiempo.

➤ **Velocidad de Desintegración**

La actividad radiactiva o velocidad de desintegración (A_t), es aquella desintegración de los núcleos de los radioisótopos por unidad de tiempo y es proporcional al número de núcleos presentes en los radionucleidos, viene dado por la siguiente ecuación:

$$A(t) = A_0 \exp^{-\lambda t} \quad (4)$$

Ecuación 4 Velocidad de desintegración radiactiva

➤ Equilibrio Secular

Según (L'Annunziata, 2012) se denomina equilibrio secular cuando en una cadena de desintegración radiactiva, el núcleo padre tiene una vida mucho más larga que el núcleo hijo y transcurrido un determinado tiempo, estos dos núcleos presentan la misma actividad (Ver figura 5)



Figura 5 Gráfico de equilibrio secular de un radioisótopo
Fuente: (Determinacion de aerosoles radiactivos con muestreadores de bajo caudal)

2.2.4. UNIDADES DE RADIACIÓN

Según EPA (2017), la radiación se mide según la cantidad de radiactividad presente en el agua, suelo o aire y además en el cuerpo humano se determina la radiación mediante la dosis que ha absorbido la persona. Por lo tanto, cada medida es diferente y posee su propia unidad.

➤ **Actividad de una Fuente Radiactiva:**

Llamada también actividad radiactiva, hace referencia al número de desintegraciones por segundo, su unidad se expresa de la siguiente manera:

Tabla 1: Unidad de la Actividad Radiactiva
Fuente: Autora

<u>Unidad en el Sistema Internacional (S.I.)</u>	<u>Unidad Estadounidense</u>
Becquerelio (Bq)	Curie (Ci)
1 Bq= 1 desintegración /segundo	1 Ci= $3,7 \times 10^{10}$ Bq

➤ **Dosis de Radiación**

La dosis de radiación es aquella cantidad de energía que recibe un cuerpo al estar expuesto en un periodo de tiempo, para ello se detalla a continuación las diferentes magnitudes físicas con sus unidades específicas:

➤ **Dosis Absorbida**

Esta magnitud física es aquella cantidad de energía que una determinada radiación ionizante ha depositado en un cuerpo por unidad de masa. Su unidad corresponde a:

Tabla 2: Unidad de la Dosis Absorbida
Fuente: Autora

<u>Unidad en el Sistema Internacional (S.I.)</u>	<u>Unidad Estadounidense</u>
Gray (Gy)	Rad (rad)
1Gy= 1 Joule/kg	1 Gy= 100 rads

➤ Dosis Equivalente

La dosis equivalente (H) hace referencia a la cantidad de energía de una radiación ionizante específica (alfa, beta, neutrones o fotones) absorbida por un cuerpo. Su unidad se expresa de la siguiente manera:

Tabla 3: Unidad de la Dosis Equivalente (H)

Fuente: Autora

<u>Unidad en el Sistema Internacional (S.I.)</u>	<u>Unidad Estadounidense</u>
Sievert (Sv)	Rad (rem)
	1 Sv= 100 rem

Las diferentes radiaciones ionizantes no tienen los mismos efectos en el ser humano por lo que se ha establecido factores de ponderación para cada uno de los tipos de radiación, como se indica en la tabla 4 (IAEA, 2004):

Tabla 4: Factores de Ponderación de la Radiación

Fuente: (IAEA, 2004)

<u>Tipo de Radiación Ionizante</u>	<u>Factor de Ponderación de la Radiación</u>
	<u>W_R</u>
Fotones, todas las energías	1
Electrones y muones, todas las energías	1
Neutrones de energía:	
< 10keV	5
10 keV a 100 keV	10
>100 keV a 2 MeV	20
>2 MeV a 20MeV	10
>20MeV	5
Protones, distintos a los protones de retroceso, energía >2 MeV	5
Partículas alfa	20

➤ **Dosis Efectiva (E)**

Una derivación de la dosis equivalente es la dosis efectiva, su unidad se expresa en Sievert (Sv), es aquella cantidad de energía recibida por el cuerpo humano que además de representar el tipo de radiación, se presenta el efecto en órganos o tejidos específicos, tomando en cuenta los factores de ponderación en la tabla siguiente:

Tabla 5: Factores de Ponderación del Tejido
Fuente: (IAEA, 2004)

<u>Tejido u Órgano</u>	<u>Factor de Ponderación del Tejido W_T</u>
Gónadas	0,20
Medula Ósea	0,12
Colon	0,12
Pulmón	0,12
Estómago	0,12
Vejiga	0,05
Mama	0,05
Hígado	0,05
Esófago	0,05
Tiroides	0,05
Piel	0,001

2.2.5. INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN IONIZANTE CON EL MEDIO BIOLÓGICO

Un organismo vivo está formado por células, éstas se ven afectadas debido a que la función de la radiación ionizante es transmitir una cantidad de energía hacia un cuerpo, que a su vez ioniza, modificando el núcleo de una molécula, produciéndole un cambio estructural. La alteración es consecuencia de esta transmisión de energía, que puede producir la muerte celular a moléculas biológicas como los ácidos nucleicos, proteínas, hidratos de carbono y

lípidos, macromoléculas que cumplen funciones importantes e específicas dentro de un organismo vivo (Durand J. L., 2000).

La molécula de ácido desoxirribonucleico (ADN) es responsable de mantener la información genética única de cada ser vivo, la irradiación puede transmitir energía directamente a este ácido nucleico generando un **efecto directo**, caso contrario a través de la ionización de moléculas de agua forman radicales libres ($\text{OH}^\cdot$) que a su vez afectan al ADN, denominándolo como un **efecto indirecto**. La rotura de cadena sencilla o de cadena doble, daño en las bases o entrecruzamiento entre ADN-proteína, son diferentes tipos de lesiones que provoca una determinada cantidad de energía ionizante. La alteración en la composición genética se produce debido a daños celulares que se manifiestan como (Consejo de Seguridad Nuclear CSN, 2013):

- **Muerte mitótica:** La célula conserva las funciones y su aspecto morfológico, pero pierde la capacidad de multiplicarse.
- **Muerte en interfase:** La radiación afecta a la célula produciendo la muerte antes de que ésta pase a la fase de mitosis o división celular.
- **Retraso mitótico:** Desestabilización del cociente entre el número de células en mitosis en cada instante y el número total de células, conocido como índice mitótico.

Estas manifestaciones celulares por la exposición a la radiación están influidas por diversos factores tanto físicos, químicos y biológicos que se presentan a continuación:

➤ **Factores Físicos:**

La calidad de la radiación a una determinada dosis puede provocar daños celulares dependiendo de la **transferencia lineal de energía (LET)** denominándola como “La energía media depositada a lo largo del recorrido de una partícula por unidad de longitud” (Castro-Volvio, 2013) . Este término se utiliza para cuantificar la acción de un determinado tipo de radiación que a su vez este influye a un daño biológico. Los fotones (rayos gamma y rayos X) son radiaciones de baja LET, en cambio las radiaciones corpusculares son de alta LET generando lesiones más complejas.

La dosis de radiación por unidad de tiempo o **tasa de dosis**, es otro factor físico en el cual una baja tasa de dosis evita la acumulación del daño celular permitiendo una reparación de lesiones para que no se genere una muerte celular.

➤ **Factores Químicos:**

Entre estos factores se establece 2 tipos. Uno de estos son los **radiosensibilizadores** como su nombre lo indica aumentan la sensibilidad de las células frente a la radiación, estas son las pirimidinas halogenadas como las 5-bromodeoxiuridina, 5-clorodeoxiuridina, 5-iododeoxiuridina, éstas se incorporan al ADN debilitándola. Los **radioprotectores**, otro tipo de factor químico, pero al contrario de los primeros estos son beneficiosos, los compuestos sulfidrilos o sulfuros que contienen grupos tioles, estos atrapan a los radicales libres reduciendo la acción indirecta de la radiación (Consejo de Seguridad Nuclear CSN, 2013).

➤ **Factores biológicos:**

El **ciclo celular** es un factor biológico que por lo general en la fase de la mitosis presenta más radiosensibilidad, caso contrario en la síntesis del ADN (fase S) que resulta ser una etapa radioresistente. Los **mecanismos de reparación**, factor biológico que se refiere a la capacidad de reparación por un daño al ADN. Una reparación eficaz se produce cuando la célula está en estado de reposo proliferativo por lo contrario se genera un daño potencialmente letal en el que la célula no sobrevive. La irradiación a una célula también produce daños menos severos o subletales, estos son los que se acumulan en las células, se reparan en su gran mayoría, pero dejando consecuencias a la célula irradiada y a sus células descendientes, provocando una célula viable pero modificada genéticamente o la lisis celular (Consejo de Seguridad Nuclear CSN, 2013).

Los efectos biológicos asociados por la exposición de las radiaciones ionizantes se clasifican en:

➤ **Efectos Determinísticos**

Estos son efectos proporcionales a la dosis que se recibe, por lo tanto, cuanto mayor sea la dosis mayor es la gravedad del efecto (Roig Petit, 2013). Las consecuencias cuando un ser vivo se ha expuesto a una determinada dosis mayor a una dosis umbral, es la muerte celular. La muerte de celular se produce depende del tipo de célula, las células diferenciadas (no proliferan) pierden su función, en cambio, para células no diferenciadas, la muerte se define como la incapacidad de proliferarse o muerte mitótica.

Lo que caracteriza para que se produzcan los efectos deterministas son la dosis absorbida relativamente alta, generando así afecciones a un número de células provocando la muerte

celular. La pérdida resultante de las células puede causar perjuicios en la función de un órgano o tejido a un mediano o corto plazo (Gisone & Pérez, 2001).

A continuación, se presenta una tabla en la que se presenta los principales efectos deterministas de radiaciones de baja LET en determinados órganos u tejido y la dosis umbral.

Tabla 6 Efectos deterministas en órganos o tejidos
Fuente: (IAEA, 2004)

Tejido	Efecto	Periodo de latencia aproximado	Umbral aproximado (Gy)	Dosis que producen efectos severos	Causa
Sistema hematopoyético	Infecciones Hemorragias	2 semanas	0,5	2,0	Leucopenia Plaquetopenia
Sistema Inmune	Inmunosupresión	Algunas horas	0,1	1,0	Linfopenia
Sistema gastrointestinal	Infección sistémica Deshidratación Desnutrición	1 semana	2,0	5,0	Lesión del epitelio intestinal
Piel	Escamación	3 semanas	3,0	10,0	Daño en la capa basal
Testículo	Esterilidad	2 meses	0,2	3,0	Aspermia celular
Ovario	Esterilidad	< 1 mes	0,5	3,0	Muerte interfásica del oocito
Pulmón	Neumonía	3 meses	8,0	10,0	Fallos en la barrera alveolar
Cristalino	Cataratas	> 1 año	0,2	5,0	Fallos en la maduración
Tiroides	Deficiencias metabólicas	< 1 año	5,0	10,0	Hipotiroidismo
Sistema nervioso central	Encefalopatías y mielopatías	Muy variable según dosis	15,0	30,0	Demielinización y daño vascular

➤ Efectos Estocásticos

Los efectos estocásticos difieren de los determinísticos debido a varias propiedades. Estos son aleatorios, no se especifica una dosis umbral, por lo tanto, puede producirse a dosis bajas o altas, teniendo la última una mayor probabilidad, sus consecuencias a una dosis de exposición no es la muerte celular sino la modificación en la molécula del ADN y se manifiestan de medio a largo plazo. Estos efectos probabilísticos pueden afectar tanto solo

al individuo expuesto denominándolo como **efecto somático**, así como también producir un **efecto hereditario**, en el que no se manifiesta en el individuo irradiado sino a sus descendientes (Castro-Volvio, 2013).

- **Efectos somáticos**

Estos afectan a la salud del individuo irradiado debido a una modificación estructural en el ADN, provocando células cancerígenas que a su vez se manifiestan en enfermedades como leucemia, carcinomas de piel, carcinomas de pulmón, osteosarcomas o en carcinomas de tiroides (Piera, s.f.).

- **Efectos hereditarios**

La irradiación a un individuo puede producir efectos transmisibles mediante la mutación en el ADN de células germinales, provocando malformaciones de cualquier tipo como por ejemplo mongolismo en los seres humanos (Piera, s.f.).

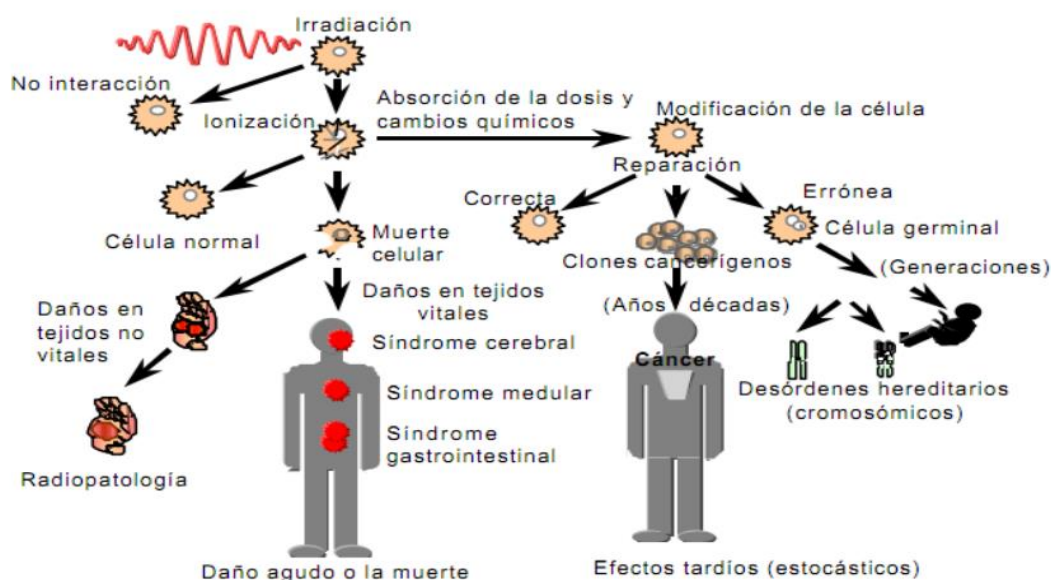


Figura 6: Manifestaciones del organismo frente a la irradiación

Fuente: (Coca Pérez, 2012)

2.3. COMPORTAMIENTO DEL $^{226}\text{RADIO}$ EN EL AMBIENTE

Los materiales radiactivos de origen natural, sus siglas en inglés NORM, son aquellos elementos radiactivos de larga vida, entre ellos están el $^{238}\text{Uranio}$ y $^{232}\text{Torio}$, presentes en la Tierra desde la formación de la misma. El $^{238}\text{Uranio}$, $^{232}\text{Torio}$ y sus productos de desintegración como el $^{222}\text{Radón}$ y $^{226}\text{Radio}$, generalmente se encuentran en concentraciones relativamente bajas cuando no existe intervención humana que genere un desequilibrio. Los procesos tecnológicos realizados por la humanidad como la quema de combustibles fósiles, la extracción de minerales, fundición de metales y la aplicación de fertilizantes provocan que los radionucleidos aumenten sus concentraciones a tal punto de convertirse en peligrosos para la salud. Aquellos radionucleidos en que sus niveles de concentración se han incrementado a causa de los procesos industriales se los denomina TENORM o NORM tecnológicamente mejorado (Ojovan & Lee, 2005).

En 1898 Marie y Pierre Curie descubrieron el Radio y esto sirvió de base para identificar la actividad de varios radionucleidos. El Radio en su forma natural, es un metal pesado de color blanco plateado que se oxida inmediatamente después de la exposición al aire (Serna, 2011). El Radio no tiene isótopos estables, llamamos isótopos aquellos elementos que contienen el mismo número de protones, pero diferente número de neutrones en el núcleo. En el ambiente existen cuatro isótopos radiactivos como el $^{224}\text{Radio}$ y $^{228}\text{Radio}$ que forman parte de la serie de $^{232}\text{Torio}$, el $^{223}\text{Radio}$ perteneciente a la serie de $^{235}\text{Uranio}$ y finalmente el isótopo de nuestro interés el $^{226}\text{Radio}$ parte de la cadena de $^{238}\text{Uranio}$ (IAEA, 2014)

2.3.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL $^{226}\text{RADIO}$

El $^{226}\text{Radio}$ es un isótopo radiactivo emisor alfa de la cadena del Uranio natural con una vida media aproximada de 1 602 años, en el que sus principales descendientes son el

$^{222}\text{Radón}$, $^{214}\text{Bismuto}$, $^{210}\text{Plomo}$ hasta llegar a un producto estable $^{206}\text{Plomo}$ (Suárez González Del Rey, González González, & De Pablo Sanmartín, 1987). Este elemento pertenece al grupo de metales alcalinotérreos, por lo que las propiedades químicas se asemejan a las del Bario (Ba), el Estroncio (Sr), en el cuerpo es análogo al Calcio (Ca) y se dirige principalmente al hueso (Smith & Amonette, 2006).

A continuación, se enumeran algunas características fisicoquímicas de este radionucleido:

- **Formula molecular:** Ra
- **Estructura Química:** Ra^{+2}
- **Peso molecular:** 226
- **Número Atómico:** 88
- **Punto de ebullición:** 1737 °C
- **Punto de fusión:** 700 °C
- **Densidad:** 5,5 g/cm³
- **Energía:** 4,78 MeV

La geoquímica de este metal alcalinotérreo radica en la facilidad de oxidación y la naturaleza iónica de sus enlaces metal-oxígeno, forma sales insolubles de sulfato, carbonato y cromato (Molinari & Snodgrass, 1990). Sin embargo, las sales de bromuro, cloruro, nitrato e hidróxido de radio son solubles en el agua, pero menos que las sales de bario (Moore, 1972).

Las reacciones químicas principales del Radio son la adsorción que es un proceso esencial para determinar la tasa de transporte de este radionucleído en el sistema de agua

subterránea-suelo y la co-precipitación (Ver Sección 2.3.2.) que ocurre cuando solutos extraños quedan atrapados en el cuerpo de un sólido precipitante (Curti, 1997).

2.3.2. INTERACCIÓN DE ^{226}Ra EN EL SUELO

Según Rosler y Lange (como se citó en (IAEA, 2014) afirman que la corteza terrestre está formada por una diversidad de rocas pertenecientes a los grupos ígneas, sedimentarias y metamórficas, que a su vez tienen 95% de magmatitas, 4% de pizarra, 0,68% arenisca y un 0,32% de rocas carbonatadas. Las concentraciones de Uranio y por ende sus productos de desintegración varían dependiendo del tipo de roca (Ver Tabla 7), tal es el caso que en las rocas ígneas contienen concentraciones más elevadas que las sedimentarias, excluyendo a las lutitas, los sedimentos de aguas profundas y las rocas de fosfato; con respecto a las rocas metamórficas tienen concentraciones similares a las de las rocas de las que se derivaron. En el caso de las rocas ígneas con contenido alto en sílice presentan mayor concentración del elemento radiactivo, en comparación a las rocas ígneas básicas con bajo sílice como el basalto (IAEA, 2014).

Tabla 7 Concentración de ^{226}Ra en varias rocas
Fuente: (IAEA, The Environmental Behaviour of Radium: Revised Edition, 2014)

Grupo de Rocas	Tipo de Rocas	Concentración de ^{226}Ra (Bq/kg)
Magmatita	Rocas volcánicas	48-137
	Base de lava	33
	Granito	0,037-185
	Basalto	11-48
Rocas magmáticas	Ácido	111
	Intermedio	96
	Base	11-48

	Esquisto	14,8-2220
	Bitumen	629-1040
	Rocas sedimentarias	9,2-15
Rocas sedimentarias	Limo	5-18
	Arenisca	7-55
	Rocas de fosfato	148-1480
	Carbonato	26-30
	Rocas de arcilla	55

Varios estudios aseguran que el ^{226}Ra en un suelo normal tiene una migración nula, sin embargo, un aumento en la acidez del suelo, causado por ácidos orgánicos aumentan la migración de dicho isótopo. Este fenómeno en el que migra el radionucleído se produce por el depósito de grandes cantidades de lodo y relave (desecho tóxico de procesos mineros) (IAEA, 1990).

Los isótopos radiactivos en el suelo dependen principalmente de las propiedades y de la abundancia de radiactividad de la roca que la constituye. Estas rocas se ven afectadas por diversos factores como cambios en la temperatura, el agua, la flora y la fauna que resultan en la formación del suelo. El ^{226}Ra perteneciente a los metales alcalinotérreos se comportan en el suelo como los elementos de este grupo, como el calcio, el estroncio y el bario (IAEA, 2014).

Existen dos procesos geoquímicos que afectan el transporte de especies catiónicas (^{226}Ra), en relación con el flujo de agua subterránea en un medio poroso como lo es el suelo (Shoesmith, 1984):

1. Adsorción en la que el catión es atraído a una superficie coloidal por procesos eléctricos y químicos, esta superficie pueden ser minerales arcillosos, óxidos metálicos hidratados o hidróxidos o materia orgánica.
2. Precipitación o co-precipitación como parte de un sólido amorfo o cristalino.

La naturaleza y la fuerza de dichos procesos determinarán la velocidad a la que el ^{226}Ra se transporta a través del suelo y además puede contribuir a los procesos químicos diseñados para eliminar este radionucleido del suelo. Existen varios factores que dificultan determinar cuál de los procesos geoquímicos es el más dominante, debido a que en un sistema de suelo intervienen factores como la textura y el contenido de agua (Shoesmith, 1984).

La cantidad de adsorción o intercambio de iones, se cuantifica mediante el coeficiente de distribución (K_d), este es independiente de la naturaleza del sistema suelo y viene dado de la siguiente manera (Smith & Amonette, 2006):

$$K_d = \frac{M_i}{[M_i]} \quad (5)$$

Ecuación 5 Coeficiente de distribución

Donde:

M_i = Concentración de en la fase solida (pCi/kg)

$[M_i]$ = Concentración en la fase líquida (pCi/kg)

Los valores de K_d para minerales de arcilla y otros minerales comunes formadores de rocas varían entre 2,937 y 90,378 ml/g en soluciones alcalinas, para suelos en soluciones alcalinas varía este coeficiente entre 214 y 4687 ml/g. Un valor elevado de K_d implica que el contaminante migrará de manera lenta debido a que está estrechamente vinculado al

suelo, situación inversa sucede si el valor del coeficiente es pequeño. Se asegura que el $^{226}\text{Radio}$ “adsorbe fácilmente a las arcillas y los óxidos minerales presentes en el suelo, especialmente en condiciones de pH neutro y alcalino” (Smith & Amonette, 2006).

En relación a la co-precipitación se dice que el Bario está presente en las aguas tanto superficiales como subterráneas que a su vez en presencia de sulfatos forman el compuesto Barita (BaSO_4) y éste incorpora al Radio en solución sólida formando $(\text{Ba,Ra})\text{SO}_4$. La incorporación de Radio se describe mediante un coeficiente empírico de partición (λ), en los que se han reportado valores de 1,21 a 1,8 y viene dado por la siguiente ecuación (Doerner & Hoskins, 1925); (Gordon & Rowley, 1957):

$$\lambda = \frac{\left(\frac{[\text{Ra}]}{[\text{Ba}]}\right)_{\text{superficie}}}{\left(\frac{[\text{Ra}]}{[\text{Ba}]}\right)_{\text{solución}}} \quad (6)$$

Ecuación 6 Coeficiente empírico de partición

Según IAEA (1990) establece un rango de concentraciones del radionucleído en suelos en áreas normales desde 3,7 a 125,8 Bq/kg, así como también en suelos desérticos de color marrón claro, en el que se presentan los valores más altos entre 70,3 a 125,8 Bq/kg y en cal con valores bajos de 3,7 Bq/kg (Ver Tabla 8). La distribución de $^{226}\text{Radio}$ en el suelo varía dependiendo del tipo de suelo debido a que estos contienen diferentes características de capacidad de intercambio iónico.

Tabla 8 Concentración de $^{226}\text{Radio}$ dependiendo del Tipo de Suelo
Fuente: (IAEA, The Environmental Behaviour of Radium VOL.1, 1990)

Tipo de Suelo	Posible Locación	$^{226}\text{Radio}$ (Bq/kg)
Arcilla roja	Florida, USA	7,4
Arena	España	14
Limo	-	3,7
Podsól	USSR	33,3

Suelo de bosque gris	USSR	37,1
Tierra Negra	USSR	29,6
Suelo de bosque marrón	USSR	29,6
Tierra roja	USSR	40,7
Tierra o desierto gris	USSR	18,5
Suelo desértico marrón claro	USSR	70,3-126

Es importante recalcar que el $^{226}\text{Radio}$ no es biodegradable ni forma parte de una reacción química que lo transforme, el deterioro radiactivo es el mecanismo por el cual se degrada en el ambiente a través del aire, agua y el suelo (Agency for Toxic Substances and Disease Registry & U.S. Environmental Protection Agency, 1990).

2.3.3. INTERACCIÓN DE $^{226}\text{Radio}$ EN EL AGUA

El $^{226}\text{Radio}$ está presente en el agua como un ion divalente y su distribución se realiza a través de dos diferentes ciclos de flujo como es el agua subterránea, siendo una fuente de $^{226}\text{Radio}$ debido a que esta interactúa con materiales que contienen este radionucleído como las rocas, cuerpos de mineral o las tierras; transportando así $^{226}\text{Radio}$ y otros isótopos radiactivos naturales al ciclo de flujo conocido como agua superficial (IAEA, 1990)

La actividad de $^{226}\text{Radio}$ en aguas subterráneas tienen un rango de concentraciones alto dependiendo tanto de las características de la región estudiada como la fuerza iónica del agua, sin embargo, en aguas superficiales estos niveles son relativamente bajos. Tal es el caso que Bhat y Krishnaswamy (1969) determinaron un rango entre 0,8 a 3,0 mBq. L⁻¹ con un promedio de 1,6 mBq. L⁻¹ en los ríos en la India. Aunque se debe tomar en cuenta que los flujos de agua que drenan piedra caliza, fosfatos y rocas ricas en $^{228}\text{Uranio}$ presentan un

mayor nivel de concentración de $^{226}\text{Radio}$ (Porcelli , Andersson, Wasserburg, & Baskaran, 2001).

Las fuentes naturales de la entrada de $^{226}\text{Radio}$ en el agua dulce pueden ser a través de la vía subterránea, la suspensión de sedimentos, la solubilización de sedimentos unidos con radionucleídos, o también del aire por medio de la precipitación y deposición de partículas. El rango de concentración de este radionucleído está entre de 0,5 a 20 mBq l⁻¹, también se han encontrado concentraciones altas hasta de 292 mBq/L en Checoslovaquia (Ver Tabla 9) (IAEA, 2014).

Tabla 9 Concentración de $^{226}\text{Radio}$ en diferentes ríos en el mundo
Fuente: (IAEA, 2014)

País	$^{226}\text{Radio}$ (Bq/Kg)	$^{228}\text{Radio}$
<u>Ríos y Arroyos:</u>		
Australia:	1,8	0,9
Austria: Río Danubio	18,5	-
Brasil: Río Amazonas	0,78-1,22	0,87-1,07
Canadá	4,07-13,7	-
China	7,4-18,5	-
Antigua Checoslovaquia	3,7-292	-
Egipto: Río Nilo	3,7-155	-
Alemania	2,59-31	-
India: Ganges	20-48	-
Reino Unido: Río Támesis	18,5	-
EEUU: Río Missisipi	0,37-40	-
EEUU: Río Hudson	1,17	-

El proceso físico que realiza el $^{226}\text{Radio}$ cuando se encuentra en aguas superficiales es mantenerse en la misma o también depositarse y trasladarse a los sedimentos del fondo,

además los organismos de agua dulce lo pueden absorber generando la introducción a la cadena alimentaria. Benes y Monte (como se citó en (IAEA, 1990) afirman que mediante la combinación de algunos procesos tanto antropogénicos como naturales se produce la transferencia de este radionucleído en aguas superficiales, estos son:

- Difusión y dispersión producida a través de gradientes de concentración y el movimiento turbulento del agua.
- Transporte generado por corrientes de agua.
- Cambios fisicoquímicos de $^{226}\text{Radio}$ en aguas superficiales.
- Intercambios de contaminantes entre las fases disueltas y sólidas.
- Deposición y removilización del radionucleído después de la interacción con la materia suspendida y los sedimentos del fondo.
- Captación por biota de agua dulce.

Con respecto a la difusión este se basa en el movimiento del $^{226}\text{Radio}$ desde áreas de altas concentraciones a regiones de bajas concentraciones. Este proceso se fundamenta en la primera ley de Fick. La dispersión vertical influenciada por la estratificación de los cuerpos de agua, en la que su coeficiente en un río se puede encontrar mediante la siguiente ecuación (Maher, Depaolo, & Christensen, 2006):

$$E_z = (6,7 \times 10^{-2}) hu \approx (6,7 \times 10^{-2}) hU \quad (6)$$

Ecuación 7 Coeficiente de dispersión vertical

Donde:

h = profundidad del agua (m)

u = velocidad de fricción (m/s) = $1/10 U$

U = velocidad de flujo promedio (m/s)

En relación a la dispersión horizontal de los ríos, los valores de los coeficientes varían de acuerdo a la velocidad del flujo, por lo que a mayor turbulencia aumenta dicho coeficiente y se estima mediante la siguiente ecuación (Fisher, List, Koh, Imberger, & Brooks, 1979):

$$E_x \approx \frac{0,11 U L^2}{h} \quad (7)$$

Ecuación 8 Coeficiente de dispersión horizontal

Donde:

L= ancho del río

El transporte por la corriente de agua del radionucleído o también denominado advección (F) se relaciona directamente con la velocidad promedio del agua (v) en m/s (depende de las características del efluente y el régimen hidráulico) y la concentración del isótopo (C) (Fisher, List, Koh, Imberger, & Brooks, 1979).

$$F = v * C \quad (8)$$

Ecuación 9 Transporte de un radionucleido por la corriente del agua

El ^{226}Ra es absorbido por especies de agua dulce a través de dos formas como (Justýn & Havlík, 1990):

- Captación directa del agua a peces por medio de la piel o branquias durante la filtración de agua
- Captación indirecta a través de sedimentos de fondo a plantas acuáticas y ciertos invertebrados, también por alimento debido a la ingestión y captación de agua distribuyéndose a través del tracto digestivo.

Según Gascoyne, 1989, Lauria et al., 2004 (como se citó en (Navarro Martinez, y otros, 2017) afirman que entre el radionucleido ^{226}Ra y los parámetros químicos como la

salinidad o el contenido de cloruro, tienen una correlación positiva, esto sucede también en relación cuando un pH es bajo, la concentración del radioisótopo es alta (Almeida, Lauria, Ferreira, & Sracek, 2004). Además, como se mencionaba en apartados anteriores, el proceso de adsorción en superficies de óxido de hierro y manganeso, son un factor clave cuando se habla de que el retraso es alto en el agua subterránea (Ames, McGarrah, Walker, & Salter, 1983). Por lo tanto, (Langmuir & Riese, 1985) afirman que “El $^{226}\text{Radio}$ tiene una movilidad significativamente mayor en condiciones reductores y ácidas.

2.3.4. INTERACCIÓN DEL $^{226}\text{Radio}$ CON LA BIOTA

Markose et al, y Swanson (como se citó en (*Agency for Toxic Substances and Disease Registry & U.S. Enviromental Protection Agency*, 1990) afirman que los organismos acuáticos a través del agua pueden bioacumular radionucleidos como el $^{226}\text{Radio}$. Por lo tanto, los factores de bioacumulación (BCF) de peces tienen un rango entre 1-60 para porciones de carne y en huesos varía entre 40-1 800; esto se refiere a las especies acuáticas que viven en lagos o arroyos donde existen desechos de procesamiento de $^{228}\text{Uranio}$.

Newman y Jagoe (como se citó en (Neff, 2002) definen a la biodisponibilidad como “la medida en que un químico puede ser absorbido o adsorbido por procesos activos (biológicos) o pasivos (físicos o químicos)”. Cuando un elemento químico esta biodisponible se debe a que este se encuentra en una forma tal que, pueda moverse a través de la piel, las branquias, el epitelio, el revestimiento intestinal o de la membrana celular de un organismo.

Existen especies de biota de agua dulce que son capaces de bioacumular el Radio como los peces, mejillones, macrófitos y algas como la *Spirogyra* sp., que bioacumula el isótopo

²²⁶Radio; estos animales acuáticos se los puede considerar como indicadores de este radionucleido, esenciales para realizar monitoreos (Justýn & Havlík, 1990).

Como se mencionó en la sección anterior 2.3.3, el ²²⁶Radio puede ser absorbido por la biota acuática a través de dos formas; ya sea por captación directa o por captación indirecta. Mediante varios estudios se obtuvieron que los rangos de concentración de este radionucleido en peces que habitan en agua dulce no contaminada están entre un rango de 0,68 – 1,12 Bq/kg (peso fresco), mientras que, en aguas superficiales perjudicadas por la actividad antropogénica, la molienda de ²³⁸Uranio, la concentración de ²²⁶Radio varía entre 0,33 a 10,4 Bq/kg (peso fresco). El radionucleido ²²⁶Radio tiende a concentrarse más en el hueso que en el músculo de los peces, esto responde que este isótopo es análogo al calcio (IAEA, 2014).

El factor de bioacumulación (BCF) también denominada proporción de concentración (Cr), es aquel que relaciona las concentraciones de radioisótopos en tejidos bióticos con las concentraciones en los medios de referencia, se define mediante la siguiente ecuación (Justýn & Havlík, 1990):

$$C_r = \frac{C_b}{C_w} \quad (9)$$

Ecuación 10 Factor de bioacumulación

Dónde:

C_b= proporción de concentración de radionucleídos en algunas especies

C_w= Concentración de radionucleídos en el agua.

El valor de este factor depende de diversos factores como:

- Duración de la exposición

- Edad de la especie
- Tasa de metabolismo
- Otros metales alcalinotérreos presentes en el agua
- Sedimentos
- Dieta de los peces

A continuación, en la Tabla 10 se presenta una variedad de especies de peces y los valores del factor de concentración o bioacumulación:

Tabla 10 Factor de bioacumulación de ^{226}Ra en diferentes especies de peces
Fuente: (IAEA, *The Environmental Behaviour of Radium: Revised Edition*, 2014)

Especies	Cr
<i>Anguilla anguilla</i> Linn.	29-53
<i>Carassius carassius</i> Linn.	700
<i>Coregonus lavaretus maraena</i> Bloch	50
<i>Leuciscus cephalus</i> Linn	24-58
<i>Perca fluviatilis</i> Linn.	12-650
<i>Rutilus rutilus</i> Linn.	37-600
<i>Salmo trutta m. fario</i> Linn.	37-430
<i>Tinca tinca</i> Linn	250

2.3.5. $^{226}\text{RADIO}$ EN LA MINERÍA

La Serie de Informe de Seguridad No. 49, Evaluación de la necesidad de medidas de protección radiológica en el trabajo con minerales y materias primas, ha identificado 12 tipos de industrias que se deben tomar en cuenta para un control a la exposición a fuentes naturales, las cuales son (IAEA, 2015):

- Extracción y procesamiento de Uranio
- Extracción de elementos de tierras raras
- Producción y uso de Torio y sus compuestos
- Producción de nobio y ferroniobio

- Extracción de minerales distintos del Uranio
- Producción de petróleo y gas
- Fabricación de pigmentos de dióxido de titanio
- La industria del fosfato
- Las industrias del circonio
- Producción de estaño, cobre, aluminio, plomo, hierro y acero
- Combustión de carbón
- Tratamiento de agua

Tsivoglou, Rushing, Holaday y Bartsh (1958) aseguran que “el Radio se identificó como un factor de estrés importante por las industrias de extracción y procesamiento de Uranio a principios de la década de los 1950”. Mediante la explotación de minerales radiactivos, como también en la extracción y procesamiento de minerales convencionales como el cobre, oro, lignito, carbón, se pueden liberar radionucleidos naturales entre ellos el Radio, esto se da por la presencia de Uranio y sus productos de larga vida (IAEA, 2014).

La minería es catalogada como una actividad económica que fomenta el desarrollo de un sector, sin embargo, se vuelve una preocupación debido a que esta actividad genera impactos ambientales y de salud tanto para los trabajadores como para los habitantes de comunidades aledañas. Las minerías superficiales o subsuperficiales desde la exploración hasta el término de la vida útil de la misma, utilizan productos químicos tóxicos y también como parte de esta actividad se da la eliminación de desechos, que producen riesgos potenciales a la salud humana y al ambiente. Generalmente estos riesgos se dan mediante la ingestión, inhalación, el contacto de la piel con metales pesados tóxicos, así como también por la contaminación tanto del suelo y el agua generado por la contaminación de la

mina a través de la erosión, dispersión química como los drenajes ácidos de los desechos y relaves mineros (Candeias, Avila, Coelho, & Teixeira, 2018).

Sabiendo que el ^{238}U y el ^{226}Ra son materiales radiactivos naturales presentes en el ambiente, pero las actividades humanas, en este caso la minería acelera los procesos naturales geológicos, mediante la transferencia del mineral del subsuelo hasta la superficie generando un reprocesamiento de la corteza terrestre. El agua es esencial en el movimiento de los NORM a través del ambiente, ya que es un medio de transporte para el mineral y también como medio para las reacciones químicas (Wendel, 1998).

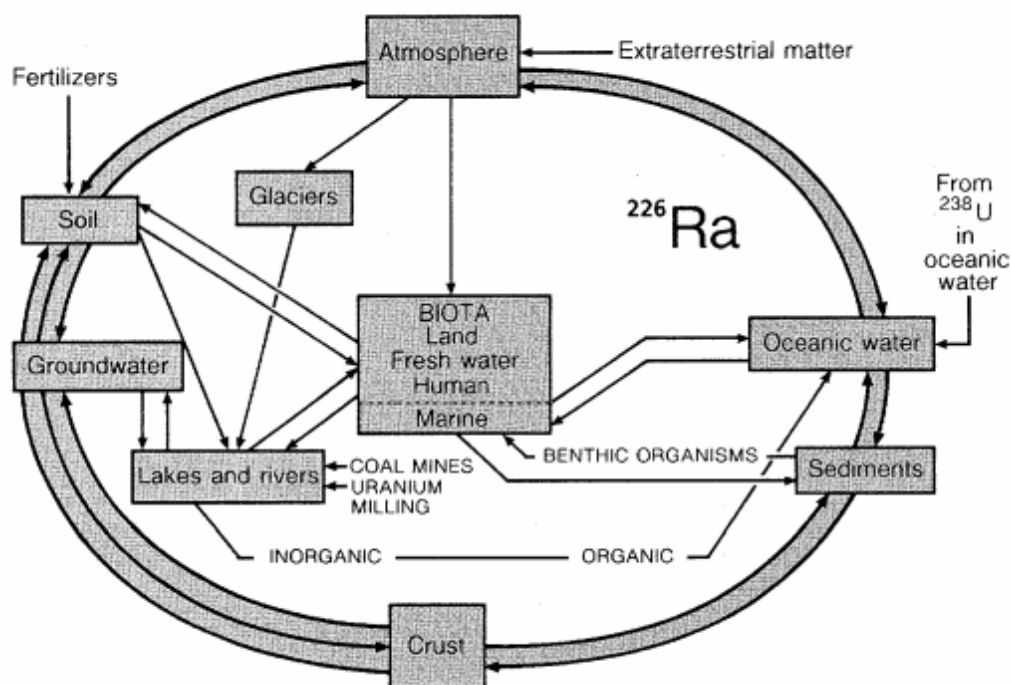


Figura 7 El Comportamiento Ambiental del ^{226}Ra
Fuente: (IAEA, 1990)

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

3.1.1. UBICACIÓN:

El proyecto minero Loma Larga cubre un área de 7 960 ha, formado por tres concesiones denominadas Cerro Casco, Cristal y Río Falso, se encuentra ubicado en el sur del Ecuador a 15 km al Noroeste de Girón y 30 km al Suroeste de Cuenca, a una altitud de 3 500 a 3 900 m.s.n.m. (Morán Reascos, 2017).

La concesión minera Río Falso, lugar donde se realizó esta investigación se ubica en las parroquias Baños, Victoria del Portete, San Gerardo, Chumblín, San Fernando y Girón, de los cantones Cuenca, Girón y San Fernando perteneciente a la provincia del Azuay, cubriendo una superficie de 3 168 ha (INV Minerales Ecuador S.A., 2016).

MAPA DE UBICACIÓN DEL PROYECTO MINERO LOMA LARGA-AZUAY, ECUADOR

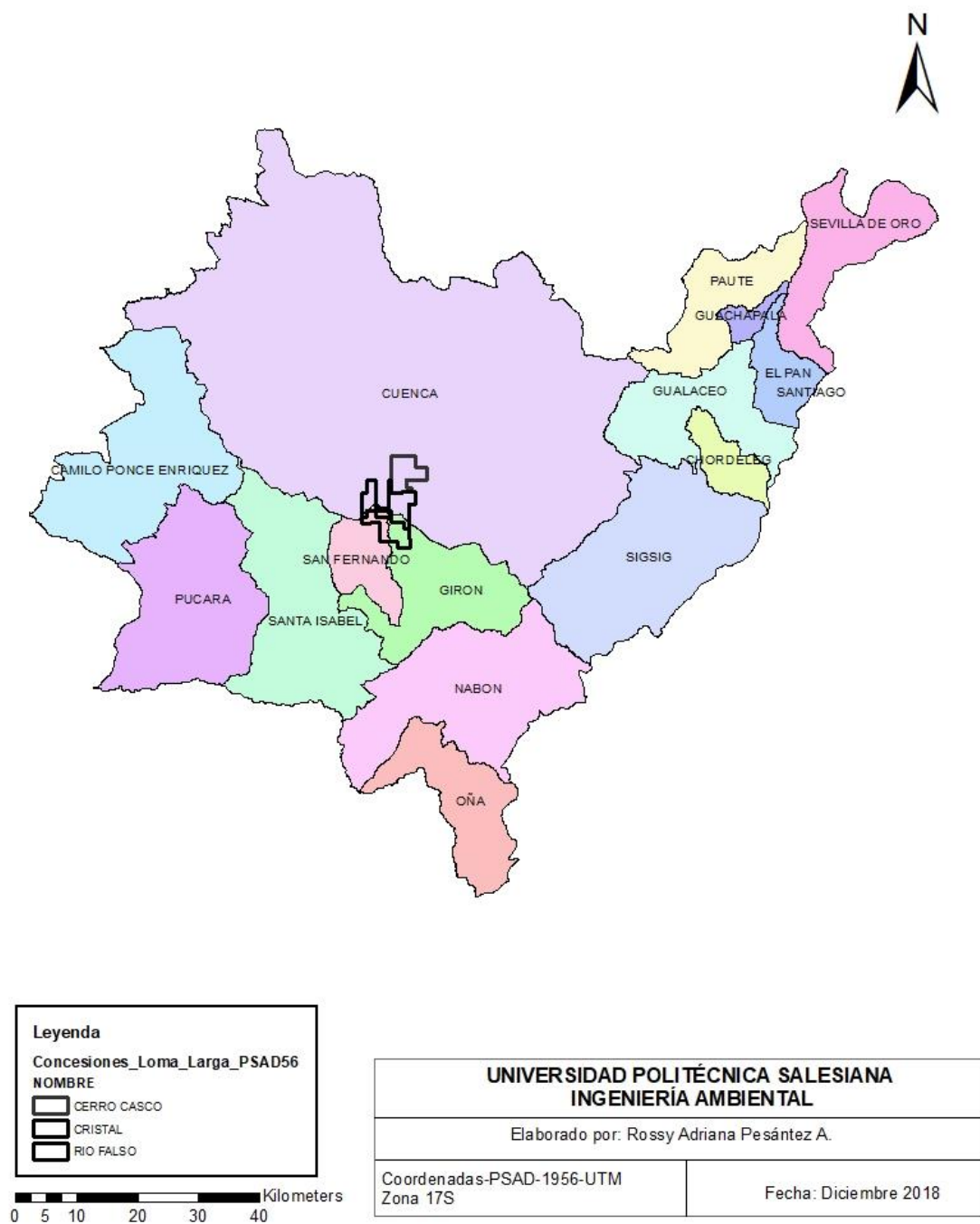


Figura 8 Mapa de Ubicación del Proyecto Loma Larga
Fuente: Autora

3.1.2. MEDIO FÍSICO

3.1.2.1. CLIMA

El análisis de las condiciones meteorológicas de la zona se realiza por medio del procesamiento de datos meteorológicos de la estación Quimsacocha 1, administrado por el PROMAS-Universidad de Cuenca, las principales variables que se analizan son precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento (INV Minerales Ecuador S.A., 2016).

La clasificación climática del sector corresponde al tipo bosque nublado de páramo con temperaturas que oscilan entre 2,2 a 17,1 °C con una temperatura media anual de 8,4 °C, en donde el mes de diciembre es el más cálido a diferencia, del mes de agosto siendo el más frío. Las temperaturas durante el día alcanzan su máximo entre las 12:00 y 15:00 hrs, mientras que las mínimas están entre las 03:00 a 06:00 hrs.

En relación a la precipitación de la zona de estudio, se ha registrado un promedio anual entre 55,36 a 103,68 mm. Este sector no tiene meses ecológicamente secos, por lo que la mayor pluviosidad tiene lugar en los meses de marzo y noviembre y en los meses de agosto y septiembre es menor (INV Minerales Ecuador S.A., 2016) .

Mediante los datos obtenidos de la estación meteorológica Quimsacocha 1, se observa que la humedad máxima relativa es de 99,8 % y existe una mínima de 81,8 %, mientras que la humedad media relativa de la zona de estudio es de 90,3 % (Morán Reascos, 2017).

Según INV Minerales Ecuador S.A. (2016) registran que mediante la elaboración de la Rosa de los Vientos indican que la dirección del viento más frecuente se da al Sureste (SE),

con una velocidad promedio entre 10 a 15 m/s, donde el mes de Julio presenta vientos más fuertes.



Figura 9 Variación del Clima en el Proyecto Loma Larga
Fuente: Autora

3.1.2.2. GEOLOGÍA

Según la geología regional, el proyecto Loma Larga se encuentra en la parte del Terreno Chaucha, que a su vez está dividida por dos sistemas de fallas, las cuales son el sistema de fallas Bulubulu al Noroeste y el sistema de fallas Girón al Sureste (MacDonald, y otros, 2012). Con respecto a la geología local este proyecto está ubicado entre las fallas Gañarín al Noroeste y la falla Girón al Suroeste, existe también una falla conjugada entre las 2 anteriores denominada Río Falso, de norte a sur (Ver Figura 9). Se encuentra también una antigua caldera de 4 km. de diámetro en donde los bordes de la misma, están constituidos por flujos de lava de forma radial y composición andesítica. El proyecto se encuentra ubicado en las formaciones Turi, Turupamba, Quimsacocha y Tarqui (Cox, y otros, 2016).

La zona de estudio está asentada principalmente en la formación Quimsacocha y la formación Turi. Según Pratt et.al (como se citó en (Morán Reascos, 2017) en la Formación Quimsacocha existen estratos de lavas porfiríticas andesíticas de pagioclasa y anfíbol acicular muy frescas y en la Formación Turi que comprende rocas sedimentarias fluviales y conglomerados de andesíticos gruesos y brechosos, además presenta areniscas tobáceas y limolitas tobáceas. Este tipo de andesita está relacionado con las rocas volcánicas o ígneas extrusivas que contienen alrededor de 52% al 63% de sílice (SiO_2), además de un 5% de hierro (FeO) y un 7% de calcio (CaO) y las areniscas que son sedimentarias en la que su composición es similar a la arena y es una roca compuesta de cuarzo en el que su material que lo mantiene unido es el sílice, carbonato de calcio u óxido hierro (Lutgens & Tarbuck, s.f.).

Los suelos de la concesión minera se originan de materiales volcánicos, éstas pertenecen al orden de los Inceptisoles, gran grupo de los Hydranquepts y Dystrandeps suborden

Andepts, en el que su textura es franco arcilloso, con una estructura granular fina de color negro. Estos suelos medianamente profundos son fuertemente ácidos, el cual no permite un desarrollo agronómico, sin embargo, sirve para la conservación y protección (INV Minerales Ecuador S.A., 2016).

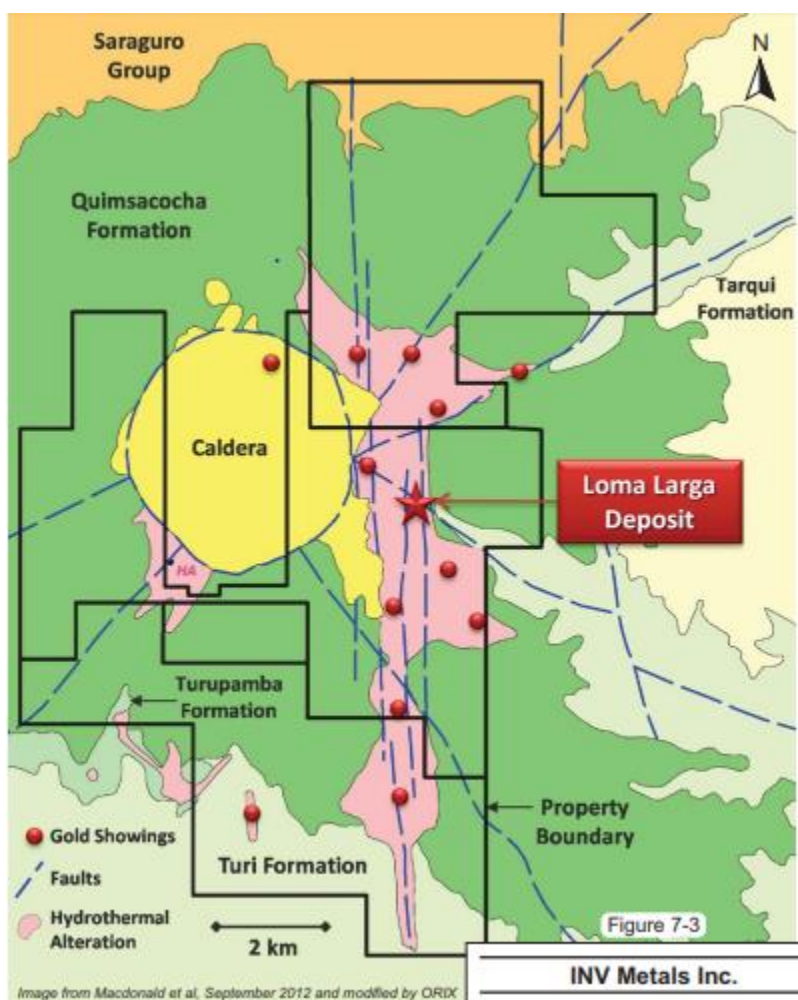


Figura 10 Geología del Proyecto Loma Larga
Fuente: (Cox, y otros, 2016)

3.1.2.3. HIDROLOGÍA

Según Cox y otros (2016) el proyecto está ubicado en la división continental, por ende en la parte superior de dos cuencas con drenaje al sureste, que fluye hacia el Océano Atlántico y al sur, el cual fluye hacia el Océano Pacífico.

La red de drenaje de las áreas mineras Cerro Casco y Río Falso es de tipo radial dendrítico, constituida por una serie de quebradas donde su nacimiento es en una antigua caldera, originando varios arroyos que constituyen el nacimiento de varias microcuencas de drenaje (INV Minerales Ecuador S.A., 2016).

El drenaje hacia el sureste se produce a través de dos ríos principales los cuales son el Río Irquis y el Río Portete; y el drenaje hacia el sur es mediante el Río Zhurucay, Quebrada Falso y Quebrada Jordanita (Cox, y otros, 2016)

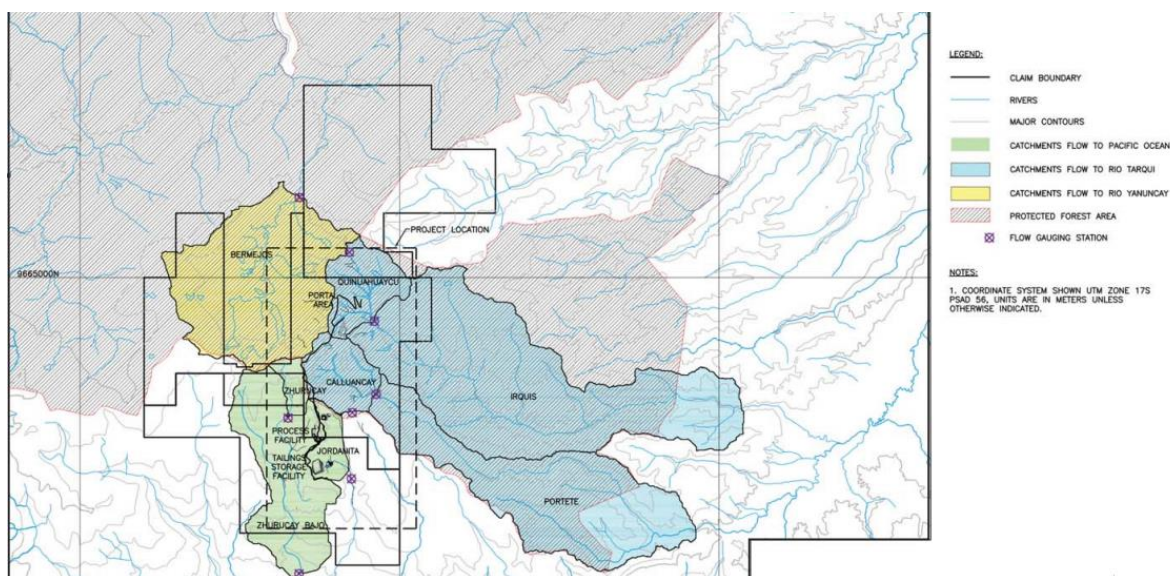


Figura 11 Estaciones de monitoreo de flujo y sub-captaciones
Fuente: (Cox, y otros, 2016)

3.1.3. MEDIO BIÓTICO

Según INV Minerales Ecuador S.A. (2016) la zona de estudio presenta una cobertura vegetal típica de zonas parameras con predominancia de especies como *Calamagrostis intermedia*, *Azorella pedunculata* y *Cortaderia sericantha*, incluye también alrededor de 480 especies de plantas vasculares. Esta zona además consta de una amplia diversidad arbórea entre estas están los alisos, quinoa, quisuar, chilca, alas de ángel, entre otras. Con la

finalidad del crecimiento y producción de especies nativas el proyecto ha implementado un vivero desde el año 2003.



Figura 12 Vegetación característica de la zona
Fuente: Autora

La fauna presente en la zona de estudio es diversa, en la que se determinan alrededor de 29 especies de mamíferos como venados de cola blanca, conejos silvestres, lobos de páramo. Con respecto a la avifauna se registran golondrinas, patos silvestres, Quilico, entre otras. La ictiofauna presente es una especie de pez introducida denominada trucha arcoíris (*Onchorynchus mykiss*), que se presume que desplaza a las especies nativas de peces. Finalmente, en relación a los macroinvertebrados se han registrado 28 familias, sabiendo que estas son bioindicadores de la calidad de agua, registrando una calidad de regular a buena (INV Minerales Ecuador S.A., 2016).

3.2. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

3.2.1. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA SUPERFICIAL

Según la OMS (2006) afirma que la selección de los puntos de muestreo depende de la característica de la calidad del agua objeto de análisis, puesto que para componentes cuyas concentraciones tienden a variar durante la distribución. La selección de los puntos estratégicos fueron tres, ubicados en la naciente (aguas arriba), curso medio (adyacente a la actividad minera) y desembocadura (salida de la concesión).

Es importante destacar que para la toma de muestras se evitó las áreas de turbulencia excesiva y la distancia de separación entre ambas orillas, por lo que fue necesario recolectar en el punto medio del río (Leyva Collas, Espinoza López, & Barreta Sáenz, 2010).

UBICACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO EN LOS RÍOS IRQUIS Y PORTETE

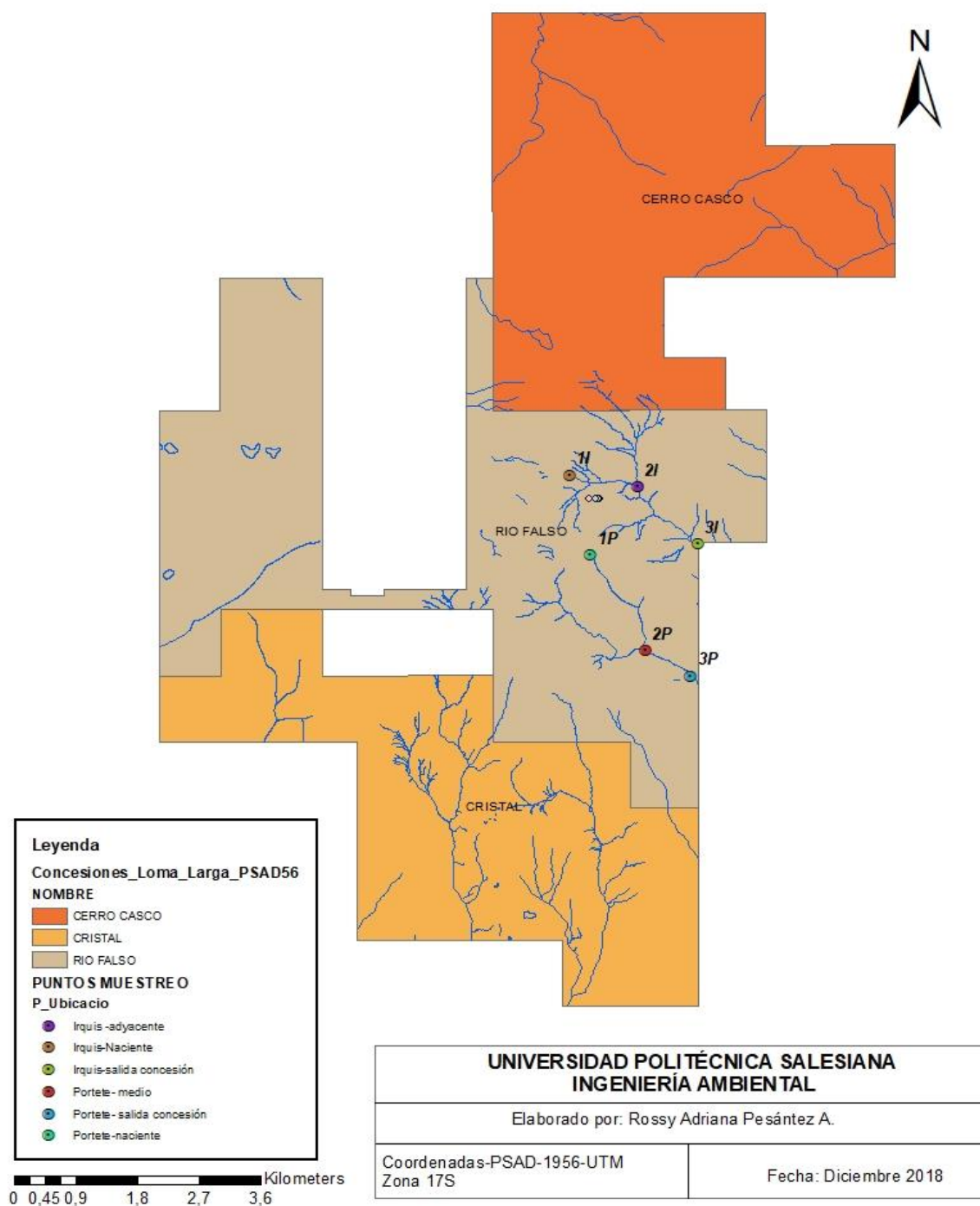


Figura 13 Ubicación de puntos de muestreo
Fuente: Autora

Tabla 11 Coordenadas de los puntos de muestreo
Fuente: Autora

CÓDIGO	COORDENADAS- PSAD-1956-UTM- Zona 17S	ZONA DE MUESTREO	RIO
1I	698141 9664023	-	Irquis-naciente
2I	699137 9663840	Quebrada Quinuahuaycu alto	Irquis-adyacente boca mina
3I	700018 9662981	Quebrada Quinuahuaycu	Irquis-salida de la concesión
1P	698448 9662815	-	Portete-naciente
2P	699249 9661368	Quebrada Kalluancay	Portete- medio
3P	699916 9660990	Quebrada Kalluancay	Portete-salida de la concesión

Obtención de la muestra: Se requirieron envases sellados herméticos con un volumen entre 250 a 450 ml (Ver Figura 13), como envases de vidrio con una tapa superior de metal. El método para la obtención de la muestra de agua se denomina **inmersión** que constó de los siguientes pasos (Pylon Electronics Inc., 2015):

1. Retirar la tapa del contenedor de muestra seleccionado.
2. Colocar lentamente el recipiente y la tapa en el agua minimizando cualquier alteración en el agua, por lo que se debe garantizar que no se formen burbujas de aire.
3. Cerrar el recipiente mientras está sumergido en el agua.
4. Retirar el contenedor de muestra de agua, secar.
5. Registrar el número de contenedor, la fecha y hora en la que se obtuvo la muestra (t_0), así como también información clave como, por ejemplo:

- ✓ Ubicación del punto de muestreo
- ✓ Tipo de muestra que se recolecto (lago, río, agua de pozo)
- ✓ Método de muestreo (inmersión)



Figura 14 Contenedor de vidrio para obtención de muestra de agua de 450 ml y 250 ml
Fuente: Autora

3.2.2. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE MATRIZ BIOLÓGICA

El muestreo con redes permite estudiar la ictiofauna de ríos profundos, lagos y embalses. El muestreo se realizó mediante redes estáticas denominadas agalladeras o redes de enmalle, son redes de un solo paño con hilo muy delgado. Se colocaron suspendidas a diferente nivel en la columna de agua y capturaron los peces que intentaron nadar en ella. Las redes se instalaron al atardecer y se revisaron a primera hora de la mañana, con tiempos de captura de unas 12 horas (Sostoa, Garcia de Jalon, & Garcia-Berthou, 2005)

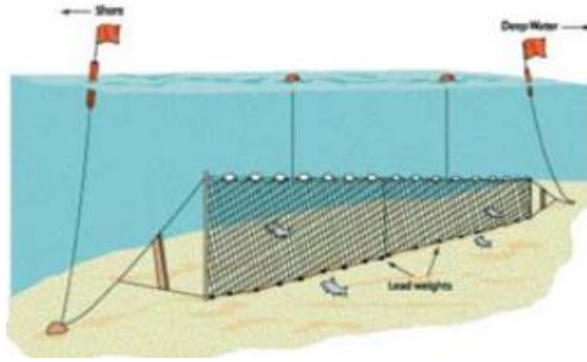


Figura 15 Esquema de redes de enmalle
Fuente: (Sostoa, García de Jalon, & García-Berthou, 2005)



Figura 16 Recolección de truchas arcoíris
Fuente: Autora

Para la recolección de macroinvertebrados en la zona de estudio se utilizó redes de Surber, para áreas con flujo continuo se colocaron la red corriente abajo y se movió el sustrato con las manos o con los pies para dislocar los macroinvertebrados y atraparlos en la red. En áreas sin flujo, la red se empujó dentro del sustrato y se recolectaron material del fondo (Ramírez, 2010).



Figura 17 Red tipo Surber

Fuente: (Sostoa, García de Jalon, & García-Berthou, 2005)

3.3. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Los peces colectados se preservaron en hielo para evitar su descomposición hasta ser llevados al laboratorio donde se realizó la disección para separar la parte de interés como el tejido muscular y órganos-huesos (Cabral Lares, 2013).



a.



b.



c.

Figura 18 Separación de parte de las truchas y pesaje
a. tejido muscular; b. órganos; c. cabeza y tejido óseo

Fuente: Autora

Según IAEA (como se citó en (Jia & Jia, 2012) afirma que las muestras biológicas incluyendo los alimentos humanos, organismos acuáticos (peces y macroinvertebrados), vegetación, los huesos y el tejido humano, se deshidratan en un horno a 60-110 °C, luego se coloca en un horno de mufla donde la temperatura se eleva paso a paso hasta 600 °C. Las muestras se incineran a ≤ 600 °C durante 24-48h para eliminar las matrices orgánicas.



Figura 19 Deshidratación de muestras biológicas
Fuente: Autora

Cada una de las partes incineradas se trituraron con un mortero para obtener una consistencia granular más fina, que permitió que el $^{222}\text{Radón}$ de la muestra exhale con facilidad y a continuación, se procedió al pesaje de las muestras, valor necesario para los cálculos correspondientes.



a.



b.



c.

Figura 20 Pesaje y triturado de muestras biológicas
 a. c. muestra de trucha deshidratada, b. muestra de macroinvertebrados
 Fuente: Autora

3.4. CAN TECHNIQUE –DETECTOR LR-115 TIPO II

La concentración de ^{226}Ra de matrices sólidas se obtuvo a partir de la exhalación de uno de sus productos hijas, un gas inerte radiactivo alfa denominado ^{222}Rn . Por lo tanto, para evaluar la exhalación del ^{222}Rn se utilizó una técnica de medición pasiva, económica y confiable denominada “*Can Technique*” o Técnica de Lata, ésta emplea un detector nuclear de estado sólido (SSNTD, sus siglas en inglés), este detector rojo LR-115 tipo II, está compuesto de una capa activa de 12 μm de nitrato de celulosa y otra de poliéster transparente de 100 μm ; las partículas alfa de ^{222}Rn y su progenie emitidas por las matrices sólidas, golpean el detector y dejan pistas latentes en él, las cuales son contadas para determinar la concentración del radionucleído (Mehta, Singh, Chauhan, & Mudahar, 2015).

Can Technique consistió en colocar las muestras (peces y macroinvertebrados) en diferentes recipientes de plástico de una geometría estándar de 10 cm de altura y 7 cm de diámetro (Ver Figura 21-a. b.). El detector LR-115 tipo II con un tamaño de 1,5 x 2 cm, se fijó en la parte superior interna del contenedor, de tal manera que la parte sensible (nitrato de celulosa) este hacia la muestra sólida (Mohamed, 2012). El recipiente se selló herméticamente y durante las primeras cuatro semanas, se colocó un imán donde en conjunto con una lámina metálica se cubre al detector (Ver Figura 21-a. c.), con la finalidad de que éste no se exponga a la muestra. Transcurrido estas semanas se alcanzó el equilibrio secular, se procedió a retirar el imán y exponer al detector durante 60 días, periodo en el cual se registran partículas alfa resultantes de la descomposición del $^{222}\text{Radón}$ en el volumen restante del contenedor (Sonkawade, Kant, Muralithar, Kumar, & Ramola, 2008).

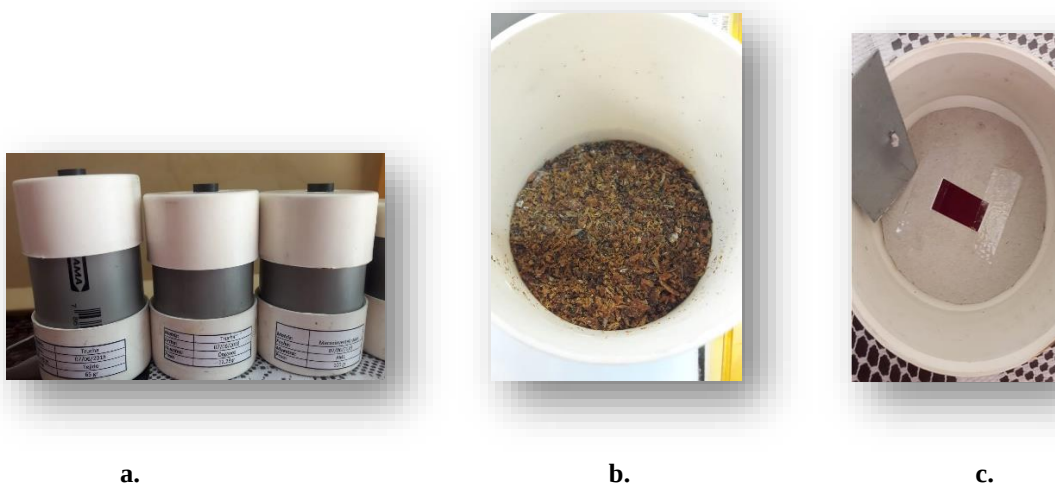


Figura 21 Disposición de muestras biológicas y exposición al detector LR-115 tipo II
a. contenedores con el imán, b. muestra de tejido muscular pulverizado c. detector LR-115 y lámina metálica
Fuente: Autora

3.5. PROCESO QUÍMICO DE REVELADO DE LOS DETECTORES LR-115 TIPO II

Transcurrido el periodo establecido para la exhalación de $^{222}\text{Radón}$ a través de las distintas muestras sólidas, se realizó el revelado químico de cada uno de los detectores, los pasos a seguir fueron los siguientes:

a. Inmersión de los detectores LR-115 tipo II en una solución química

Las partículas alfa que han sobrepasado el detector durante los días de exposición en los contenedores, pueden ser observados mediante un revelado químico que consiste en reducir el espesor del detector aproximadamente $5\text{ }\mu\text{m}$, esto se obtiene en un tiempo de 90 min, donde los detectores son colocados en tubos de ensayo que contienen 10 ml de una solución de NaOH a 2,5N que a su vez, están en un baño maría a una temperatura constante de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Verma , Shakir Khan, & Zubair, 2012).



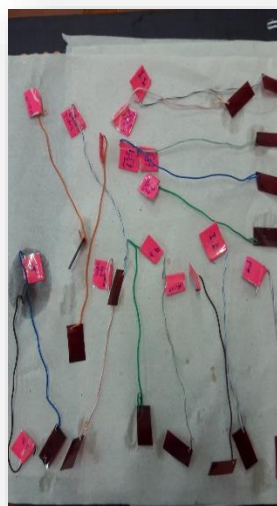
Figura 22 Inmersión de los detectores en la solución química y reposo en baño maría
Fuente: Autora

b. Lavado y secado de los detectores LR-115 tipo II

Pasado los 90 minutos de reposo de los detectores en el baño maría se procedió a colocarlos en un vaso de precipitación de 1 000 ml con agua destilada y agitarlos a $3 \text{ rpm} \pm 1$, durante 20 minutos en un agitador magnético, posterior a ello se dejó secarlos a la intemperie durante 5 minutos (Verma , Shakir Khan, & Zubair, 2012).



a.



b.

Figura 23 a. Lavado en un agitador magnético y b. secado de los detectores LR-115
Fuente: Autora

c. Conteo de trazas nucleares de los detectores LR-115 tipo II

Finalmente, las trazas nucleares reveladas se contaron a través de un microscopio óptico a una magnificación de 400X, en donde el área de visión tuvo un valor $0,19 \text{ mm}^2$ y un total de 96 campos de visión.

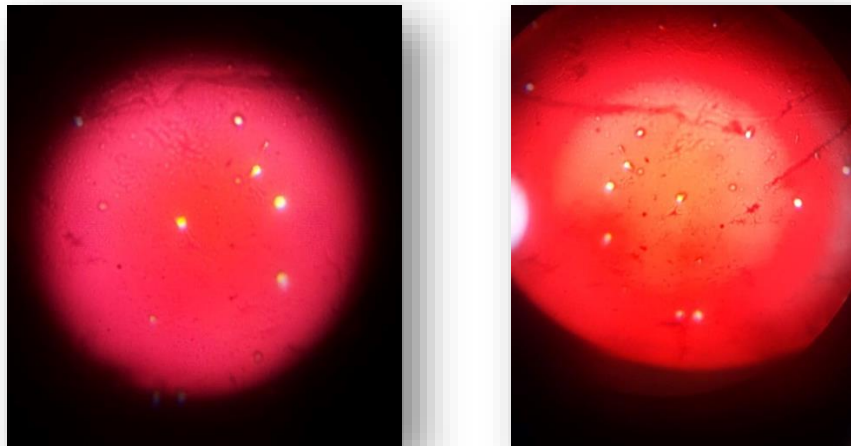


Figura 24 Trazas nucleares en un campo de visión
Fuente: Autora

3.6. CÁLCULO DE EXHALACIÓN DE ²²²RADÓN POR MASA Y ÁREA Y CONCENTRACIÓN DE ²²⁶RADIO

Posterior al revelado químico se procedió a realizar los cálculos para determinar la concentración de ²²⁶Radio de dichas matrices biológicas, mediante las siguientes ecuaciones.

a. Densidad de trazas

La densidad de trazas (ρ) se determina a través de la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{\sum Tr}{n \cdot Av} \left(\frac{\text{trazas}}{\text{cm}^2} \right) \quad (11)$$

Ecuación 11 Densidad de Trazas

Donde el número total de trazas ($\sum Tr$) contabilizado en el microscopio óptico, es dividido para el número total de campos de visión ($n=96$) multiplicado por el área de visión ($Av=0,0019 \text{ cm}^2$), siendo este expresado en **trazas/cm²** (Mohamed, 2012).

b. Exposición al ²²²Radón integrado

La exposición de radón integrado (**C**) viendo dado por la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\rho}{d \cdot k} * t \text{ (Bq*h/m}^3\text{)} \quad (12)$$

Ecuación 12 Exposición de ²²²Radón Integrado

Donde:

ρ = densidad de trazas

d= tiempo de exposición expresado en días

k= factor de calibración

t=tiempo de exposición expresado en horas

Según Somogyi (1990) el valor para el factor de calibración es 1/30 (trazas*cm⁻²*d⁻¹/Bq*m⁻³), se utiliza cuando se basa en el método cilíndrico de 3,5 cm de radio con aproximadamente ±15% de precisión.

c. Exhalación de ²²²Radón por masa y área

La tasa de exhalación de radón en términos de área (**E_A**) y por masa (**E_M**) viene dada por las siguientes ecuaciones (Mohamed, 2012):

$$E_A = \frac{CV\lambda}{AT_{eff}} \text{ (Bq*h/m}^2\text{)} \quad (13)$$

Ecuación 13 Exhalación de ²²²Radón por Área

$$E_M = \frac{CV\lambda}{MT_{eff}} \text{ (Bq*h/kg)} \quad (14)$$

Ecuación 14 Exhalación de ²²²Radón por masa

Donde

C= Exposición de ²²²Radón integrado

V= Volumen de aire (**m³**)

λ = Constante de decaimiento del ²²²Radón

A= Área transversal del contenedor (**m²**)

M= Masa de la muestra (**kg**)

T_{eff}= Tiempo de exposición efectivo expresado en horas (**h**), se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$T_{eff} = t - \frac{1}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (15)$$

Ecuación 15 Tiempo efectivo de exposición

La constante de decaimiento del ²²²Radón es $7,5 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$, el volumen al igual que el área que se determinan son los efectivos, valores que hacen referencia entre el límite superior de la muestra hasta el detector LR-115 tipo II (Mohamed, 2012).

d. Concentración de ²²²Radón

La concentración de ²²²Radón (**C_{Rn}**) se determina mediante la siguiente ecuación (Mohamed, 2012):

$$C_{RN} = \frac{\rho}{k \cdot t} (\text{Bq/m}^3) \quad (16)$$

Ecuación 16 Concentración de ²²²Radón

Donde:

ρ = densidad de trazas

t= tiempo de exposición expresado en días

k= factor de calibración

e. Concentración de $^{226}\text{Radio}$

Finalmente, la concentración de $^{226}\text{Radio}$ se calculó mediante la siguiente ecuación (Mohamed, 2012):

$$C_{Ra} = \frac{\rho * h * A}{K_{Rn} * T_{eff} * M} \text{ (Bq/kg)} \quad (17)$$

Ecuación 17 Concentración de $^{226}\text{Radio}$

Donde

ρ = densidad de trazas

h = Altura de vacío entre la parte superior de la muestra hasta el detector

A = Área transversal del contenedor (m^2)

M = Masa de la muestra (kg)

T_{eff} = Tiempo efectivo de exposición (h)

3.7. MEDICIÓN DE $^{226}\text{RADIO}$ DE AGUA POR CENTELLEO DE CELDA LUCAS MEDIANTE PYLON AB6-A

La técnica de medición utilizada en este estudio para la detección de $^{226}\text{Radio}$ en el agua a través de la exhalación de $^{222}\text{Radón}$ es denominada centelleo celda Lucas. Técnica que fue introducida por primera vez en la década de 1950 por Henry F. Lucas. La celda Lucas es de forma cilíndrica con una base transparente y la otra consta de dos puertos (Ver Figura 25). El interior de este cilindro está recubierto de un compuesto centellador, sulfuro de zinc activado con plata (ZnS(Ag)) (Baskaran, 2016). Es un método activo en el que almacena la concentración de $^{222}\text{Radón}$ en el tiempo, su lectura es directa y requiere de una

alimentación eléctrica (Sainz, Fuente Merino, Quindós Lopez, & Gutierrez Villanueva, 2010).



Figura 25 Celda Lucas 600A
Fuente: Autora

La celda Lucas 600A que se utilizó fue fabricado por Pylon Electronics Inc., tiene un volumen de 272 ml, tal volumen es el mayor y por lo tanto es más sensible. El gas $^{222}\text{Radón}$ decae y emiten partículas alfa, éstas a su vez, reaccionan con el compuesto centellador que recubre la parte interna de la celda ($\text{ZnS}(\text{Ag})$), produciendo un destello de luz que es detectado por un fotomultiplicador (PMT), este lo convierte en impulsos eléctricos, los cuales los amplifica y son reflejados en el monitor Pylon AB6-A (Pylon Electronics Inc, 2011).

El método de medición utilizado fue “*System Grab*”, que consiste en medir una muestra de $^{222}\text{Radón}$ en una instancia específica de tiempo. El fundamento de esta medición es aplicar un vacío a la celda de tal modo que, el gas extraído de la muestra de agua, ingrese al cilindro y por un lapso de 3,5 horas, periodo en que las partículas hija alcancen el equilibrio secular, posterior a esto, se procedió a medir la concentración de $^{222}\text{Radón}$ disuelto en el agua, que se obtiene mediante los cálculos correspondientes definidos por fabricante (Pylon Electronics Inc, 2011).

3.7.1. DESGASIFICACIÓN AL VACÍO DE LA MUESTRA DE AGUA- VACUUM WATER DEGASSING SYSTEM

Para medir el $^{226}\text{Radio}$ que existe en el agua, se debe eliminar el $^{222}\text{Radón}$ que está en la muestra y sellar nuevamente el recipiente, esto se logró burbujeando la muestra aproximadamente por 15 minutos con un aire libre de $^{222}\text{Radón}$ (nitrógeno comprimido). Se registró la fecha y hora (t_{0A}) del sellado, este proceso fue denominado desgasificación inicial.

Como el $^{226}\text{Radio}$ en el agua genera un nuevo $^{222}\text{Radón}$ al pasar 3,8 días, el $^{222}\text{Radón}$ que se extrajo de la muestra mediante la desgasificación, fue directamente del agua analizada.

El proceso de desgasificación de agua consistió en extraer los gases disueltos de la muestra de agua y el contenido del gas $^{222}\text{Radón}$ introducirlo dentro de la celda activo tipo Lucas. Para realizar esta extracción de gas se realizaron los siguientes pasos (Pylon Electronics Inc., 2015):

1. Colocar el conjunto burbujeador, la probeta de 250 ml en el panel y asegurarlo con las perillas.

2. Verificar que el contenido (drierita) del tubo de secado mantenga su color azul, caso contrario reemplazar con un nuevo.
3. Verificar que las válvulas de On/Off y Bypass estén cerradas (hacia abajo) y que la válvula de medición se encuentre cerrada (completamente este hacia las manecillas del reloj).
4. Conectar la bomba de vacío al panel frontal de desgasificación.
5. Conectar uno de las válvulas de la celda Lucas en el panel frontal.
6. Realizar el vacío de 27 inHg, debido a la altitud de la zona de medición se alcanza en un rango de 18 a 21 inHg, cuyo valor se debe ir controlando en el manómetro. Alcanzado el vacío se desconecta la bomba.
7. Transferir de manera rápida y cuidadosa un volumen de 190 ml de la muestra de agua a la probeta. Se debe evitar la turbulencia debido a que el radón se desgasifica y la medición no será precisa.
8. Insertar rápidamente el conjunto tapón/piedra a la probeta y cerrar herméticamente presionando el tapón.
9. Conectar inmediatamente el conjunto burbujeador al conector de entrada del burbujeador (*bubbler Intel*) y el tubo de secado (*exhaust drier*) al panel. Esto genera un burbujeo por unos segundos.
10. Abrir la válvula de On/Off y girar lentamente la válvula de medición para liberar el vacío del sistema, de tal manera que comience una tasa de burbujeo constante.
11. Transcurrido 3 minutos de burbujeo constante el manómetro alcanza a 0 inHg, se procede a abrir la válvula dosificadora (*bypass*) durante 5 a 10 segundos.

12. Se debe cerrar las válvulas On/Off y la dosificadora (*bypass*), así también desconectar tanto el *bubbler Intel* como el tubo de secado y registrar la fecha y la hora (t_1).
13. Retirar la celda Lucas y permitir que la muestra alcance el equilibrio durante un lapso de 3,5 horas.
14. Repetir el procedimiento para las diferentes muestras de agua.



a.



b.



c.



d.

Figura 26 Desgasificación de la muestra de agua
a. burbujeo de la muestra b. bomba de vacío c. manómetro a 20 inHg d. panel frontal
Fuente: Autora

3.7.2. CÁLCULO DE ^{226}Ra EN AGUA

El gas ^{222}Rn cuando decae emite partículas alfa y este número de partículas se transforman en fotones de luz que se envían a un fotomultiplicador, amplificando para contarlo e incorporar a los cálculos correspondientes. Este proceso se realizó en el monitor Pylon AB6-A, que permite medir la concentración de ^{222}Rn contenido en la muestra de agua. La celda Lucas se dejó reposar sobre el fotomultiplicador en el monitor (Ver figura 27) durante las 3,5 horas o 20 minutos antes de que se cumpla el equilibrio secular, para evitar que la fluorescencia afecte a la medición.



Figura 27 Monitor AB6-A y celda 600 A
Fuente: Autora

La configuración del monitor para este caso se realizó de la siguiente manera:

- Método de medición: *System Grab*
- Longitud de intervalo: 5 minutos
- Numero de intervalos: 3 minutos

Realizada la medición en el monitor se procedió a calcular la concentración de $^{226}\text{Radio}$ contenido en la muestra, mediante las siguientes fórmulas (Pylon Electronics Inc., 2015):

a. Cálculo de $^{226}\text{Radio}$ contenido en la muestra agua:

Para determinar la concentración de $^{226}\text{Radio}$ en las diferentes muestras de agua superficial se utilizó la siguiente ecuación:

$$Conc_{Ra} = \frac{NCPM}{\#AE * CF * Eff_c * V_S * A_2 * Eff_D * G} \quad (\text{Bq/l}) \quad (18)$$

Ecuación 18 Concentración de $^{226}\text{Radio}$ en agua

Donde:

b. Recuentos netos por minuto:

Los recuentos netos por minuto (NCPM) se determina mediante la siguiente ecuación:

$$NCPM = TCPM - SBG \quad (\text{CPM}) \quad (19)$$

Ecuación 19 Recuentos netos por minuto

Donde:

c. Recuentos totales por minuto:

Los recuentos totales por minuto (TCPM) se basa en la siguiente ecuación:

$$TCPM = \frac{TC}{(\#Int - \#Dint) * IntLen} \quad (\text{CPM}) \quad (20)$$

Ecuación 20 Recuentos totales por minuto

Donde:

TC= Total de conteos

$$TC = TC_1 + TC_2 + TC_3 \text{ (CPM)} \quad (21)$$

Ecuación 21 Total de cuentas

Las partículas alfa producidas por la desintegración radiactiva son convertidas por el detector en fotones de luz, donde estos a su vez se convierten en pulsos eléctricos que se ven reflejados en el monitor que se cuentan en intervalos definidos, a esto se le denomina conteos.

#DInt= Número de intervalos a descartar

En este proceso de medición no se descartaron los intervalos.

#Int= Número de intervalos

IntLen= Longitud de intervalos en minutos

Se denomina intervalos al periodo determinado y programado, en el cual el monitor AB6-A cuenta los pulsos de desintegración radiactiva recibidos por el fotomultiplicador (PMT). Al terminar el intervalo, el monitor almacena el número total de pulsos.

d. Fondo del sistema:

El fondo del sistema incluye tanto el fondo del monitor y detector. Esto es la suma del fondo electrónico y del detector. La configuración que se debe realizar en el monitor AB6-A es la siguiente:

- Método de medición: *System Background*
- Longitud de intervalo: 2 minutos
- Numero de intervalos: 6 minutos

Al terminar el fondo del sistema que se debe realizar previo a todas las mediciones, el monitor presenta el total en CPM y este valor se usa en todos los cálculos.

e. Números de emisores alfa y factor de conversión:

Los números de emisores alfa (#AE) para $^{222}\text{Radón}$ son 3 y el factor de conversión (CF) que se utiliza en estos cálculos es 60 desintegraciones por minuto (dpm) a Bq (dps).

f. Eficiencia celular, eficiencia de extracción de $^{222}\text{Radón}$ y volumen de muestra

La eficiencia celular (Eff_C) es aquella que se determina durante la calibración, que lo realiza el fabricante y en este caso tiene un valor de 0,745 cpm/dpm y en relación a la eficiencia de extracción de $^{222}\text{Radón}$ (Eff_D) viene dada por la celda Lucas utilizada (600 A) en el que su eficiencia es de $90 \pm 5 \%$. El volumen de muestra (V_s) que se utiliza a base del protocolo es de 0,19 litros (Pylon Electronics Inc., 2015).

g. Factor de corrección de la descomposición

El factor de corrección viene dado por la siguiente ecuación:

$$A_2 = e^{-(\lambda T_{\text{Delta}})} \quad (22)$$

Ecuación 22 Factor de corrección de la descomposición

Donde:

λ = Constante de decaimiento= $0,0001258 \text{ (min}^{-1}\text{)}$

$$T_{\text{Delta}} = t_2 - t_{0A} \text{ (min)} \quad (23)$$

Ecuación 23 Tiempo Delta

Donde:

t_{0A} = Tiempo en que la muestra se desgasificó inicialmente y esto da un punto de referencia para el crecimiento interno.

t_2 = Tiempo en el punto medio de los intervalos de conteo.

$$t_2 = \frac{t_e - t_s}{2} \text{ (min)} \quad (24)$$

Ecuación 24 Tiempo en el punto medio de medición

t_e = tiempo al final del recuento de los intervalos de interés

t_s = tiempo al comienzo del recuento de los intervalos de interés

h. Factor de corrección de crecimiento:

El factor de corrección de crecimiento (G) se ve influenciado desde el momento de la recolección de la muestra (t_0) hasta el tiempo de la desgasificación inicial (t_{0A}) y viene dado por la siguiente ecuación:

$$G = 1 - e^{-(\lambda T_{Delta\ 1})} \quad (25)$$

Ecuación 25 Factor de corrección de crecimiento

Donde:

$$T_{Delta\ 1} = t_1 - t_{0A} \text{ (min)} \quad (26)$$

Ecuación 26 Tiempo Delta 1

Donde:

t_1 = tiempo en que la muestra se desgasificó para la medición

Es importante resaltar que después de cada desgasificación se debe purgar cualquier residuo de $^{222}\text{Radón}$ en la tubería, para evitar que afecte a otras mediciones posteriores. El procedimiento a seguir para la purga es el mismo que la sección 3.7.1 con la excepción de

que se repite un mínimo de 3 veces y es recomendado usar nitrógeno comprimido a un flujo de 5 l/min (Pylon Electronics Inc., 2015). La celda Lucas también requiere de la eliminación del posible radionucleído, para lo cual se debe inyectar nitrógeno comprimido a una velocidad de flujo de 5 l/min durante 3 minutos y al finalizar es esencial desconectar la válvula del nitrógeno y luego la válvula de salida (Ver Figura 28). Terminado el procedimiento se debe almacenar la celda durante un mínimo de 24 horas (Pylon Electronics Inc., 2014).



Figura 28 Purga de la Celda Lucas 600A
Fuente: Autora

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

Una vez aplicada las técnicas tanto de recolección, procesamiento de muestras como los cálculos correspondientes a cada uno de ellos, se procede en este capítulo a presentar los resultados de las matrices ambientales estudiadas.

4.1.1. CONCENTRACIÓN DE $^{226}\text{RADIO}$ EN LA TRUCHA ARCOÍRIS

La muestra de peces que se recolectaron mediante dos muestreos desarrollados el 29 de junio y el 13 de julio del 2018 respectivamente, los cuales se obtuvieron en la zona adyacente del lugar seleccionado para la extracción de metales o también denominada boca mina. En este lugar se encontró una cantidad de individuos razonables para poner en práctica la técnica de la lata, en comparación con los otros puntos estratégicos, en los cuales el número de individuos no fue lo suficientemente alto para poder aplicar la técnica antes mencionada. En relación a las matrices seleccionadas para encontrar la concentración de $^{226}\text{Radio}$ fueron el tejido muscular independientemente de los huesos y órganos, siendo las dos últimas las que formaron una segunda matriz.

La trucha arcoíris es una especie íctica de la familia Salmonidae, presente en América del Sur, donde su hábitat generalmente es en aguas frías de ríos y lagos, tolerando un rango de temperatura entre los 0 a 30 °C., especie muy resistente capaz de desplazar a especies endémicas. Cabe destacar que se recolectaron 7 truchas de diferente tamaño en el primer muestreo, obteniendo un peso seco de 65 gr de tejido muscular y 12,23 gr de huesos-

órganos. En el segundo muestreo (13 de julio del 2018) se recolectaron 11 peces, con un peso seco de tejido muscular de 100 gr y 20,61 gr de muestras incineradas y trituradas de huesos-órganos.

En la tabla 12 se presentan los resultados obtenidos del primer muestreo, en donde se reflejó que la concentración $^{226}\text{Radio}$ en el tejido muscular fue de **0,17 $\pm$ 0,04 Bq/kg** y correspondiente a la matriz hueso-órganos se obtuvo una concentración de **4,69 $\pm$ 0,51 Bq/kg** peso seco.

La tabla 13 refleja que en el segundo muestreo se obtuvo una concentración de $^{226}\text{Radio}$ en el tejido muscular de **0,19 $\pm$ 0,03 Bq/kg**, mientras que en los huesos-órganos se presentó una concentración de este radioisótopo de **2,46 $\pm$ 0,31 Bq/kg** peso seco.

Mediante el Gráfico 1, se representa una comparación de concentración de $^{226}\text{Radio}$ en los peces entre los dos muestreos que se realizaron, mientras que en el Gráfico 2, se ilustra un porcentaje de la concentración del radioisótopo en estudio, presente en el tejido muscular y huesos-órganos de la trucha arcoíris.

Gráfico 1 Comparación de Concentración de $^{226}\text{Radio}$ en la trucha arcoíris perteneciente a los dos muestreos
Fuente: Autora

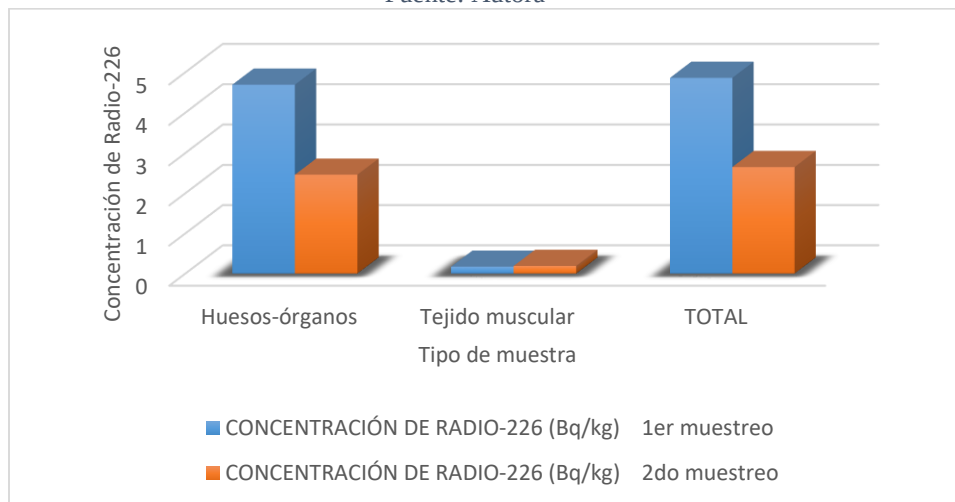


Gráfico 2 Porcentaje de $^{226}\text{Radio}$ presente en las truchas arcoíris
Fuente: Autora

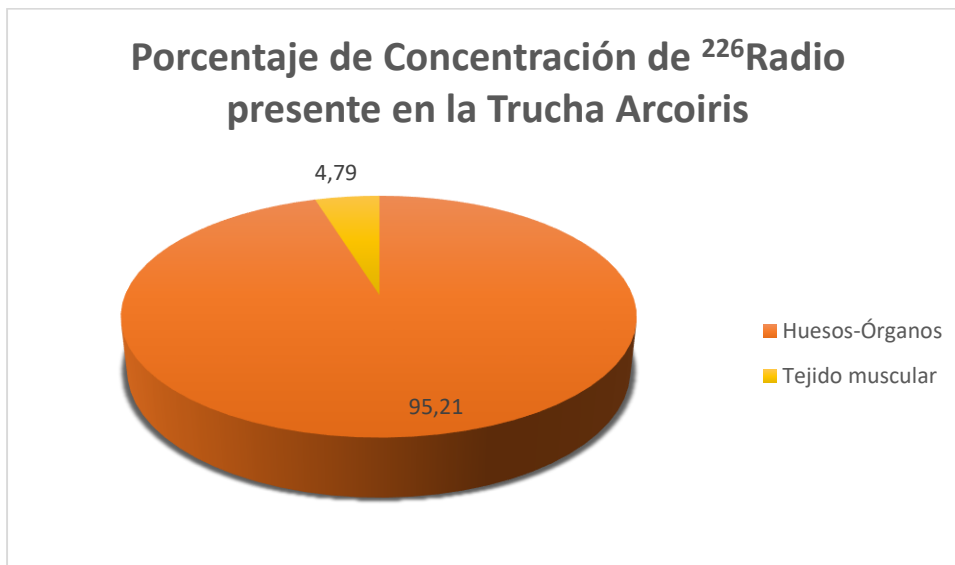


Tabla 12 Resultados obtenidos en el primer muestreo de las truchas arcoíris en el río Irquis
Fuente: Autora

<u>1ER MUESTREO</u>														
Punto muestreo	Número de trazas		Densidad de trazas ρ (Trazas/cm²)		Exposición de ²²²Radón integrado C (Bq*h /m³)		Exhalación ²²²Radón por área E_A (Bq*h/m²)		Exhalación de ²²²Radón por masa E_M (Bq*h/kg)		Concentración de actividad de ²²²Radón C_{Rn} (Bq/m³)		Concentración de actividad de ²²⁶Radio C_{Ra} (Bq/Kg)	
HO1	84	±9,17	445,63	±48,65	324094,55	±35381,82	0,11	±0,012	0,035	±0,004	146,78	±16,02	4,69	±0,51
TM1	20	±4,47	106,1	±23,71	77163,64	±17243,64	0,02	±0,005	0,001	±0,0003	34,95	±7,81	0,17	±0,04
TOTAL	104	±13,64	551,73	±72,36	401258,19	±52625,46	0,13	±0,017	0,036	±0,0043	181,73	±23,83	4,86	±0,55

Tabla 13 Resultados obtenidos en el segundo muestreo de las truchas arcoíris en el río Irquis
Fuente: Autora

2DO MUESTREO

Punto muestreo	Número de trazas		Densidad de trazas ρ (Trazas/cm ²)		Exposición de ²²² Radón integrado C (Bq*h /m ³)		Exhalación de ²²² Radón por área E _A (Bq*h/m ²)		Exhalación de ²²² Radón por masa E _M (Bq*h/kg)		Concentración de actividad de ²²² Radón C _{Rn} (Bq/m ³)		Concentración de actividad de ²²⁶ Radio C _{Ra} (Bq/Kg)	
HO2	63	±7,94	334,23	±42,12	243076,36	±30632,73	0,098	±0,012	0,018	±0,002	128,2	±16,16	2,46	±0,31
TM2	35	±5,92	185,68	±31,41	135040	±22843,64	0,04	±0,006	0,001	±0,0002	71,22	±12,05	0,19	±0,03
TOTAL	98	±13,86	519,91	±73,53	378116,36	±53476,37	0,138	±0,018	0,019	±0,0022	199,42	±28,21	2,65	±0,34

4.1.2. CONCENTRACIÓN DE $^{226}\text{Radio}$ EN MACROINVERTEBRADOS

Las muestras de macroinvertebrados recolectados en el primer muestreo y segundo muestreo realizados el 29 de junio y el 13 de julio del 2018 respectivamente, en los tres puntos estratégicos del Río Irquis, fueron recolectados en conjunto con el sustrato de los cuales fueron sedimentos, algas y macrófitas debido a que, la cantidad de masa recomendable para emplear la técnica utilizada (*“Can Technique”*), no la pudo abastecer únicamente los macroinvertebrados.

Cada muestra de macroinvertebrados recolectada en el Río Irquis, se expuso a los detectores LR-115 tipo II durante un tiempo efectivo de 86,44 días para el primer muestreo y 73,44 días para el segundo muestreo, los macroinvertebrados encontrados fueron variados en relación a su tamaño y aspecto, los cuales no tuvieron un proceso de clasificación ya que no es necesario de qué tipo de especie proviene, sino la cantidad que se recolecte.

En la tabla 14 se presenta los resultados obtenidos del primer muestreo para cada punto seleccionado del Río Irquis, se reflejó una menor concentración de $^{226}\text{Radio}$ (**$0,65 \pm 0,05$ Bq/kg**) en el punto IM1 correspondiente a la naciente del río, así como también una mayor concentración de $^{226}\text{Radio}$ (**$1,29 \pm 0,07$ Bq/kg**) se presentó en el punto IM3 referente a la salida de la concesión. El promedio que se reflejó en relación a la concentración de este radionucleido estudiado en el río Irquis fue de **$0,88 \pm 0,06$ Bq/kg**.

En la tabla 15, se observan los resultados obtenidos en el segundo muestreo para cada uno de los tres puntos estratégicos del Río Irquis, presentando en el punto IM1 correspondiente a la naciente del río, la menor concentración de $^{226}\text{Radio}$ (**$0,86 \pm 0,07$ Bq/kg**), por otro lado, la mayor concentración de $^{226}\text{Radio}$ fue de **$1,29 \pm 0,08$ Bq/kg**, en el punto IM3

correspondiente a la salida de la concesión. El promedio que se reflejó en relación a la concentración de este radionucleido en el río Irquis fue de **1,074 ±0,07 Bq/kg**.

A continuación, se muestran los gráficos correspondientes a la concentración de ²²⁶Radio obtenida en los macroinvertebrados del río Irquis, correspondientes al primer (Gráfico 3) y segundo muestreo (Gráfico 4).

Gráfico 3 Concentración de ²²⁶Radio en el Río Irquis (29 junio del 2018)
Fuente: Autora

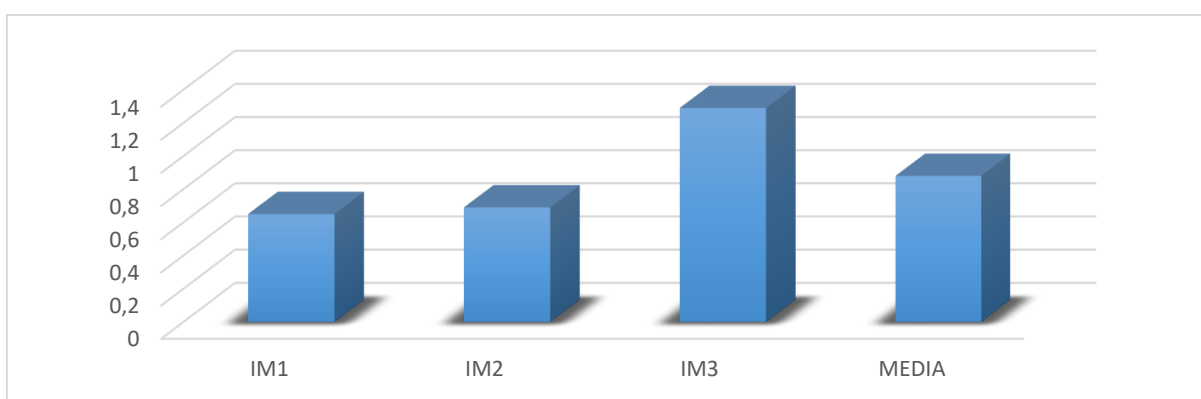


Gráfico 4 Concentración de ²²⁶Radio en el Río Irquis (13 julio del 2018)
Fuente: Autora

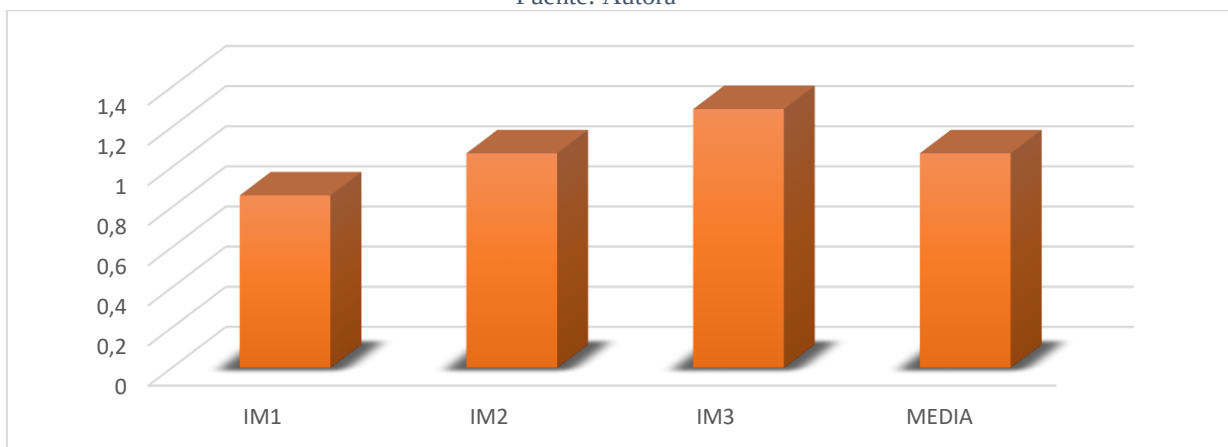


Tabla 14 Resultados obtenidos en el primer muestreo de macroinvertebrados en el Río Irquis
Fuente: Autora

<u>1ER MUESTREO</u>														
Punto muestreo	Número de trazas		Densidad de trazas ρ (Trazas/cm²)		Exposición de ²²²Radón integrado C (Bq*h /m³)		Exhalación De ²²²Radón por área E_A (Bq*h/m²)		Exhalación de ²²²Radón por masa E_M (Bq*h/kg)		Concentración de actividad de ²²²Radón C_{Rn} (Bq/m³)		concentración de actividad de ²²⁶Radio C_{Ra} (Bq/Kg)	
IM1	150	±12,25	795,77	±64,99	578741,82	±47265,45	0,13	±0,0103	0,0048	±0,0004	262,11	±21,41	0,65	±0,05
IM2	161	±12,69	854,13	±67,32	621185,45	±48960	0,13	±0,0106	0,0052	±0,0004	281,33	±22,17	0,69	±0,05
IM3	300	±17,32	1591,55	±91,89	1157490,91	±66829,09	0,25	±0,0145	0,0097	±0,0006	524,23	±30,27	1,29	±0,07
PROMEDIO IRQUIS	203,67	±14,09	1080,48	±74,73	785806,06	±54351,51	0,17	±0,0118	0,0066	±0,0005	355,89	±24,62	0,88	±0,06

Tabla 15 Resultados obtenidos del segundo muestreo de macroinvertebrados en el Río Irquis
Fuente: Autora

<u>2DO MUESTREO</u>														
Punto muestreo	Número de trazas		Densidad de trazas ρ (trazas/cm²)		Exposición de ²²²Radón integrado C (Bq*h /m³)		Exhalación de ²²²Radón por área E_A (Bq*h/m²)		Exhalación de ²²²Radón por masa E_M (Bq*h/kg)		Concentración de actividad de ²²²Radón C_{Rn} (Bq/m³)		Concentración de actividad de ²²⁶Radio C_{Ra} (Bq/Kg)	
IM1	170	±13,04	901,88	±69,18	655912,73	±50312,73	0,17	±0,013	0,006	±0,0005	345,95	±26,54	0,86	±0,07
IM2	211	±14,53	1119,39	±77,08	814101,82	±56058,18	0,21	±0,014	0,008	±0,001	429,38	±29,57	1,07	±0,07
IM3	253	±15,91	1342,21	±84,41	976152,73	±61389,09	0,25	±0,016	0,0096	±0,001	514,85	±32,38	1,29	±0,08
PROMEDIO IRQUIS	211,33	±14,49	1121,16	±76,89	815389,09	±55920	0,21	±0,014	0,008	±0,0008	430,06	±29,5	1,074	±0,07

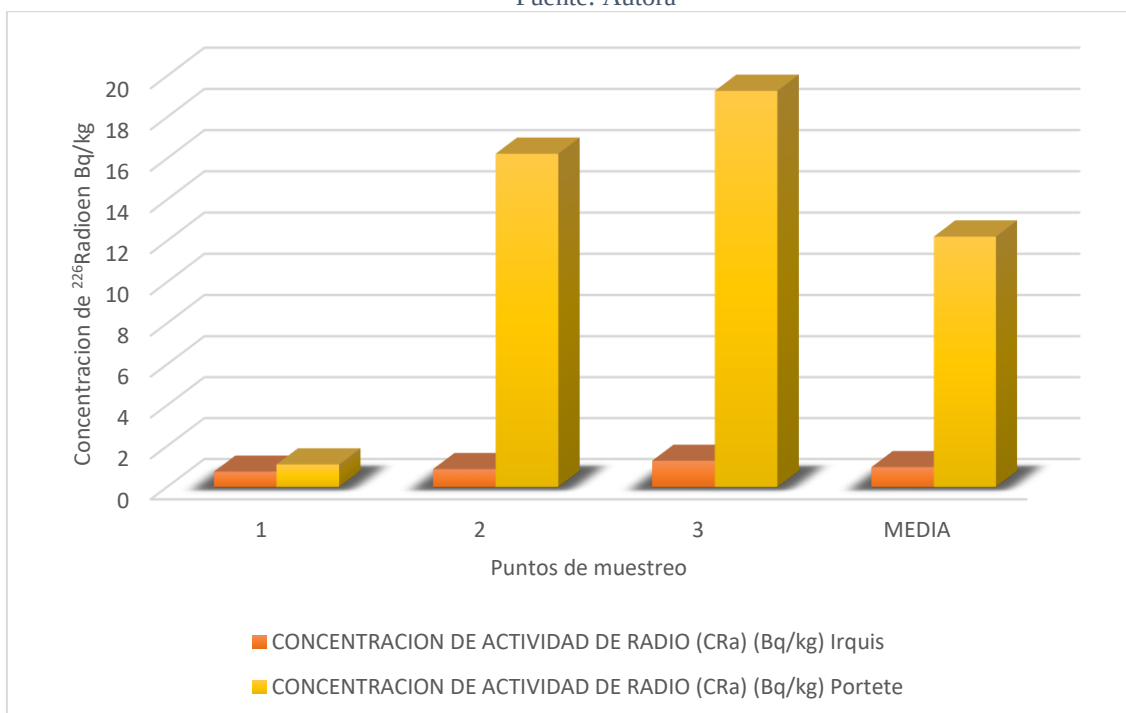
Las muestras de macroinvertebrados-sustrato del Río Portete que se evaluaron en este estudio en el que se llevó a cabo, un muestreo el 13 de julio del 2018, fecha en la que se recolectaron una determinada cantidad de macroinvertebrados conjuntamente con su sustrato, con la finalidad de alcanzar la cantidad de peso en seco, necesaria para utilizar la técnica de la lata.

La exhalación de $^{222}\text{Radón}$ de cada una de las muestras de macroinvertebrados tuvo un tiempo efectivo de alrededor de 73,44 días, para ello, mediante los cálculos realizados se obtuvo la concentración proporcional de $^{226}\text{Radio}$ de cada una de las muestras recolectadas, descartando la especie de los individuos, en los tres puntos estratégicos del Río Portete.

En la tabla 16 se muestran algunos valores como el número de trazas reveladas encontradas en el detector LR-115 tipo II, así como también la exhalación de $^{222}\text{Radón}$ en términos de masa y área. Además, se proporciona la concentración de $^{226}\text{Radio}$ para lo cual existió un menor valor **(1,11 $\pm$ 0,08 Bq/kg)** en el punto PM1 perteneciente a la naciente del río y una alta concentración de este radioisótopo **(19,28 $\pm$ 0,08 Bq/kg)** a la salida de la concesión (PM3). La media de concentración de $^{226}\text{Radio}$ en el río Portete fue de **12,21 $\pm$ 0,23 Bq/kg**.

El gráfico 5 se observa una comparación entre las concentraciones de $^{226}\text{Radio}$ presente en los macroinvertebrados de los tres puntos estratégicos tanto del río Irquis como del río Portete.

Gráfico 5 Concentración de ^{226}Ra en macroinvertebrados de los ríos Irquis y Portete
Fuente: Autora



Nota: 1 corresponde a la naciente de los dos ríos; 2 representa el punto medio tanto del río Irquis como Portete y el 3 son los puntos de muestreo a la salida de la concesión.

Tabla 16 Resultados Obtenidos de cada punto de muestreo de macroinvertebrados en el Río Portete
Fuente: Autora

Punto muestreo	Número de trazas		Densidad de trazas ρ (trazas/cm ²)		Exposición de ²²² Radón integrado C (Bq*h /m ³)		Exhalación de ²²² Radón por área E _A (Bq*h/m ²)		Exhalación de ²²² Radón por masa E _M (Bq*h/kg)		Concentración de actividad de ²²² Radón C _{Rn} (Bq/m ³)		Concentración de actividad de ²²⁶ Radio C _{Ra} (Bq/Kg)	
PM1	219	±14,8	1161,83	±78,52	844967,27	±57105,45	0,22	±0,015	0,008	±0,001	445,66	±30,12	1,11	±0,08
PM2	3192	±56,5	16934,09	±299,74	12315701,8	±217992,73	3,14	±0,056	0,121	±0,002	6495,62	±114,98	16,23	±0,29
PM3	3791	±61,57	20111,88	±326,64	14626821,8	±237556,36	3,73	±0,061	0,144	±0,002	7714,57	±125,29	19,28	±0,31
MEDIA PORTETE	2400,67	±44,29	12735,93	±234,97	9262496,97	±170884,85	2,36	±0,044	0,091	±0,0017	4885,28	±90,13	12,21	±0,23

4.1.3. CONCENTRACIÓN DE $^{226}\text{RADIO}$ EN EL AGUA DE LOS RÍOS IRQUIS Y PORTETE

Las muestras que se recolectaron en los tres puntos seleccionados de cada río, los cuales corresponden a la naciente, punto medio o adyacente a la zona de perforación (boca mina) y a la salida de la concesión, se obtuvieron el día 13 de julio en el río Irquis y el 14 de julio en el río Portete.

Las muestras de agua se recolectaron en recipientes de vidrio (450 ml), para evitar la pérdida de gas $^{222}\text{Radón}$ y que esto afecte a la medición, en la recolección se aseguró evitar la aparición de burbujas. Cabe destacar que los parámetros físicos químicos como pH, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, nitratos y algunos metales como bario, hierro, manganeso, fueron valores que se obtuvieron a través de los análisis de *GRUNTEC Enviromental Services*.

En la tabla 17, se presentan los valores de la concentración de $^{226}\text{Radio}$ en el río Irquis que, mediante el valor de la media entre todas las mediciones de cada una de las muestras de agua, se analiza la concentración de cada punto de muestreo, en donde en este estudio se encontró un valor menor perteneciente al punto 1I-naciente de **39,27 mBq l⁻¹** y un valor mayor de **119,07 mBq l⁻¹**, que corresponde al punto de muestreo 3I-salida de la concesión.

Tabla 17 Concentración de $^{226}\text{Radio}$ de los tres puntos de muestreo en el río Irquis
Fuente: Autora

NACIENTE-1I						
Número de mediciones	Fecha (dd/mm/aaaa)	t_{0a} Hora	Fecha (dd/mm/aaaa)	t_1 Hora	Total de cuentas (TC)	Concentración de $^{226}\text{Radio}$ (mBq/l ⁻¹)
1	12/11/2018	15:00	16/11/2018	14:52	88	54,84
2	16/11/2018	18:50	20/11/2018	14:25	48	20,62
3	22/11/2018	14:15	26/11/2018	9:45	62	65,45
4	26/11/2018	14:15	30/11/2018	13:27	45	16,18
MEDIA					60,75	39,27
MÁXIMO					88	65,45
MÍNIMO					45	16,18
MEDIANA					55	37,73

ADYACENTE BOCA MINA-2I

Número de mediciones	Fecha (dd/mm/aaaa)	t_{0A} Hora	Fecha (dd/mm/aaaa)	t_1 Hora	Total de cuentas (TC)	Concentración de $^{226}\text{Radio}$ (mBq l ⁻¹)
1	2/11/2018	15:00	6/11/2018	18:30	79	42,79
2	9/11/2018	17:00	13/11/2018	16:15	71	13,51
3	18/11/2018	20:30	22/11/2018	9:24	90	61,39
4	25/11/2018	22:00	29/11/2018	9:35	79	41,90
MEDIA					79,75	39,90
MÁXIMO					90	61,39
MÍNIMO					71	13,51

MEDIANA

79

42,35

SALIDA DE LA CONCESIÓN-3I

Número de mediciones	t_{0A}		t_1		Total de cuentas (TC)	Concentración de $^{226}\text{Radio}$ (mBq l ⁻¹)
	Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora	Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora		
1	5/11/2018	21:00	9/11/2018	11:07	74	99,87
2	11/11/2018	21:00	15/11/2018	10:24	109	223,45
3	15/11/2018	14:35	19/11/2018	9:02	73	108,77
4	19/11/2018	9:30	23/11/2018	13:10	63	76,78
5	23/11/2018	17:20	27/11/2018	15:13	60	86,48
MEDIA					75,8	119,07
MÁXIMO					109	223,45
MÍNIMO					60	76,78
MEDIANA					73	99,86

Lo que respecta al río Portete, también se recolectaron las muestras de agua en los tres puntos seleccionados que pertenecen a la naciente del río, punto medio y por ultima a la salida de la concesión. La recolección se realizó el 14 de julio del 2018 y la cantidad de muestra fue 450 ml para cada punto de muestreo, al igual que en el muestreo del río Irquis se tomaron las precauciones como la ausencia de burbujas en el recipiente al momento de la toma de la muestra y el sellado hermético para evitar el escape del gas $^{222}\text{Radón}$.

En la tabla 18, se observa que en el punto 1P perteneciente a la naciente del río existe un valor de concentración de $^{226}\text{Radio}$ de **57,53 mBq l⁻¹**, en comparación a los otros dos puntos de muestreo (punto medio del río y a la salida de la concesión), tal es el caso que, a la salida de la concesión en el punto 3P se obtuvo una mayor concentración con un valor de **146,39 mBq l⁻¹**.

En la tabla 19, se presentan los parámetros físico-químicos de los dos puntos de muestreo de cada efluente, correspondientes al punto medio y salida de la concesión en el río Portete, así también se obtuvieron valores de estos parámetros, pertenecientes al punto adyacente a la boca mina o zona de perforación y de la salida de la concesión en el río Irquis. Cabe mencionar que estos valores se otorgaron mediante los análisis que realizó GRUNTEC *Enviromental Services*. En todos los puntos de muestreo analizados de los dos ríos el pH tendió a ser neutro; en relación a los sólidos disueltos totales (SDT) el punto 2I (punto adyacente a la boca mina del río Irquis) se encontró un valor mayor (**17**) y en el punto 2P (punto medio del río Portete) presentó una cantidad menor de sólidos (**13**). El mayor contenido de oxígeno disuelto (OD) que se obtuvieron en estos análisis recae en el punto 2I que pertenece al río Irquis adyacente de la boca mina, con un valor de **7,86 mg/l** y en el punto 3I (punto de muestreo a la salida de la concesión en el río Irquis) hubo un valor menor de **6,83 mg/l** de este parámetro. En cuanto al cloro total residual, los cuatro puntos

analizados presentaron valores **<0,1 mg/l**; los contenidos de nitratos fueron iguales en los tres puntos analizados (2I, 2P Y 3P) con un valor de **<0,05 mg/l** y existió una concentración mayor en el punto 3I de **0,06 mg/l**. En este estudio se encontró una mayor concentración de bario (**0,039 mg/l**) en el río Portete en el punto 2P (punto medio) y un menor contenido de **0,022 mg/l** en los 2 puntos del río Irquis correspondientes a la zona adyacente de la boca mina y a la salida de la concesión. Por último, el contenido de hierro presente en el río Irquis en la zona adyacente de la boca mina (2I) fue mayor con un valor de **0,56 mg/l** y en el río Portete a la salida de la concesión (3P) obtuvo un valor menor de **0,24 mg/l**.

En el gráfico 6 se presenta las concentraciones medias de ²²⁶Ra de los tres puntos de muestreo seleccionados de cada río tanto del Irquis como Portete.

Tabla 18 Concentración de $^{226}\text{Radio}$ en los tres puntos de muestreo del río Portete
Fuente: Autora

NACIENTE-1P						
Número de mediciones	t_{0a}		t_1		Total de cuentas (TC)	Concentración de $^{226}\text{Radio}$ (mBq l ⁻¹)
	Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora	Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora		
1	1/11/2018	16:38	5/11/2018	13:17	51	27,16
2	16/11/2018	18:50	20/11/2018	13:54	89	99,64
3	22/11/2018	14:15	26/11/2018	10:17	81	59,22
4	26/11/2018	14:20	30/11/2018	12:57	76	44,10
MEDIA					74,25	57,53
MÁXIMO					89	99,64
MÍNIMO					51	27,16
MEDIANA					78,5	51,66
PUNTO MEDIO-2P						
Número de Mediciones	t_{0a}		t_1		Total de cuentas (TC)	Concentración de $^{226}\text{Radio}$ (mBq l ⁻¹)
	Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora	Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora		
1	2/11/2018	15:00	6/11/2018	15:08	72	87,74
2	9/11/2018	17:00	9/11/2018	17:00	63	82,79
3	18/11/2018	20:30	22/11/2018	9:57	57	84,01

4	25/11/2018	22:00	29/11/2018	10:07	65	82,98
MEDIA					64,25	84,38
MÁXIMO					72	87,74
MÍNIMO					57	82,79
MEDIANA					64	83,50

SALIDA DE LA CONCESIÓN-3P

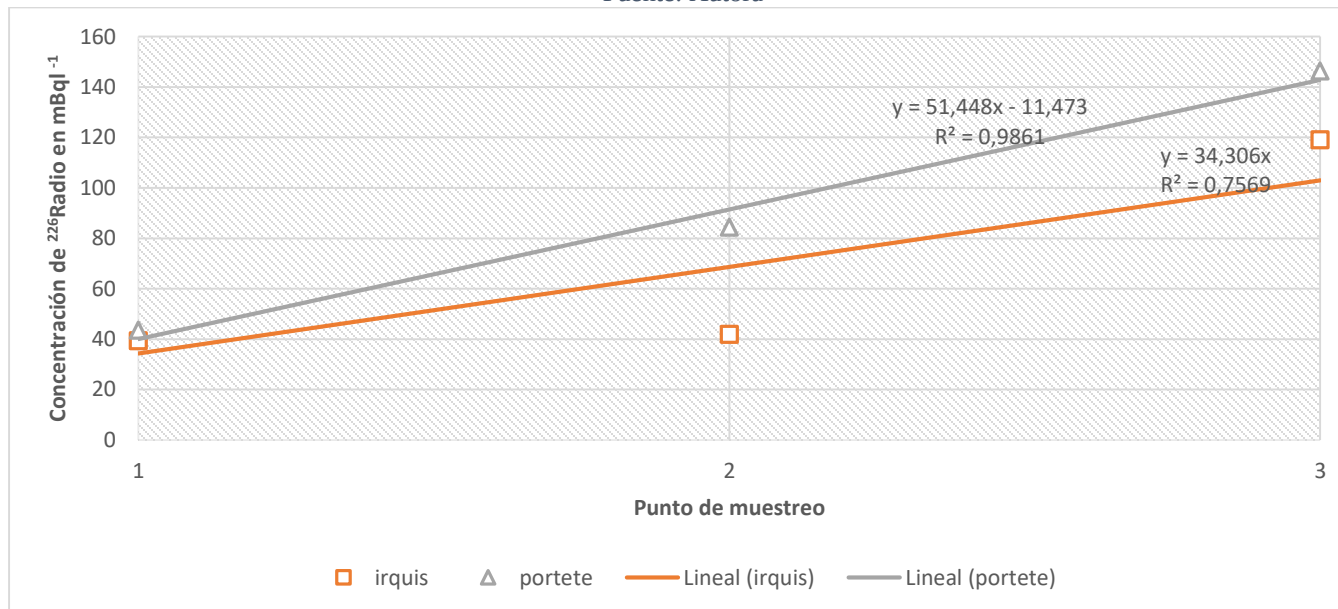
Número de Mediciones	t _{0A}		t ₁		Total de cuentas (TC)	Concentración de ²²⁶ Raio (mBq l ⁻¹)
	Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora	Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora		
1	11/11/2018	21:00	15/11/2018	9:49	124	255,71
2	15/11/2018	14:35	19/11/2018	9:49	104	148,87
3	19/11/2018	9:30	23/11/2018	13:10	99	71,93
4	23/11/2018	17:20	27/11/2018	15:42	100	109,03
MEDIA					106,75	146,39
MÁXIMO					124	255,72
MÍNIMO					99	71,94
MEDIANA					102	128,96

Tabla 19 Parámetros físico-químicos del río Irquis y Portete
Fuente: Autora

PUNTO DE MUESTREO	pH	SDT	OD (mg/l)	Cl (mg/l)	Nitrato (mg/l)	Bario (mg/l)	Hierro (mg/l)	Manganeso (mg/l)
2I	7,3	17	7,8	<0,1	<0,05	0,022	0,56	0,04
3I	7,5	16	6,95	<0,1	0,06	0,022	0,38	0,013
2P	7,02	13	6,86	<0,1	<0,05	0,039	0,26	0,011
3P	7,05	14	6.83	<0,1	<0,05	0,037	0,24	0,0098

Nota: 2I corresponde al punto adyacente de la boca mina en el río Irquis; 3I es el punto a la salida de la concesión en el río Irquis; 2P pertenece al punto medio del río Portete y el 3P corresponde al punto de la salida de la concesión del río Portete

Gráfico 6 Media de concentraciones de ^{226}Ra en el río Irquis y Portete en los tres puntos estratégicos
Fuente: Autora



Nota: 1 corresponde al punto de la naciente del río Irquis y Portete respectivamente; 2 es el punto adyacente de la boca mina en el río Irquis y punto medio del río Portete y 3 es el punto a la salida de la concesión en el río Irquis y Portete respectivamente.

4.2. DISCUSIÓN

El propósito fundamental de esta investigación fue evaluar los niveles de concentración de ^{226}Ra en tres matrices ambientales como la trucha arcoíris, los macroinvertebrados-sustrato y el agua del río Irquis y Portete respectivamente, lugar en donde existe una actividad minera denominada Loma Larga, proyecto que hasta el momento de la realización de esta investigación se encontraba en fase de exploración avanzada. Como es de conocimiento el radioisótopo (^{226}Ra) estudiado, tiende a estar presente en el suelo y recursos hídricos en niveles de concentraciones inocuas para el ambiente y la salud humana, siempre y cuando una actividad antropogénica se gestiona de manera adecuada, tomando en cuenta factores importantes como la litología del lugar de estudio y las características físico-químicas de los recursos hídricos. A continuación, se discuten los principales hallazgos de la investigación que se realizó.

Swanson S.M (1983) afirma que las concentraciones de ^{226}Ra en los peces, entre ellos la trucha, presenta niveles entre 0,296 a 3,4 Bq/kg en peso seco, valores semejantes a los alcanzados en esta investigación en el que la trucha arcoíris presentó una concentración media de $3,75 \pm 0,89$ Bq/kg (peso seco). IAEA (2014) informa que en aguas superficiales no contaminadas el rango de concentración del radioisótopo (^{226}Ra) en los peces (cuerpo entero) oscila entre 0,68 a 1,12 Bq/kg (peso fresco), valores que difieren a los obtenidos en este estudio, en donde la trucha arcoíris alcanzó una concentración media de 0,011 Bq/kg (peso fresco).

Los niveles de concentración de ^{226}Ra en las matrices huesos-órganos fueron más altos que los de la matriz de tejido muscular, diferencia sustentada en que este radioisótopo, tiene

una analogía química con el calcio, elemento químico que se considera esencial para el crecimiento y fortalecimiento de los huesos de los vertebrados.

En 1998 (Clulow, Davé, Lim, & Avadhanula), en su estudio en los lagos de control, presenta niveles de $^{226}\text{Radio}$ en la trucha de lago (*Salvelinus namaycush*), contenida en el hueso con un valor $<20 \text{ mBq g}^{-1}$, así también (Stromman, y otros, 2013) en su estudio afirman que la concentración de radionucleidos se bioacumula en gran cantidad en huesos >> branquias >> riñón >> hígado, mientras que en menor cantidad se encuentra en el músculo. Por lo tanto, se confirma la validez del resultado de este estudio debido a que un 95,21% de $^{226}\text{Radio}$ se acumuló en las muestras de huesos-órganos y solo un 4,79% en la matriz del tejido muscular.

La técnica utilizada en este estudio fue un método pasivo denominado “*Can Technique*” a través de detectores de trazas nucleares (SSNTDs) cuyo objetivo es determinar la actividad de un radioisótopo, técnica que fue enfocada originalmente para materiales de construcción, pero que a lo largo del tiempo, se ha adoptado para otro tipo de muestras sólidas, tal es el caso, en 2013 (Salman & Al-Khalifa) en su estudio denominado “*The Determination of Radon activity concentration in local and imported fish of Basra Governorate/(Iraq) by using SSNTDs Technique*” en el que se realiza la medición del radioisótopo ($^{222}\text{Radón}$) en varias especies de peces tanto importados como locales. El protocolo de dicho estudio fue adoptado para este trabajo, procedimiento en el que se respetaron los parámetros como la geometría de la cámara de difusión, el tiempo para el alcance del equilibrio secular, los días mínimos de exposición de la muestra al detector LR-115 tipo II, el procesamiento de cada muestra, entre otros.

Las concentraciones de ^{226}Ra en sedimentos reportadas por (Siddeeg, Livens , & Bryan, 2012) en su estudio *“Dispersion of U-series radionuclides in stream sediments from Edale Valley, UK”* están en un rango de 15,0 a 179,0 Bq/kg. Este estudio también es comparable con *“Natural Radionuclide (U and 226-Ra) in Water, Sediment, Fish and Plant Species in the Aquatic Environment around Uranium Mining and Ore processing Site at Jaduguda, India”* de (Sethy, y otros, 2011) en el que alcanza una concentración de 165 Bq/kg en sedimentos de un río afectado por la minería y en el río de control revela que los sedimentos acuáticos (algas y macrófitas) varían entre 3,85 a 4,5 Bq/kg. Además, (Rowan, Silke, & Carr, 2013) reflejan que en el río Ottawa, Canadá hay macrófitas con concentraciones de $1,99 \pm 0,70$ Bq/kg. Recopilando lo anterior se manifiesta que los niveles de las matrices de macroinvertebrados conjuntamente con el sustrato en el que habitan como los sedimentos, plantas acuáticas como algas y macrófitas. Dichas matrices estudiadas en este estudio estuvieron dentro y por debajo de las concentraciones promedio mundiales, rescatando así que en el río Irquis existió un rango de $0,65 \pm 0,05$ Bq/kg a $1,29 \pm 0,07$ Bq/kg y en el río Portete de $1,11 \pm 0,08$ Bq/kg a $19,28 \pm 0,31$ Bq/kg.

En el estudio realizado por Bhat y Krishnaswamy (1969) en varios ríos de la India como Ganges, Sabarmati, Krishna, Cauvery, Mutha, Ulhas y Godavari reportan que la concentración de ^{226}Ra en aguas naturales son relativamente bajos, en un rango entre 0,8 a $3,0 \text{ mBq l}^{-1}$, con una media de $1,6 \text{ mBq l}^{-1}$. Sin embargo, (Porcelli , Andersson, Wasserburg, & Baskaran, 2001), afirman que estos niveles de concentraciones varían, cuando “los arroyos drenan piedra caliza, fosfatos y rocas ricas en ^{238}U ”, factor que influye para que la concentración de este radionucleido sea mayor. Propuesta que asevera (Siddeeg, 2013) en donde señala que la litología del lecho de roca a lo largo del cauce del río, cumple un papel esencial en la contribución de la concentración de ^{238}U ^{232}Th y

²²⁶Radio en las aguas naturales. Los procesos geoquímicos del ²³⁸Uranio ²³²Torio y ²²⁶Radio como es la adsorción por minerales arcillosos, óxidos insolubles como el óxido de hierro cumplen un factor clave para comprender el comportamiento de estos radioisótopos y con ello, analizar sus niveles de concentración presentes tanto en el agua como en el suelo (Siddeeg, 2013). Contrarrestando los resultados obtenidos en este estudio en donde las concentraciones de ²²⁶Radio de las muestras de agua del río Irquis oscilaron entre 37,27 mBq l⁻¹ a 119,07 mBq l⁻¹ y las muestras de agua del río Portete variaron entre 43,49 a 146,39 mBq l⁻¹, valores que se observan alarmantes, con un aumento de alrededor de 90 mBq l⁻¹, en comparación con el estudio mencionado de Bhat y Krishnaswamy. Sin embargo, se debe tomar en consideración la litología del proyecto minero Loma Larga, el cual está constituido principalmente de estratos andesíticos provenientes de rocas volcánicas (ígneas) que contienen un mayor porcentaje de sílice, óxidos de hierro y óxido de calcio. Es por ello, que las concentraciones son “elevadas”, pero en comparación con otras investigaciones con características similares al lugar analizado ya no parecen tan alarmantes. En un estudio denominado “Determinación radioquímica de Radio-226, Radio-228 y Plomo-210 en aguas del río Rimac” (De Lama & Osores, 2002) establecen una variación de concentración del radionucleido (²²⁶Radio) de <2,1 mBq l⁻¹ a 175,4 mBq l⁻¹ lugar donde en la parte alta, existen centros de explotación minera y las propiedades geológicas son similares a la presente investigación (rocas volcánicas). Otros estudios reportan que las concentraciones en cuerpos de agua dulce varían entre 0,07 a 314 mBq l⁻¹ (Hameed, Shaheed, & S.s.N., 1997).

Por último, los niveles de ²²⁶Radio de este estudio no superaron el nivel de referencia de radionucleidos para agua de consumo humano establecido por la OMS (2008) con un valor

de 1 000 mBq l⁻¹, así como también no excedió, el nivel máximo contaminante declarado por USEPA (2000) con un valor de 555 mBq l⁻¹.

Además, algunos parámetros físico-químicos, como el pH cercano a neutro (6,0 a 6,5) favorecen a una baja concentración de ²²⁶Ra. Esto lo corrobora (Oliveira y otros, 1996) y (IAEA, 2014) afirmando que este radioisótopo en pH bajos o altos es más soluble que en pH medios. (Szabo, Kraemer, DePaul, & Jacobsen, 2012) analizan la correlación de los parámetros físico-químicos del agua con el contenido de ²²⁶Ra y afirman que este metal alcalinotérreo, tiene una correlación significativa con el pH, oxígeno disuelto (OD) y sólidos disueltos totales (SDT) y también algunos metales. Las concentraciones altas de ²²⁶Ra se dan principalmente en aguas anóxicas (bajo OD) con alto contenido de hierro, manganeso, calcio, magnesio bario, estroncio y eventualmente con sólidos disueltos totales, potasio, sulfatos (SO₄) y carbonatos (HCO₃). También las altas concentraciones se dan cuando el agua es ácida (pH bajo) y contiene alta concentración de nitratos (NO₃) y aluminio. El tipo de agua tanto del río Irquis y Portete que se analizaron en este estudio, difiere totalmente de las características mencionadas anteriormente por lo que se afirma una vez más que las concentraciones de ²²⁶Ra están dentro de los promedios mundiales de aguas no contaminadas.

Según IAEA (1990) explica que “el proceso de transporte de los radionucleidos que prevalece en sistemas de agua-roca es la reacción química, una vez que estas aguas son mineralizadas y presentan un periodo de contacto relativamente mayor entre el agua y roca”, por lo tanto esto nos hace suponer que ésta es la razón por la cual existió la variación de concentración de ²²⁶Ra a lo largo de los ríos estudiados que se presentó en los dos efluentes (Irquis y Portete).

La metodología utilizada en esta investigación fue mediante el centelleo de celda Lucas a través de la desgasificación de la muestra de agua y posterior conteo con el monitor Pylon AB6-A, dicha técnica es utilizada por (Palacios, Castro, Urbani, León, & Sajo-Bohus, 1997) en su estudio. Por lo tanto, los métodos para la determinación de concentración de ^{226}Ra en el agua, son varios y ciertos de ellos, son métodos indirectos basados en determinar dicha concentración a través de la exhalación de su progenie (^{222}Rn).

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Dentro de la serie de desintegración de $^{238}\text{Uranio}$ existe un emisor alfa denominado $^{226}\text{Radio}$, que tiene una vida media aproximada de 1 600 años, cuyo radioisótopo está presente en el ambiente donde su fuente principal es la tierra (corteza terrestre); donde generalmente se encuentra en concentraciones bajas, las cuales no presentan riesgo al ambiente y al humano. Sin embargo, actividades realizadas por el hombre generan un desequilibrio a estos niveles, cuando no se realizan las actividades de manera idónea, generando así perjuicios al ambiente como suelo, agua, biota e incluso por medio de estos se transfieren al hombre mediante vías de ingestión produciendo una cadena de deterioro tanto ambiental como a la salud pública. Por lo tanto, el objetivo principal de esta investigación fue evaluar los niveles de concentración del $^{226}\text{Radio}$ en distintas matrices ambientales como la trucha arcoíris, macroinvertebrados-sustrato y agua de los ríos Irquis y Portete, en una concesión minera denominada Loma Larga que se encontraba en fase de exploración avanzada. Para lograr este objetivo se realizaron mediante dos técnicas las cuales fueron “*Can Technique*” para matrices sólidas orgánicas como fueron las truchas arcoíris o macroinvertebrados-sustrato y para las muestras de agua a través del centelleo de celda Lucas.

Los niveles de concentración del radioisótopo en todas las matrices analizadas estuvieron por debajo de los rangos establecidos en la IAEA, por lo cual no genera un riesgo para la

salud. Las matrices de huesos-órganos tuvieron una mayor acumulación de ^{226}Ra en comparación con el tejido muscular, fundamento que se asevera debido a que este radionucleido es análogo con el calcio.

Con respecto a las concentraciones de los macroinvertebrados-sustrato se concluye que los comportamientos de este radionucleido en los dos ríos tanto Irquis como Portete, respectivamente son normales, es decir existe un aumento de concentración conforme se aleja de la naciente de los ríos, fenómeno fundamentado en la mineralización del metal alcalinotérreo (^{226}Ra). Sin embargo, se encontró una diferencia significativa entre los dos ríos que fueron analizados; debido a que en el río Portete se encontraron niveles altos de concentración en relación a los valores del río Irquis, esto se asume a los componentes de la litología específica de los puntos de muestreo.

Mediante la exhalación del gas ^{222}Rn disuelto en el agua de los tres puntos estratégicos en los ríos Irquis y Portete se logró obtener las concentraciones de ^{226}Ra , los cuales reflejaron que sus niveles estuvieron dentro de los promedios mundiales de aguas superficiales no contaminadas. El comportamiento del radioisótopo también cumplió su dinámica establecida la cual radica en que conforme se dirige aguas abajo tiende a un aumento de concentración debido a que el agua tiene más contacto con la litología de las rocas del lugar. Además, los parámetros físico-químicos del agua son esenciales para comprender el comportamiento del ^{226}Ra y con ello fundamentar que este radionucleido aumenta su concentración cuando existe una mayor concentración de algunos metales como el bario o cuando el contenido de oxígeno disuelto es menor.

Este trabajo genera varias fuentes de exploración en este ámbito radio-ecológico como por ejemplo una línea de investigación inmediata futura será determinar cuáles son los factores

esenciales que generan una mayor bioacumulación en la trucha arcoíris en la que se debe tomar en cuenta factores como la etapa que se encuentra la especie, el metabolismo específico del pez, la duración de la trucha en cada punto de muestreo (naciente, punto medio-aguas abajo), entre otros.

5.2. RECOMENDACIONES

Este estudio se realizó con la finalidad de generar una línea base en relación a las concentraciones de $^{226}\text{Radio}$ en el proyecto minero Loma Larga; por lo que intenta marcar un precedente entre los estudios sobre radiactividad ambiental en el Ecuador, los cuales son pocos debido a la escasa cultura radiactiva en el país, por ello se recomienda que a raíz de esta investigación, se realice un monitoreo continuo en las matrices estudiadas en este trabajo para cuando se activen las fases de explotación de los minerales (oro, plata y cobre) y con ello generar una regulación, las cuales proyecten que las acciones ejecutadas se realicen apropiadamente de manera tal, que no afecten al entorno que los rodea.

Una mayor cantidad de muestras como de mediciones generan resultados más confiables para ello, se recomienda que en la fase de explotación del proyecto minero se realicen muestreos continuos para determinar la variación de la concentración del radionucleido $^{226}\text{Radio}$ y así tener suficiente data que permita la aplicación de análisis estadísticos favoreciendo a la comprensión del comportamiento de este radioisótopo con cada uno de los factores ambientales con los que interactúa.

La metodología aplicada al igual que la instrumentación utilizada es esencial para generar resultados eficaces, es por ello que se recomienda en relación a la desgasificación del agua

adaptar un proceso por el cual minimice la pérdida del $^{222}\text{Radón}$ al momento de trasladar la muestra a la probeta.

BIBLIOGRAFÍA

- Ademola, A. K., Bello, A. K., & Adejumbi, A. C. (2014). Determinación de la radioactividad natural y el peligro en muestras de suelo en y alrededor del área de extracción de oro en Itagunmodi, sudoeste, Nigeria. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 249-255.
- Oliveira y otros. (1996). La Variación Sazonal de ^{226}Ra y ^{222}Rn en Fuentes de Agua Mineral en Aguas de Prata-Brasil. *Proteccion Radiológica en América Latina y el Caribe, Proyecto ARCAL XVII/OIEA, VOL 1*.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry, & U.S. Environmental Protection Agency. (1990). *Toxicological Profile for Radium*. Atlanta.
- Almeida, R., Lauria, D., Ferreira, A., & Sracek, O. (2004). Groundwater radon, radium and uranium concentrations in Região dos Lagos, Rio de Janeiro State, Brazil. *Journal of Environmental Radioactivity*, 323-334.
- Ames, L., McGarrah, J. E., Walker, B. A., & Salter, P. F. (1983). Uranium and radium sorption on amorphous ferric oxyhydroxide. *Chemical Geology*, 135-148.
- Anonimo. (2001). Radium. *Human Health Fact Sheet*.
- Barros, Q. S., Urgiles, V., Orellana, D., & Atudillo, P. (2016). *Análisis de registros de biodiversidad en los páramos de las concesiones minerales de INVMetals, en el sur de los Andes Ecuatorianos*.
- Baskaran, M. (2016). Radon Measurement Techniques. En *Radon: A tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies* (pág. 260).
- Bhat, S., & Krishnaswamy, S. (1969). Isotopes of uranium and radium in Indian rivers. *Proc. Indian Academic Science*, 1-17.
- Bulbulian, S., & Rivero Espejel, A. (2012). Historia de la investigación de la radioactividad en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. *Boletín de la Sociedad Química de México*, 15-26.
- Cabral Lares, R. M. (2013). *Análisis de la concentración de uranio en peces de las represas San Marcos y el Granero*. Mexico.
- Candeias, C., Avila, P., Coelho, P., & Teixeira, J. P. (2018). Mining Activities: Health Impacts. *References Module in Earth Systems and Environmental Sciences*.
- Castro-Volvio, I. (2013). Indicadores citogenéticos para la identificación de exposición a radiación ionizante en humanos.
- Clulow, F., Davé, N., Lim, T., & Avadhanula, R. (1998). Radium-226 in water, sediments, and fish from lakes near the city of Elliot Lake, Ontario, Canada. *Environmental Pollution*, 13-28.

- Coca Pérez, M. A. (2012). Efectos de las Radiaciones sobre los Seres Humanos. *Curso regional de capacitacion en el estado actual de la terapia con radionúclidos en patología tiroidea. Hechos y Controversias*. Habana.
- Consejo de Seguridad Nuclear CSN. (2013). *Aspectos Generales de la Interacción de la Radiación con el Medio Biológico*.
- Cox, J., Robson, D., Ann Altman, K., Masun, K., Robertson, L., & Diaz, C. A. (2016). *Technical Report on the Loma Larga Project, Azuay Province, Ecuador*. Toronto.
- Curti, E. (1997). Coprecipitation of radionuclides: basic concepts literature review and first applications.
- De Lama , G., & Osore, J. (2002). Determinación Radioquímica de radio-226, radio-228 y plomo-210 en aguas del río Rimac. 47-50.
- (s.f.). *Determinacion de aerosoles radiactivos con muestreadores de bajo caudal*. Barcelona.
- Doerner, H. A., & Hoskins, W. M. (1925). Co-precipitation of radium and barium sulfates. *J. Am. Chem. Soc*, 662-675.
- Durakovic, A. (1999). Efectos médicos de la contaminación interna con uranio. *Croatian Medical Journal*, 49-66.
- Durand , J. L. (2000). *Efectos Biológicos de la Radiación Ionizante*. Instituto Balseiro Ingeniería Nuclear, Bariloche.
- Durand, J. (2012). El impacto de la extracción de oro en el Witwatersrand en los ríos y el sistema kárstico de Gauteng y la Provincia del Noroeste, Sudáfrica. *Journal of African Earth Sciences*, 24-43.
- Fisher, B. F., List, E. J., Koh, R. C., Imberger, J., & Brooks, N. H. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Orlando: Academic Press.
- Fonrouge, S. (2015). *Ondas Electromagnéticas*.
- Foro Nuclear. (22 de junio de 2010). Obtenido de <https://www.foronuclear.org/es/100957-faqs-sobre-energia/capitulo-5/115679-70-icomo-pueden-protegerse-las-personas-de-la-irradiacion-de-una-fuente-externa>
- Gisone, P., & Pérez, M. (2001). Efectos Biologicos de la Radiación. *Jornadas de la Sociedad Argentida de Radioprotección-Exposición Prenatal a las Radiaciones Ionizanes-*, (págs. 3-27). Buenos Aires.
- Gonzalez Neila, C. (2008). *Radiactividad Natural en Materiales de Construcción* . Salamanca.
- Gordon, L., & Rowley, K. (1957). Coprecipitation of radium with barium sulphate. *Anal. Chem*, 34-37.
- Hameed, P. H., Shaheed, K., & S.s.N., S. (1997). Radium-226 levels in the Cauvery river ecosystem, India. *Journal of Biosciences*, 225-230.

- IAEA. (1990). The Environmental Behaviour of Radium VOL.1. *TECHNICAL REPORTS SERIES No, 310*. Viena.
- IAEA. (2004). *Evaluación de la Exposición Ocupacional debida a Fuentes Externas de Radiación*. Viena.
- IAEA. (2014). The Environmental Behaviour of Radium: Revised Edition. *Technical Reports Series Nº476*. Viena.
- IAEA. (2014). The Environmental Behaviour of Radium: Revised Edition. *TECHNICAL REPORTS Series No. 476*. Viena.
- IAEA. (2015). Naturally Occurring Radioactive Material (NORM VII). *Proceedings of an International Symposium Beijing, China, 22-26 April 2013*. Vienna.
- IAEA. (s.f.). *Problemas Sanitarios en la Minería de Uranio*.
- ICRP. (1991). *Comisión Internacional de Protección Radiológica*. Oxford.
- Innocent, A., Onimisi, M., & Jonah, S. (2013). Evaluación de materiales de radionúclidos naturales en muestras de suelo recogidas de algunos sitios mineros en el estado de Zamfara, Nigeria. *British Journal of Applied Science & Technology*, 684-692.
- International Atomic Energy Agency, IAEA. (2006). *Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Work Involving Minerals and Raw Materials*. Vienna Austris.
- INV Minerale Ecuador S.A. (2016). *Auditoria Ambiental de Cumplimiento. Concesiones mineras: Cerro Casco y Río Falso (Proyecto Loma Larga) Periodo: oct. 2014- oct. 2016*.
- Jia, G., & Jia, J. (2012). Determination of radium isotopes in environmental samples by gamma spectrometry, liquid scintillation counting and alpha spectrometry: a review of analytical methodology. *Journal of Environmental Radioactivity*, 98-119.
- Jia, G., & Jia, J. (2012). Determination of radium isotopes in environmental samples by gamma spectrometry, liquid scintillation counting and alpha spectrometry: a review of analytical methodology. *Environmental Radioactivity*, 98-119.
- Justýn, J., & Havlík, B. (1990). Radium uptake by freshwater fish. En IAEA, *Environmental Fate of Radium, Technical Reports Series No. 310 Vol.2* (págs. 529-543). Viena.
- L'Annunziata, M. F. (2012). *Handbook of Radioactivity Analysis*. 3th Edition.
- Langmuir, D., & Riese, A. C. (1985). The thermodynamic properties of radium. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1593-1601.
- Latinominería. (7 de febrero de 2018). *Latinominería.com*. Obtenido de <http://www.latinomineria.com/2018/02/07/los-principales-proyectos-mineros-en-ecuador/#>
- Leyva Collas, M., Espinoza López, G., & Barreta Sáenz, P. (2010). *Protocolo de Monitoreo de Agua*.
- Lopez, F. (2012). *Materiales Radiactivos de Procedencia Natural en la Industria Minera*. Palermo.

- Lutgens, F. K., & Tarbuck, E. J. (s.f.). *Una Introducción a la Geología Física*.
- MacDonald, P. J., Hart, C., & Bissig, T. (2010). *Field Report on the Geology of the Quimsacocha Property, Azuay Province, Ecuador*. University of British Columbia: Report for PhD at Mineral Deposit Research Unit.
- MacDonald, P., Bissig, T., Hart, C., Barreno, J., Viera, F., Mnatilla, G., & Rogers, J. (2012). *Hydrothermal evolution of the Rio Falso Fault, Quimsacocha High Sulfidation Au-Ag-Cu District, Azuay Province, Ecuador*. Presented to SEG conference, Lima, Peru.
- Maher, K., Depaolo, D. J., & Christensen, J. N. (2006). U-Sr isotopic speedometer: Fluid flow and chemical weathering rates in aquifers. *Geochim. Cosmochim.*
- Mehta, V., Singh, S., Chauhan, R. P., & Mudahar, G. S. (2015). Surface chemical etching behavior of LR-115 type II solid state nuclear track detector. *Romanian Repors in Physics*, 865-871.
- Misdaq, M. A., Aitayoub, A., & Chaouqi, A. (2018). Analysis of ²³⁸U, ²³²Th, ²²²Rn, and ²²⁰Rn in fresh and canned marine fish samples using solid state nuclear tracks detectors and resulting alpha radiation doses to adult consumers. *The Radiation Safety Journal Health Physics*, 436-449.
- Mohamed, A.-E. (2012). An Overview on Studying ²²²Rn Exhalation Rates using Passive Technique Solid-State Nuclear Track Detectors. *American Journal of Applied Sciencies*, 1653-1659.
- Molinari, J., & Snodgrass, W. J. (1990). The Chemistry and Radiochemistry of Radium and the other elements of the uranium and thorium natural decay series . En I. A. Agency, *The Environmental Behaviour of Radium Vol. 1*. Vienna.
- Moore, W. S. (1972). Radium: element and geochemystry. *Encyclopedia of Geochemistry and Environmental Sciencies*, 1006-1007.
- Morán Reascos, D. V. (2017). *ANÁLISIS DE CONTINUIDAD DE EXTENSIÓN DE LA MINERALIZACIÓN ALREDEDOR DEL SISTEMA DE ALTA SULFURACIÓN LOMA LARGA, Tesis de Pregrado*. Quito: Universidad Central del Ecuador .
- Navarro Martinez, F., Salas García, A., Sanchez Martos, F., Baeza Espasa, A., Molina Sanchez, L., & Rodriguez Perulero, A. (2017). Radionuclides as natural tracers of the interaction between groundwater and surface water in the River Andarax, Spain. *Journal of Environmental Radioactivity*, 9-18.
- Neff, J. M. (2002). *Bioaccumulation in Marine Organisms*. ELSEVIER.
- Nour, K., Gabar, A., & Arabi, M. (2005). Radioactividad natural en suelo agrícola y fertilizante de fosfato y sus implicaciones ambientales en Qenagovernorate, Alto Egipto. *Journal Environmental Radiactivity*, 51-64.
- Ojovan, M. I., & Lee, W. E. (2005). Chapter 5 Naturally Occurring Radionuclides. En *An introduction to Nuclear Waste Immobilisation* (págs. 43-52).
- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable. Primer Apendice a la tercera edicion. VOL1.* .

- Organización Mundial de la Salud. (2016). *El radón y sus efectos en la salud*.
- Organizacion Mundial de la Salud,OMS. (2008). *Guías para la calidad del agua potable. Primer apéndice a la tercera edición VOL.1*.
- Palacios, D., Castro, D., Urbani, F., León, P., & Sajo-Bohus, L. (1997). RADON EN AGUA POTABLE DEL LITORAL CENTRAL (D.F.) Y SUS POSIBLES EFECTOS SOBRE LA SALUD DE LA POBLACIÓN. *SABER Revista Científica de Investigación de la Universidad del Oriente*.
- Piera, J. A. (s.f.). Radiobiología.
- Plaza, R. (s.f.). Prontuario de la Radiacion Electromagnética. *El Escéptico*, 40-51.
- PNUMA, P. d. (2016). *Radiación Efectos y Fuentes*.
- Porcelli , D., Andersson, P. S., Wasserburg, G. J., & Baskaran, M. (2001). Transport of U- and Th-series nuclides in a Baltic Shield watershed and the Baltic Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65, (págs. 2439-2459).
- Pylon Electronics Inc. (2011). Active Type Cell Detector Manual.
- Pylon Electronics Inc. (2014). *Radiation Monitor Manual AB6-A*. Canada .
- Pylon Electronics Inc. (2015). Instruction Manual. Vacuum Water Degassing System. Model WG-1001 Series. Canada.
- Ramirez, A. (2010). Capitulo 2: Métodos de recolección. *Revista de Biología Tropical* , 41-50.
- Reglamento de Seguridad radiologica. (1979). *Consejo Supremo de Gobierno*.
- Roig Petit, F. (2013). *Radiaciones: Aplicaciones y riesgos para la salud*. Conferencia APRJUV.
- Rowan, D., Silke, R., & Carr, J. (2013). Biota-sediment accumulation factors (BSAF) for radionuclides and sediment associated biota of the Ottawa River. *IAEA*.
- Sainz, C., Fuente Merino, I., Quindós Lopez, L., & Gutierrez Villanueva, J. (2010). Técnicas de medida del radon y sus descendientes. El interes de una estandarización de la medida.
- Salinas Mantilla, D. E. (2016). *Evaluación de Concentración de Materiales Radiactivos de Origen Natural en Procesamiento de Minería de Oro (Tesis de pregrado)*. Quito : Universidad de las Américas.
- Salman , D. J., & Al-Khalifa, I. J. (2013). The Determination of Radon Activity Concentration in local and imported fish of Basra Governorate/(Iraq) by Using SSNTDs Technique. *Journal of Basrah Researches(Sciences)*, 135-142.
- Santschi, P. H., & Honeyman, B. D. (1989). Radionucleidos en ambientes acuáticos. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry*, 213-240.
- Serna, E. (2011). Marie Curie. *Lámsakos*, 70-75.

- Sethy, N. K., Jha, V., Shukla, A., Sahoo, S., Tripathi, R., & Puranik, V. (2011). Natural Radionuclide (U and 226-Ra) in Water, Sediment, Fish and Plant Species in the Aquatic Environment around Uranium Mining and Ore processing Site at Jaduguda, India. *Journal of Ecosystem & Ecography*.
- Shoesmith, D. (1984). The Behaviour of Radium in Soil and in Uranium Mine-Tailings. Pinawa.
- Siddeeg, S. E. (2013). Geochemistry of natural radionuclides in uranium-enriched river catchments.
- Siddeeg, S. E., Livens, F., & Bryan, N. (2012). Dispersion of U-series radionuclides in stream sediments from Edala Valley, UK. *Journal of Environmental Science: Processes & Impacts*.
- Smith, B., & Amonette, A. (2006). The Environmental Transport of Radium and Plutonium: A Review. *Institute for Energy and Environmental Research*.
- Somogyi, G. (1990). Methods for measuring radium isotopes: Track Detection. En IAEA, *The Environmental Behaviour of Radium Vol.1* (págs. 229-256). Vienna.
- Sonkawade, R. G., Kant, K., Muralithar, S., Kumar, R., & Ramola, R. C. (2008). Natural radioactivity in common building construction and radiation shielding materials. *Atmosphere Environmental*, 2254-2259.
- Sostoa, A., Garcia de Jalon, D., & Garcia-Berthou, E. (2005). *Protocolos de muestreo y analisis para ictiofauna*. España.
- Stewart, G., Fowler, S., & Fisher, N. (2008). La bioacumulación de radionucleidos de las series U y Th en organismos marinos. *Radiactivity in the Enviromental*, 269-305.
- Stromman, G., Rosseland, B., Skipperud, L., Burkitbaev, L., Uralbekov, B., Heier, L., & Salbu, B. (2013). Relación de actividad de uranio en agua y peces de los lagos de Pit en Kurday, Kazajstán y Taboshar, Tayikistán. *Diario de radiactividad ambiental*, 71-81.
- Suárez González Del Rey, J., González González, J., & De Pablo Sanmartín, M. (1987). ANÁLISIS RADIOQUIMICO DE RADIO TOTAL, RADIO-226 Y RADIO-224. *Centro de Investigaciones Energeticas, Medioambientales y Tecnologicas Ciemat*.
- Suarez, O., & Gonzales, Y. (2010). *TENORM en el Ecuador: Inventario preliminar y el papel de la Autoridad Reguladora*. Quito.
- SWANSON, S. (1983). Level of Ra-226, Pb-210 and U-total in fish near a Saskatchewan Uranium Mine and Mill. *Health Physics*, 67-80.
- Szabo, Z., Kraemer, T., DePaul, V., & Jacobsen, E. (2012). Occurrence and geochemistry of radium in water from principal drinking-water aquifer systems of the United States. *Applied Geochemistry*, 729-752.
- Tsivoglou, E., Rushing, D. E., Holaday, D. A., & Bartsh, A. F. (1958). Effects of uranium ore refinery wastes on receiving waters. *Sewage Industrial Wastes*, 1012-1027.

- United States Environmental Protection Agency, E. (22 de noviembre de 2017). *Términos y Unidades de la Radiación*. Obtenido de <https://espanol.epa.gov/espanol/terminos-y-unidades-de-la-radiacion>
- UNSCEAR. (2000). *Cómite Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas*.
- UNSCEAR. (2010). *Sources and effects of ionizing radiation*. New York.
- US Environmental Protection Agency, EPA. (2000). *National Primary Drinking Water Regulations; Radionuclides*. Final rule, 40CFR parts 141 and 142. Federal Register.
- Verma , D., Shakir Khan, M., & Zubair, M. (2012). Measurements of indoor radon, thoron and their progeny in Farrukhabad city of Uttar Pradesh, India. *Iranian Journal of Radiation Research*, 193-196.
- Wendel, G. (1998). Radioactivity in mines and mine water—sources and mechanisms. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 87-92.