

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA  
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICO**



**USO DE TRAZADORES AMBIENTALES PARA GENERAR UNA LÍNEA DE  
BASE DEL CONTENIDO DE RADÓN EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA  
CUENCA DEL RIO ITATA**

**JUAN FRANCISCO HERRERA PINO**

HABILITACIÓN PROFESIONAL  
PRESENTADA A LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL

**CHILLÁN-CHILE**

**2024**

**USO DE TRAZADORES AMBIENTALES PARA GENERAR UNA LÍNEA DE  
BASE DEL CONTENIDO DE RADÓN EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA  
CUENCA DEL RIO ITATA**

Aprobado por:

José Luis Arumí Ribera  
Ingeniero Civil, Ph. D.  
Profesor Titular

---

Profesor Guía

Nicole Uslar Valle  
Ingeniero Civil Agrícola  
Profesor Asistente

---

Profesora Asesora

Víctor Parra Ramírez  
Ingeniero Civil, Dr.  
Profesor Asistente

---

Profesor Asesor

José Luis Arumí Ribera  
Ingeniero Civil, Ph. D.  
Profesor Titular

---

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez  
Ingeniera Agrónomo, Ph. D.  
Profesora Asociada

---

Decana

## **Dedicatoria**

Dedico esta tesis con todo mi cariño a mi mamá Francis Pino, por su amor incondicional y por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo y perseverancia; a mi abuela Sandra Torres y mi abuelo Armando Pino, quienes con su sabiduría y apoyo me guiaron en este camino; y a mi hermana Rafaela, cuya alegría y compañía han sido un constante motor en mi vida. También quiero agradecer a mis compañeros de carrera, con quienes compartí desafíos y aprendizajes inolvidables, y a mis amigos, que siempre estuvieron ahí para alentarme y hacer más llevadero el viaje. A♥ todos ustedes, les debo cada paso de este logro.

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al profesor José Luis Arumí, cuyo conocimiento y orientación fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo, y a la profesora María Leonor Morales, por su paciencia, dedicación y por enseñarme con tanto compromiso. A mi madre y mi abuela, les agradezco profundamente su apoyo incondicional y fundamental en esta investigación, que me permitieron alcanzar este logro. Este trabajo fue realizado como becario del proyecto ANID/FONDAP/1523A0001, oportunidad que me brindó los recursos y el respaldo necesarios para llevar a cabo esta investigación.

## ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN .....	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS .....	6
2.1. Objetivo general .....	6
2.2. Objetivos específicos.....	6
3. ANTECEDENTES GENERALES.....	7
3.1. Descripción del área de estudio .....	7
4. METODOLOGÍA.....	10
4.1. Desarrollar un procedimiento de muestreo y análisis de $^{222}\text{Rn}$ usando RAD8 .....	11
4.2. Diseñar un programa de monitoreo para estudiar la presencia de $^{222}\text{Rn}$ en distintos tipos de pozos, ríos y esteros .....	16
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	21
6. CONCLUSIONES.....	29
7. BIBLIOGRAFÍA.....	31
8. ANEXOS Y APÉNDICES.....	33

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Protocolos probados y detallados .....	14
Tabla 2. Fechas de cada campaña realizada .....	19
En el Anexo	Página
Tabla A1. Resultados experimento degradación de $^{222}\text{Rn}$ .....	33
Tabla A2. Promedio de concentración de $^{222}\text{Rn}$ para cada muestra tomada en terreno.....	34

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Cadena de desintegración del uranio y sus vidas medias. ....	5
Figura 2. Área de estudio Cuenca del río Itata .....	8
Figura 3. Líneas de nivel equipotencial de aguas subterráneas .....	9
Figura 4. Diagrama del detector de radón RAD8.....	10
Figura 5. Accesorio RAD H <sub>2</sub> O.....	11
Figura 6. Frasco de 250 mL utilizado para analizar las muestras.....	15
Figura 7. Llave del pozo ubicada en la facultad de agronomía y envases Coleman con el agua recolectada .....	16
Figura 8. Zonas de afloramiento de aguas subterráneas .....	17
Figura 9. Campañas de muestreo .....	18
Figura 10. Envases de plástico utilizados para el transporte de las muestras .....	19
Figura 11. Gráfico del protocolo seleccionado.....	21
Figura 12. Resultados del experimento de concentración de radón vs tiempo .....	22
Figura 13. Resultados del experimento con límites de decaimiento de radón .....	24
Figura 14. Profundidad de los pozos muestreados.....	25
Figura 15. Distribución de concentraciones de radón en los pozos muestreados .....	26
Figura 16. Mapa geológico de la cuenca del río Itata .....	27
En el Anexo	
Figura A1. Leyenda detallada del mapa geológico de la Figura 16.....	35

**ÍNDICE DE ECUACIONES**

Página

Ecuación 1. Ecuación de cálculo de la concentración inicial de $^{222}\text{Rn}$ en base a una cinética radiactiva de primer orden.....	23
Ecuación 2. Ecuación de cálculo de los límites inferior y superior para comprobar la adaptación de los resultados.....	24

## USO DE TRAZADORES AMBIENTALES PARA GENERAR UNA LÍNEA DE BASE DEL CONTENIDO DE RADÓN EN AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA CUENCA DEL RIO ITATA

USE OF ENVIRONMENTAL TRACERS TO GENERATE A BASELINE OF RADON CONTENT IN GROUNDWATERS OF THE ITATA RIVER BASIN

**Palabras claves:** Radón, línea de base, Aguas subterráneas, Cartografía Ambiental, RAD8, Capture 8, vida media

### RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue desarrollar una línea de base del contenido de  $^{222}\text{Rn}$  en aguas subterráneas de la cuenca del río Itata, mediante muestreos en pozos, vertientes y ríos, para su uso como trazador ambiental, se llevaron a cabo cinco campañas de muestreo, donde se extrajeron muestras de agua para la determinación del contenido de  $^{222}\text{Rn}$  mediante el equipo RAD8, para lo cual se diseñó y ajustó un protocolo analítico específico para esta investigación. Los datos obtenidos fueron procesados en el software Capture 8 y posteriormente se generaron cartografías con los resultados mediante la herramienta QGIS, lo que permitió tener una referencia acerca de la distribución espacial del radón en la cuenca. Además, se realizó un experimento complementario para evaluar la degradación del radón en agua, considerando que su vida media es de 3,82 días. Este análisis arrojó resultados favorables y comprobables, utilizando una adaptación de la ecuación de cálculo de la concentración inicial de  $^{222}\text{Rn}$  basada en la cinética radiactiva de primer orden.

## **USE OF ENVIRONMENTAL TRACERS TO GENERATE A BASELINE OF RADON CONTENT IN GROUNDWATERS OF THE ITATA RIVER BASIN**

**Keywords:** Radon, Baseline, Groundwater, Environmental Mapping, RAD8, Capture 8, half-life

### **ABSTRACT**

The objective of this research was to develop a baseline of the  $^{222}\text{Rn}$  content in groundwater in the Itata River basin, by sampling wells, springs and rivers, for use as an environmental tracer. Five sampling campaigns were carried out, where water samples were extracted to determine the  $^{222}\text{Rn}$  content using the RAD8 equipment, for which a specific analytical protocol was designed and adjusted for this research. The data obtained were processed in the Capture 8 software and subsequently maps were generated with the results using the QGIS tool, which allowed having a reference about the spatial distribution of radon in the basin. In addition, a complementary experiment was carried out to evaluate the degradation of radon in water, considering that its half-life is 3.82 days. This analysis yielded favorable and verifiable results, using an adaptation of the calculation equation for the initial concentration of  $^{222}\text{Rn}$  based on first-order radioactive kinetics.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los trazadores son sustancias con propiedades atómicas o nucleares, físicas, químicas o biológicas, que pueden facilitar la identificación, observación o vigilancia de comportamientos específicos de diversos procesos físicos, químicos o biológicos. Estos se introducen en un sistema con el fin de estudiar la evolución temporal y/o espacial de un determinado proceso. (Muñoz Hernández, 2017)

Los trazadores ambientales son herramientas importantes en el estudio de los procesos hidrológicos. Estos pueden estar presentes en la identificación del origen y movimiento del agua, evaluación del tiempo de tránsito de un sistema hidrológico, como también identificar y cuantificar la mezcla de aguas de diferentes orígenes y estudios de procesos de recarga de acuíferos.

El radón-222 ( $^{222}\text{Rn}$ ), que utilizamos como trazador ambiental es un isótopo radiactivo del gas noble radón, que tiene una vida media de 3,8 días y se forma a partir de la desintegración radiactiva del radio-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ), que a su vez proviene de la desintegración del uranio-238 ( $^{238}\text{U}$ ) presente en rocas y suelo (Figura 1). Este gas puede migrar desde el suelo y las rocas hacia el agua subterránea, donde se disuelve y puede acumularse en concentraciones significativas. Es aquí donde, debido a procesos de descargas de aguas subterráneas a aguas superficiales, y mediante la toma de muestras y análisis en puntos específicos, se puede determinar el punto de afloración del agua

subterránea que está recargando el lago, río o cualquier otro cuerpo de agua relacionado un sistema hidrológico. Es importante mencionar que el  $^{222}\text{Rn}$  es de fácil volatilización en contacto con el aire de la atmosfera y por ende con el agua superficial que está en contacto con el aire.

La entrada de  $^{222}\text{Rn}$  en los sistemas de agua subterránea puede ocurrir a través de procesos naturales, como la infiltración de agua de lluvia, donde el agua puede transportar consigo diversos compuestos químicos y gases presentes en el ambiente, incluido el  $^{222}\text{Rn}$ , o también dependiendo de la composición geológica que rodea al agua subterránea, donde destaca el granito como el tipo de roca que emite más  $^{222}\text{Rn}$  al agua, de igual modo la actividad humana igual puede afectar al ingreso de  $^{222}\text{Rn}$  a los sistemas de agua subterránea, a través de alteraciones del suelo y subsuelo con actividades como la minería, construcción de túneles o extracción de materiales y excavaciones, o la construcción de pozos, debido a que estos pueden conectar estratos profundos ricos en uranio o  $^{222}\text{Rn}$  con sistemas de agua subterránea, lo que incrementa su concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en estas aguas.

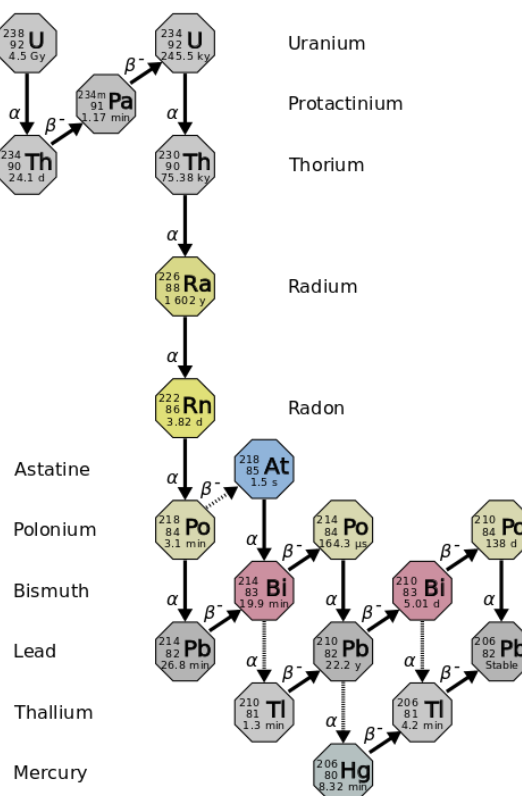


Figura 1. Cadena de desintegración del uranio y sus vidas medias.

El  $^{222}\text{Rn}$  tiene una medición y cuantificación relativamente fácil, debido a sus características solubles en agua y no reactivas durante su transporte en este recurso, por lo que cumple las características de un trazador ambiental. Debido a todo lo mencionado anteriormente se buscará generar una línea de base que facilite el estudio de la interacción aguas superficiales-subterráneas en la cuenca del río Itata a través del muestreo y posterior medición e identificación de  $^{222}\text{Rn}$  en distintos pozos, ríos y esteros dentro del área definida. Esto será complementado por mediciones de conductividad eléctrica y toma de temperatura en los puntos de muestreo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Generar una línea de base de contenidos de  $^{222}\text{Rn}$  en agua subterránea de la cuenca del Río Itata para facilitar el estudio de la interacción aguas superficiales-subterráneas

### **2.2. Objetivos específicos**

- Desarrollar un procedimiento de muestreo y análisis de  $^{222}\text{Rn}$  usando RAD8
- Diseñar un programa de monitoreo para estudiar la presencia de  $^{222}\text{Rn}$  en distintos tipos de pozos, ríos y esteros
- Establecer una línea de base del contenido de  $^{222}\text{Rn}$  en aguas subterráneas en la cuenca del Itata

### **3. ANTECEDENTES GENERALES**

#### **3.1. Descripción del área de estudio**

La cuenca del río Itata alcanza una superficie de 11.293 Km<sup>2</sup> y está formada principalmente por tres cursos de agua: los ríos Itata, Ñuble y Diguillín. Posee una longitud de 180 km incluyendo dos ríos formativos del Itata: el Cholguán y Huépil. El régimen del río Itata es mixto, ya que los principales afluentes nacen en la Cordillera y Precordillera de Los Andes adquiriendo su aporte de los deshielos primaverales, además del aporte hecho por las precipitaciones invernales. Este río cruza el valle longitudinal donde en su entrada presenta un gran salto de agua que muestra el desnivel del terreno. Su caudal medio anual varía entre 30 y 67 m<sup>3</sup>, según sea el año estudiado y la estación fluviométrica utilizada. (BCN, 2017).

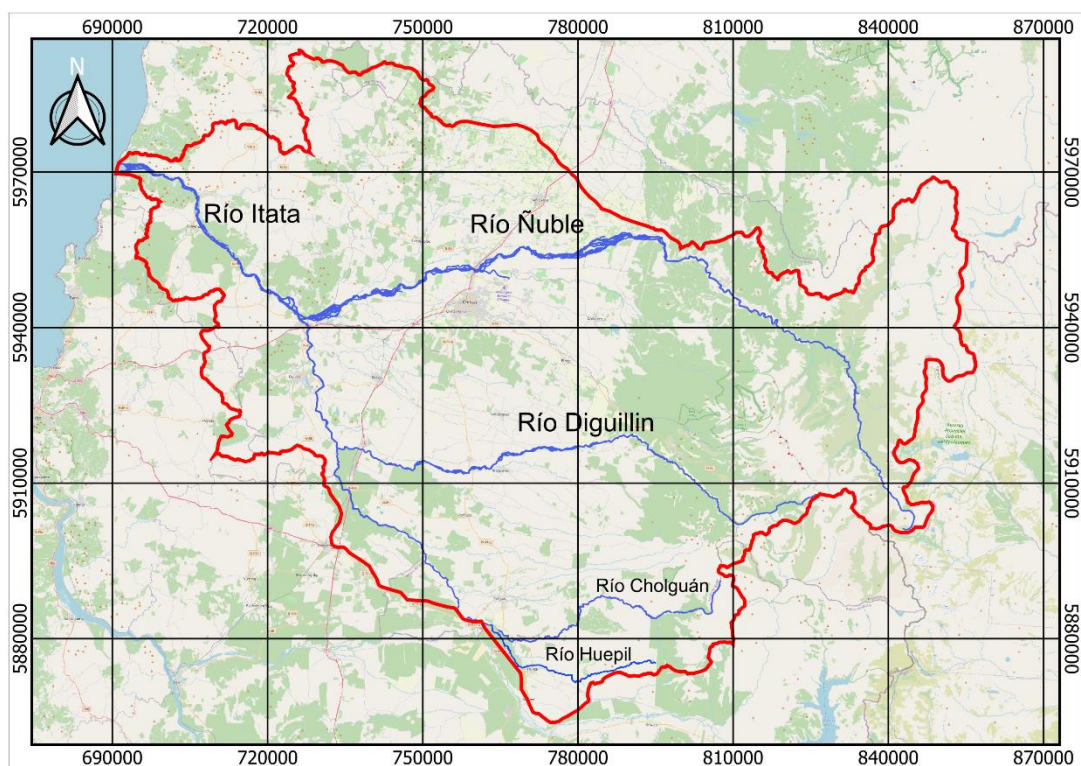


Figura 2. Área de estudio Cuenca del río Itata

La cuenca se encuentra principalmente en la región de Ñuble que a su vez se encuentra en el límite sur de la zona central de Chile. Referente a las condiciones climáticas, esta zona se define como el último tramo de la región mediterránea de estación seca prolongada del Chile Central, condiciones que hacen que sea una zona propicia para variaciones extremas según la estación del año. (BCN, 2017).

Este estudio se centra en el valle central de la región de Ñuble y cuenca del Itata, teniendo como referencia la estimación de flujo de aguas subterráneas

realizada por (DGA, 2011), que se ilustra en las líneas de nivel equipotencial en el área (Figura 3).

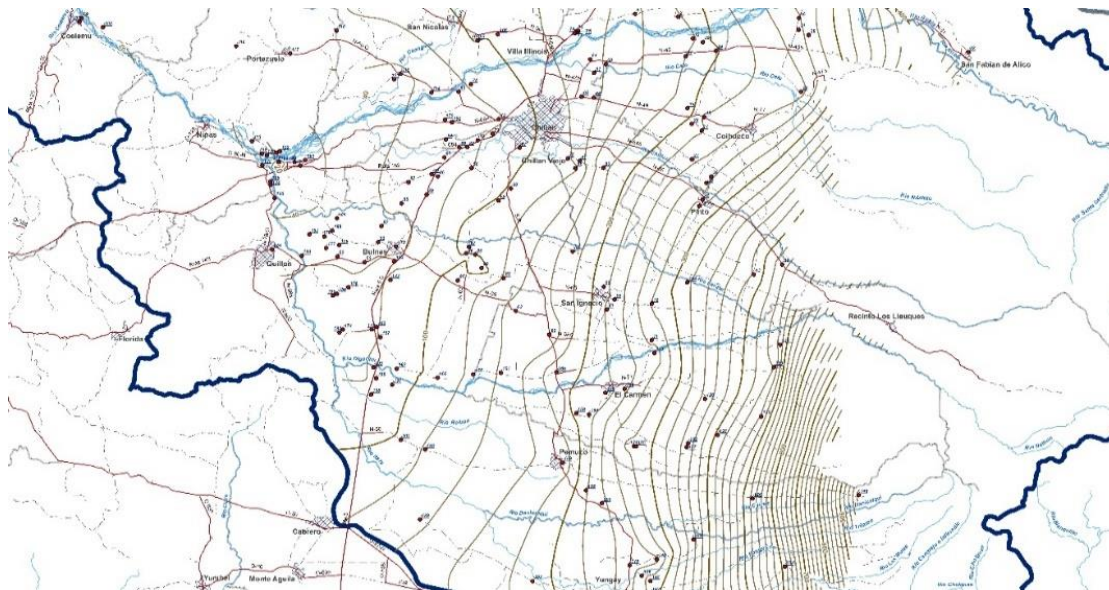


Figura 3. Líneas de nivel equipotencial de aguas subterráneas (DGA, MOP, 2011)

#### 4. METODOLOGÍA

Para la investigación se utilizó un diseño exploratorio cuantitativo donde se recolectó muestras en terreno que fueron analizadas en el detector electrónico RAD8 (Figura 4), fabricado por DURRIDGE Company. Este equipo en conjunto con su accesorio RAD H<sub>2</sub>O utilizan un sistema de desgasificación estándar pre-calibrado, proporcionando así una lectura directa de las concentraciones de <sup>222</sup>Rn en la propia muestra de agua. Las muestras pueden estar dentro del rango de 40 ml y 250 ml, con los frascos de vidrio que trae incorporado el accesorio. (DurrIDGE Company, 2023). Existe otro tipo de muestreo para muestras grandes de 2.5 litros en el que se utiliza un producto separado que no fue utilizado durante esta investigación.



Figura 4. Diagrama del detector de radón RAD8 (DurrIDGE Company, 2023).



Figura 5. Accesorio RAD H2O (DurrIDGE Company, 2023).

#### **4.1. Desarrollar un procedimiento de muestreo y análisis de $^{222}\text{Rn}$ usando RAD8**

Con respecto al primer objetivo específico, se desarrolló un procedimiento de muestreo y análisis para detectar las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  en las distintas muestras que se recolectaron en las distintas campañas, primero se identificó los componentes del equipo y se realizaron las configuraciones iniciales del equipo y manipulación del mismo, en las que incluye la fecha y hora, uso de las conexiones de tubos de vinilo, uso y manipulación de la unidad de secado (purga), almacenamiento de muestras dentro del equipo, instalación de software Capture 8 para la lectura de los archivos de muestra que entrega el RAD8 y finalmente uso, personalización y guardado de protocolos de análisis. Posteriormente, se operaron distintas pruebas con agua de llave del

laboratorio de recursos hídricos, que provenía de pozo y era constantemente renovado por lo que contenía radón. Luego se procedió a buscar un protocolo de muestreo adecuado para la investigación, probando los protocolos predefinidos que tiene el RAD8 y creando los protocolos propios teniendo en cuenta dos factores el tiempo de muestreo y la sensibilidad del resultado de la muestra, los protocolos probados se muestran en la Tabla 1.

Los protocolos preestablecidos y los creados tienen 8 campos de personalización, que se rigen principalmente por ciclos, que se refiere a un conjunto completo de mediciones realizadas por el equipo RAD8 durante un periodo definido. Los campos de personalización para los protocolos son:

- Tiempo de cada ciclo: es la duración de cada ciclo en la prueba, la multiplicación del tiempo de cada ciclo por la cantidad de cada ciclo determinara la duración del tiempo de muestreo
- Cantidad de ciclos: se refiere al número total de repeticiones de los periodos de medición que se realizaran durante un análisis. Cada periodo de medición está representado por un punto que entrega un resultado en un gráfico, esto le da la sensibilidad al gráfico.
- Modos de bombeo: existen 3 modos, el modo encendido: la bomba funciona continuamente cada vez que el RAD8 está realizando activamente una prueba de radón (es recomendable en pruebas que se necesita olfatear radón y torón); el modo apagado: la bomba RAD8 está apagada y el instrumento por ende no aspirará aire activamente

mientras se está realizando una prueba. Este modo se utiliza en protocolos de análisis de radón en agua; el modo estándar: cuando el equipo está configurado en este modo, la bomba se encenderá y apagará de acuerdo con un patrón determinado que permite un muestreo suficiente de aire mientras conserva la carga de la batería y reduce el desgaste de la bomba (se mantiene 2 minutos encendido y 3 minutos apagado).

- Duración de la purga previa a la prueba: Este parámetro permite limpiar el RAD8 de cualquier  $^{222}\text{Rn}$  residual y partículas en el aire que puedan quedar de una prueba anterior. Este tiempo también suma para la duración del tiempo de muestreo.
- Tiempo de demora antes del muestreo: es un modo de descanso que se puede incluir después de la purga previa a la prueba y antes de que comience a analizar y contar los ciclos programados, este modo no es necesario en pruebas de agua, por lo que no se ocupó.
- Modos de análisis:
  - modo de análisis rápido: se utiliza cuando se desea seguir cambios rápidos de concentración de radón, logrando una respuesta rápida a cambios de niveles de radón;
  - modo de análisis preciso: este modo se utiliza para lograr una mayor precisión estadística utilizando el espectrograma que genera el RAD8;

- modo de análisis automático: este modo cambia automáticamente del modo de análisis preciso después de tres horas de medición continua por lo que no es relevante en esta investigación; finalmente se encuentran los
- modos RAD H2O que se utilizan para medir las concentraciones de radón en tamaños específicos de muestra de agua de 40 mL y 250 mL, estos últimos 2 modos se seleccionan a parte de los 3 modos mencionados anteriormente.
- Torón: este campo permite activar o desactivar la opción de que el muestreo también analice torón en la muestra.

Tabla 1. Protocolos probados y detallados.

N° de muestra	Hora de muestra	Fecha	Tamaño de muestra (ml)	Tipo de análisis	Modo de bombeo	Purga previa (minutos)	demora previa (minutos)	ciclos
1	11:09	28-08-2024	250	Rápido	Apagado	10	0	4
2	12:01	28-08-2024	250	Preciso	Estándar	10	5	4
3	12:47	28-08-2024	40	Preciso	Estándar	10	5	4
4	12:41	29-08-2024	40	Preciso	Apagado	10	0	4
5	15:20	29-08-2024	40	Rápido	Apagado	10	0	4
6	16:11	29-08-2024	250	Rápido	Apagado	10	0	4
7	16:50	29-08-2024	250	Preciso	Apagado	10	0	4
8	12:05	09-09-2024	250	Preciso	Apagado	10	0	2
9	12:47	09-09-2024	250	preciso	Apagado	10	0	6
10	13:39	09-09-2024	40	Preciso	Apagado	10	0	6
11	14:29	09-09-2024	40	Preciso	Apagado	10	0	8
12	15:28	09-09-2024	250	Preciso	Apagado	10	0	8

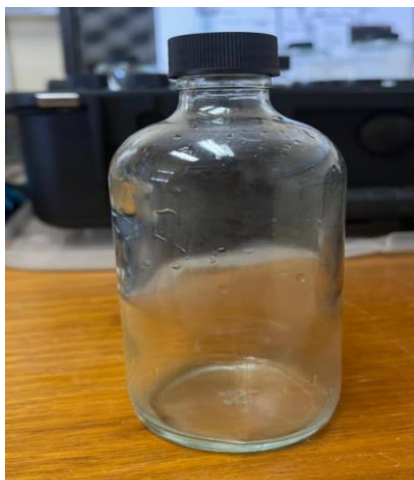


Figura 6. Frasco de 250 mL utilizado para analizar las muestras (accesorio del RAD H2O)

Luego de haber definido el protocolo de análisis se desarrolló un experimento para observar la degradación de  $^{222}\text{Rn}$  en el ambiente, teniendo en cuenta que la vida media de este gas es de 3,8 días, se realizaron gestiones con el personal de mantenimiento de la universidad para extraer agua de los estanques ubicados en la facultad de agronomía que tienen una profundidad

de 75 metros, el agua extraída se almacenó en 3 envases Coleman de 3 litros destapados y expuestos al ambiente.



Figura 7. Llave del pozo ubicada en la facultad de agronomía y envases Coleman con el agua recolectada

En total se recolectaron 20 muestras, entre 6 días desde un martes hasta el lunes de la semana siguiente, sin muestrear durante el fin de semana, y estas muestras fueron analizadas con el protocolo definido anteriormente.

#### **4.2. Diseñar un programa de monitoreo para estudiar la presencia de $^{222}\text{Rn}$ en distintos tipos de pozos, ríos y esteros**

Teniendo en cuenta el mapa de la Figura 8 donde puede observar en color verde las zonas de afloramiento de agua subterránea dentro del área de estudio, esta información resultó clave dentro de la investigación para tener base y justificación de los lugares muestreados. Finalmente se desarrolló un

programa de monitoreo para tomar muestras en lugares cercanos a estas zonas.

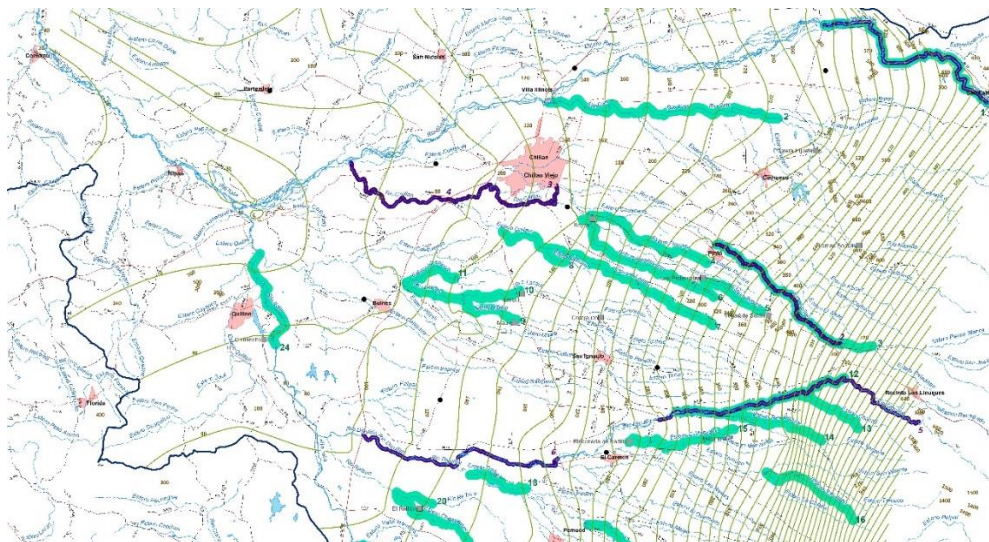


Figura 8. Zonas de afloramiento de aguas subterráneas (DGA, MOP, 2011)

Las zonas de monitoreo se definieron en base a la información hidrogeológica publicada por (DGA, MOP, 2011), donde se definió la dirección del escurrimiento de aguas subterráneas (Figura 3) y las zonas donde ocurren afloramientos (Figura 8).

Durante octubre y noviembre se desarrollaron 5 campañas de muestreo a distintos lugares de la cuenca del Ñuble (Tabla 2), además de campañas individuales a los pozos de la universidad (Campaña 0 en la Figura 9). Es importante mencionar que la Campaña 0 no se aprecia con claridad en la figura debido a que la tapa el punto que representa la muestra tomada en la vertiente Santa Elvira que esta cercana a la Universidad de Concepción. Además el

número al lado de cada muestra indica el orden con que se procedió a analizar en el equipo RAD8.

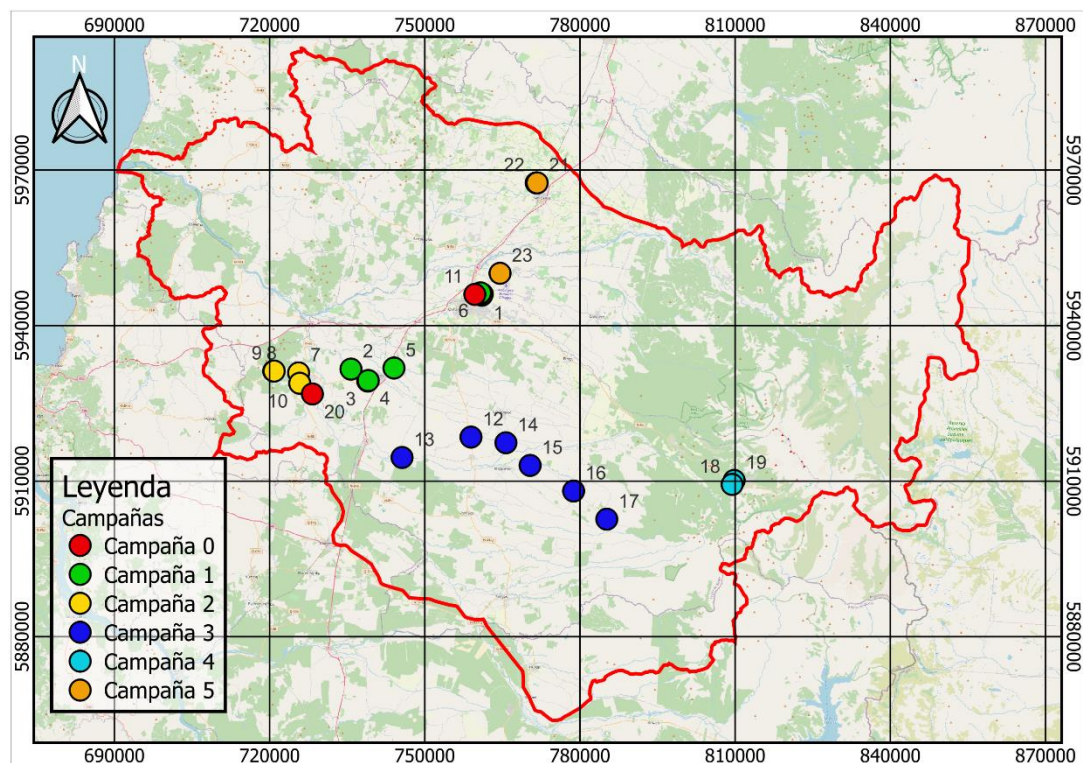


Figura 9. Campañas de muestreo

Tabla 2. Fechas de cada campaña realizada

Campañas	Fechas
Campaña 1	01-10-2024
Campaña 2	03-10-2024
Campaña 3	09-10-2024
Campaña 4	18-10-2024
Campaña 5	29-10-2024

El agua recolectada fue almacenada en envases de 1 L y 500 mL (Figura 10), con tapa hermética para evitar la volatilización al momento de transportar las muestras.

En los muestreos en terreno se recopilaron datos acerca de la profundidad de los pozos de las personas que accedieron a darnos un poco de agua en los envases de muestreo.



Figura 10. Envases de plástico utilizados para el transporte de las muestras

Para obtener los resultados de cada muestra, se registró el horario de toma de muestra y luego se utilizó la Ecuación [1] para corregir el valor promedio obtenido en el análisis del RAD8, y saber el valor probable que tenía la muestra al momento de tomarla, esto es fundamental ya que algunas muestras estuvieron más de 24 horas en espera antes de poder analizarlas en el equipo.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Protocolo de análisis

Luego de personalizar y analizar distintos protocolos, el protocolo seleccionado fue el de la muestra número 9 debido a que el resultado era el más conveniente en términos de tiempo (40 minutos por muestra) y sensibilidad (Figura 11).

En la Figura 11 se puede observar la ventana del programa Capture 8 donde se pueden extraer los resultados de las muestras que analiza el RAD8, ofreciendo las concentraciones (Bequerelios / Litros) por cada ciclo de análisis, un promedio de la muestra en general y la temperatura del aire en cada ciclo

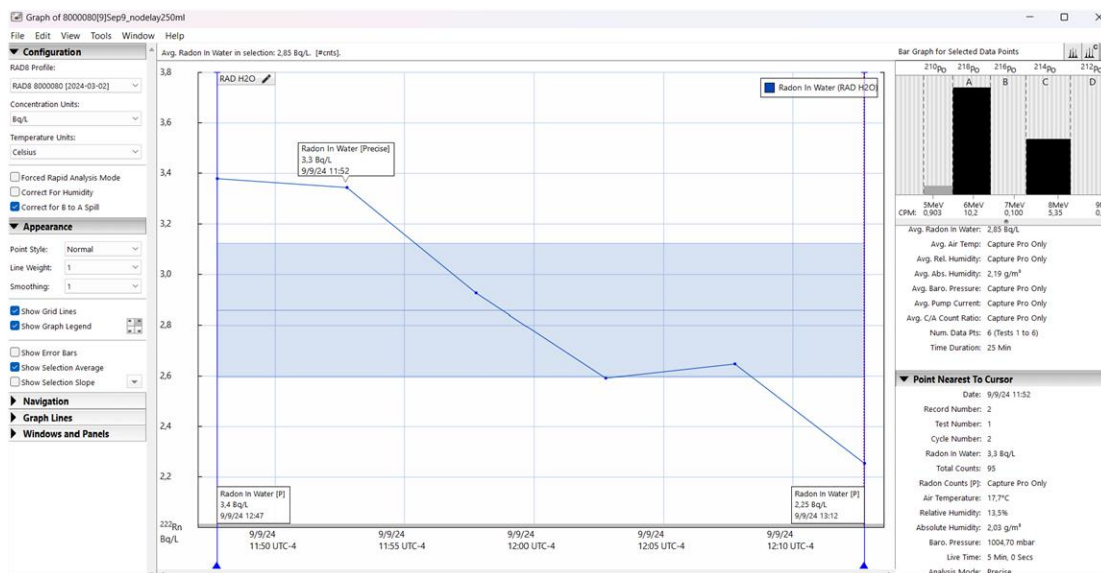


Figura 11. Gráfico del protocolo seleccionado

Para el experimento en el que se vio el decaimiento de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en el agua extraída desde el pozo de agronomía se obtuvo el gráfico de la Figura 12. Es importante mencionar que como la programación del protocolo seleccionado era de 6 ciclos cada muestra se puede ver una gran cantidad de puntos por muestra debido a que cada ciclo entrega un punto en el gráfico. (El detalle del experimento se puede revisar en el Anexo, Tabla A1)

La variación que existe entre cada muestra puede deberse a factores como la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en distintos lugares del frasco de 250 mL, otro factor que podría afectar la muestra es la inevitable oxigenación que existe al momento de trasvasiar la muestra desde el envase Coleman al frasco para análisis.

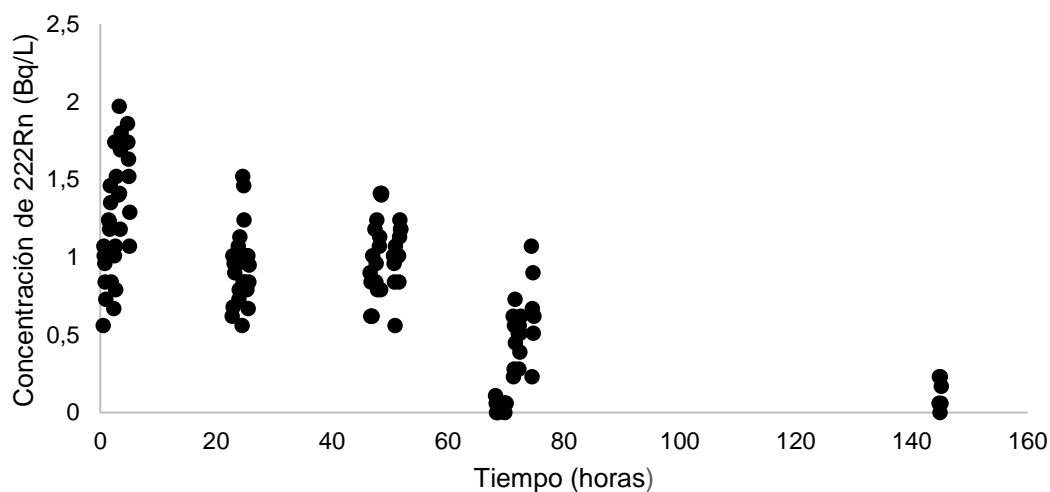


Figura 12. Resultados del experimento de concentración de radón vs tiempo.

Luego de obtener los resultados se procedió a obtener los límites superior e inferior de la función de decaimiento (Figura 13), teniendo en cuenta que el primer día el valor más alto de concentración que se detectó fue de 2 Bq/L y el valor mínimo de 0,5 Bq/L, dando como resultado que los datos muestreados si se ajustan a la curva de decaimiento. La ecuación utilizada para obtener los límites fue una adaptación de la ecuación que se utiliza para obtener un factor de corrección de decaimiento radiactivo de  $^{222}\text{Rn}$  obtenida desde (Sánchez-Murillo et al, 2016) y complementado con el manual del usuario del RAD8 (Durrige Company, 2023)

$${}^{222}_0\text{Rn} = {}^{222}_t\text{Rn} * e^{\left(\frac{t}{132,4}\right)} \quad [1]$$

Donde:

${}^{222}_0\text{Rn}$  : Concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en la muestra al tiempo 0

${}^{222}_t\text{Rn}$  : Concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en la muestra al tiempo t (es decir, al tiempo en el que se analizó la muestra)

132,4 : Constante de decaimiento radiactivo (horas)

t : Tiempo transcurrido entre la hora de análisis de la muestra y la toma de la muestra (horas)

Mientras que la adaptación que se utilizó para comprobar que los datos muestreados se ajustaron a la curva de decaimiento es la siguiente:

$${}^{222}_{0}\text{Rn} = {}^{222}_{t}\text{Rn} * e^{\left(\frac{-t}{132,4}\right)} \quad [2]$$

Donde:

${}^{222}_{0}\text{Rn}$  : Concentración de  ${}^{222}\text{Rn}$  en la muestra al tiempo 0

${}^{222}_{t}\text{Rn}$  : Concentración de  ${}^{222}\text{Rn}$  en la muestra al tiempo t (es decir, al tiempo en el que se analizó la muestra)

132,4 : Constante de decaimiento radiactivo (horas)

t : Tiempo transcurrido entre la hora de análisis de la muestra y la toma de la muestra (horas)

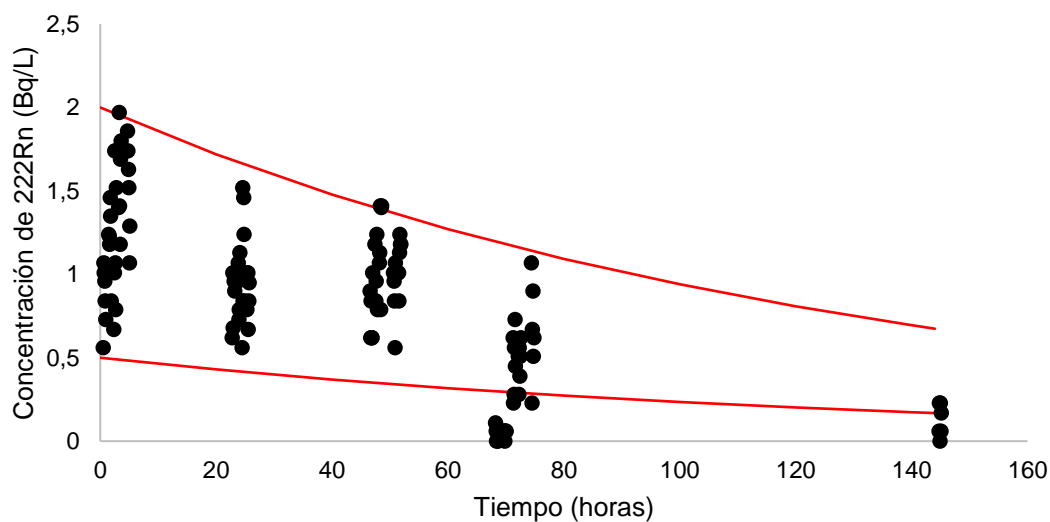


Figura 13. Resultados del experimento con límites de decaimiento de radón

En la Figura 14, se presentan las profundidades de los pozos muestreados, considerando como profundidad 0 cuando se muestreó agua desde vertientes y ríos.

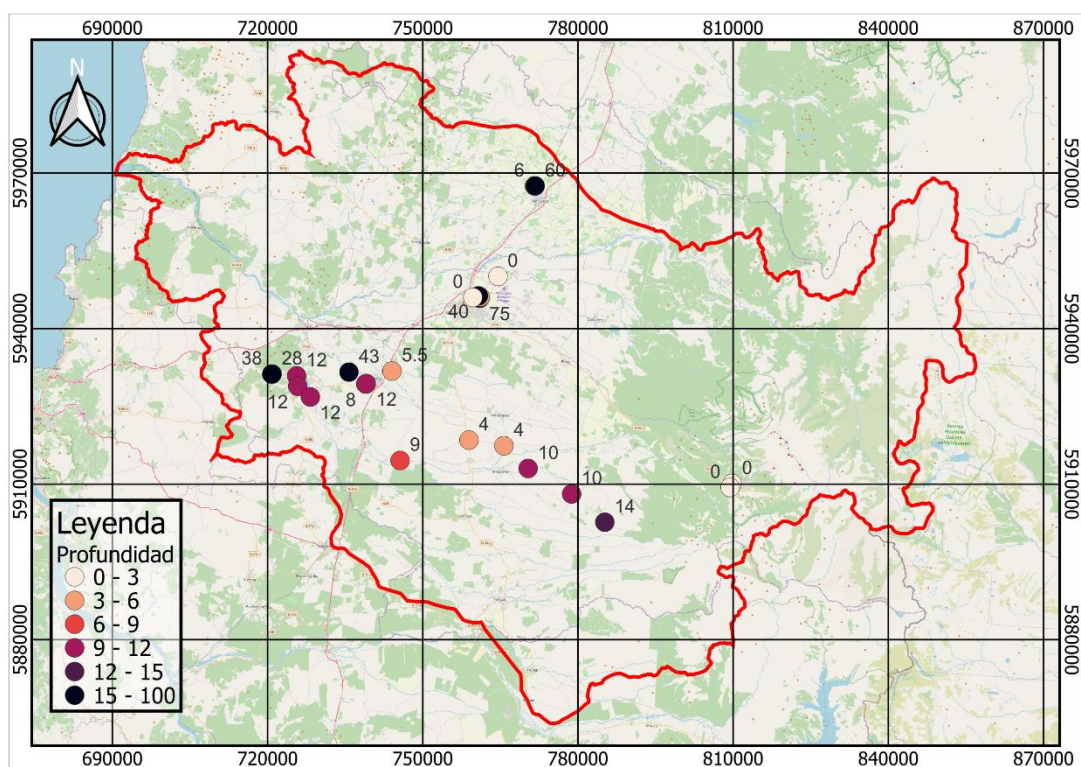


Figura 14. Profundidad de los pozos muestreados

Finalmente, en la Figura 15 se presenta un rango de concentraciones (Bq/L) de los pozos muestreados, donde en general predominan los pozos con concentraciones menores a 3,75 Bq/L.

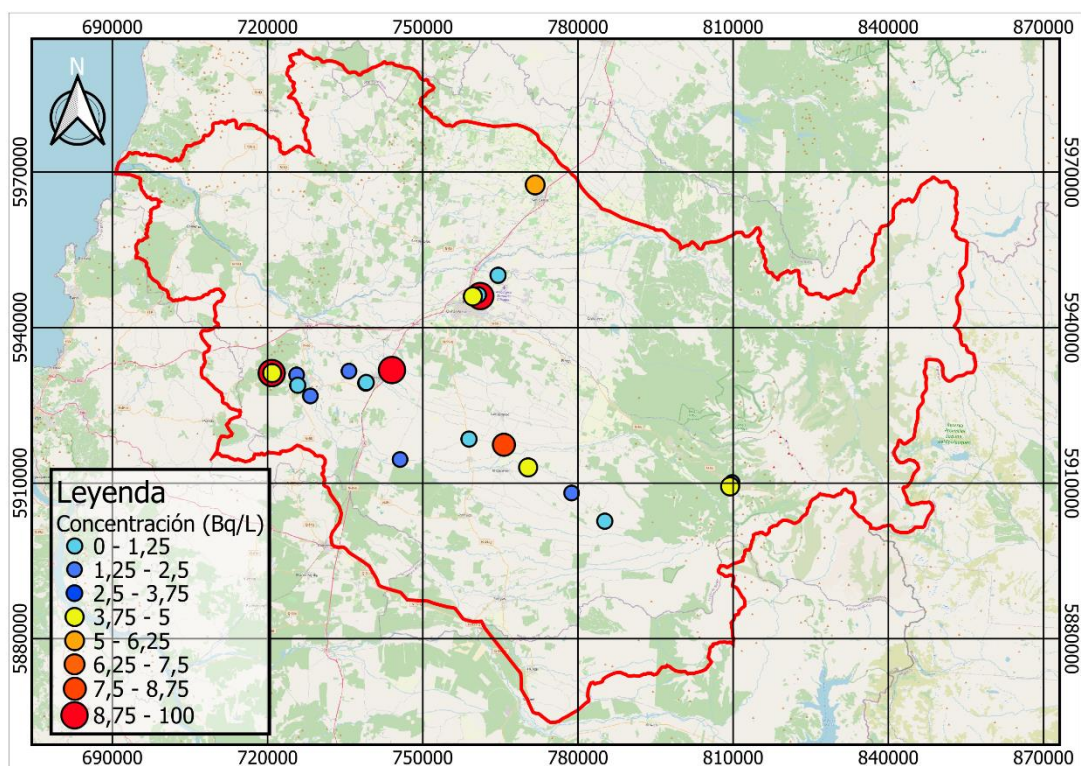


Figura 15. Distribución de concentraciones de radón en los pozos muestreados

Las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  encontradas no fueron altas (detalle en la Tabla A2), lo que puede deberse principalmente a las características geológicas del área de estudio o cercanas a los pozos muestreados (Figura 16). La roca que emite más  $^{222}\text{Rn}$  es el granito, pero este tipo de roca no es muy común en la conformación del suelo en las zonas muestreadas. En general el tipo de secuencias sedimentarias más comunes en el valle central de la cuenca son los depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa, grava, arenas y limos y depósitos piroclásticos; más hacia la cordillera de los andes se encuentra granodioritas, dioritas, tonalitas, monzogranitos, etc. (SERNAGEOMIN, 2003)

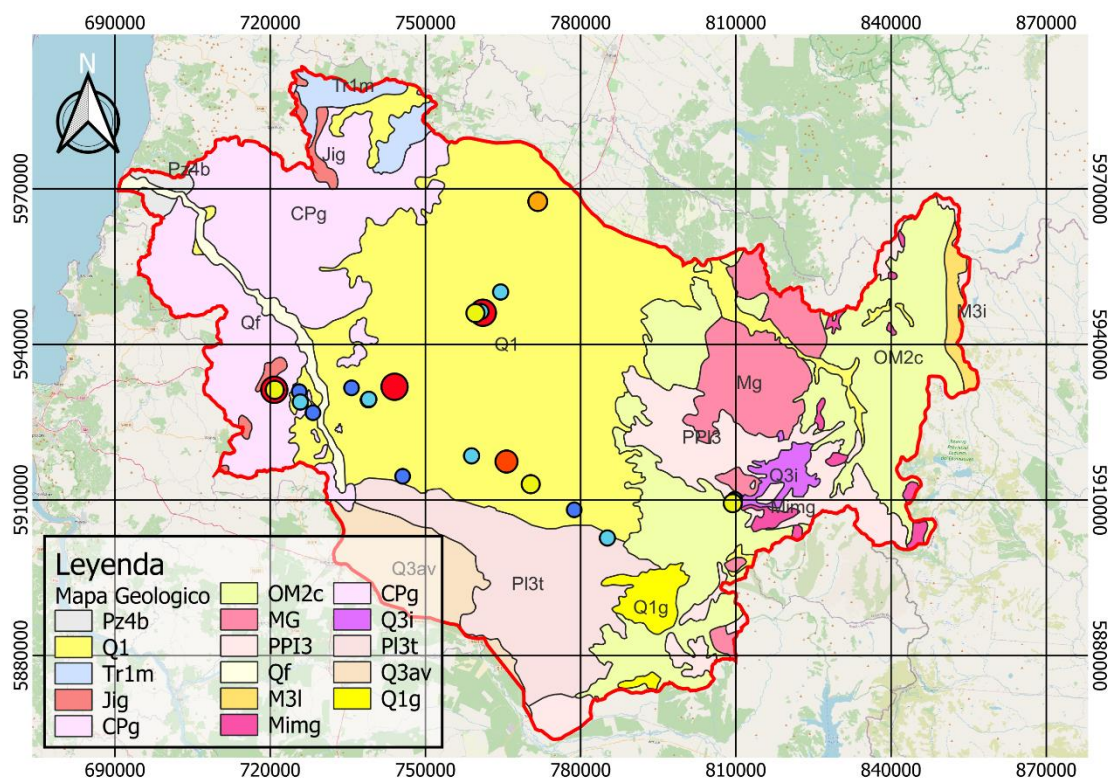


Figura 16. Mapa geológico de la cuenca del río Itata

El detalle de la leyenda de la Figura 16, está en la Figura A1 del Anexo.

Si se comparan los resultados con los que se obtuvieron en la investigación realizada por (Branco et al, 2021), esta fue realizada en una isla con entorno volcánico activo en Portugal, por lo que se observa que las cantidades de radón son más altas (Por ejemplo, una concentración media de 94,11 Bq/L cercana al volcán Fogo), lo que relaciona directamente en la composición geológica de la zona de estudio, pues se ha detectado Uranio en la Cordillera de la Costa y no en la zona de estudio (Portal Minero, 2013), lo que afecta a la cantidad de  $^{222}\text{Rn}$ . Otro factor para considerar importante es la precipitación sobre la cuenca pues el agua de lluvia no tiene nada de contenido de  $^{222}\text{Rn}$  y

si esta agua recargó los acuíferos de donde se extrajo las muestras es muy probable que afecte el resultado final de cada análisis, haciendo que la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  sea menor en cada muestra. Finalmente, al utilizar la metodología de muestreo fue necesario el trasvasije desde el pozo o vertiente al envase para muestreo de agua y de este hacia el frasco de vidrio de 250 mL que se acopla al RAD8, lo que produjo inevitablemente el contacto de la muestra con el aire, lo que pudo afectar que parte del  $^{222}\text{Rn}$  se volatilizará.

## 6. CONCLUSIONES

Para el objetivo específico 1, el procedimiento de muestreo y análisis que se desarrolló para esta investigación utilizando el equipo RAD8, demostró de buena manera ser un protocolo que reunió las características que se buscaron (sensibilidad de análisis y optimización del tiempo). Con ello, también se logró comprobar el decrecimiento del  $^{222}\text{Rn}$  durante 6 días.

En conjunto con él con objetivo específico 1, acerca de cómo hacer una correcta toma de muestras, el objetivo específico 2 se desarrolló en gran parte durante el mes de octubre y tuvo buenos resultados logrando obtener 24 muestras de distintos lugares de la cuenca del río Itata, obteniendo además información relevante para la investigación como lo es la profundidad del lugar de muestra o testimonios de los propietarios de los pozos a los que se pudo acceder a tomar muestras.

Finalmente, respecto al objetivo específico 3, la cuenca del río Itata, es una zona que posee grandes reservas de agua subterránea, lo que permite la existencia de distintos cuerpos de agua como por ejemplo las lagunas Santa Elena y Avendaño. Según los testimonios de los propietarios que facilitaron sus pozos para esta investigación, afirmaron que sus pozos nunca se secaban; incluso en verano mantenían una buena cantidad de agua disponible. Esto sugiere que el agua subterránea de la cuenca tiene una recarga alta, posiblemente debido a características hidrogeológicas favorables, como

acuíferos con buena permeabilidad, precipitación abundante e interacción con aguas superficiales. Lo anterior, reduce, por dilución los niveles de cualquier elemento disuelto en el agua, como lo sería el  $^{222}\text{Rn}$  en el área de estudio. Estas condiciones hidrológicas y geológicas coinciden y tienen sentido al encontrar poca cantidad de  $^{222}\text{Rn}$  en las muestras.

Es importante mencionar que, la profundidad de los pozos no indica necesariamente la presencia de mayores niveles de  $^{222}\text{Rn}$  en el agua, ya que ejemplos como la vertiente Santa Elvira (0 metros de profundidad) ubicada en Chillán o el pozo ubicado en Larqui poniente (5,5 metros de profundidad), cerca de Bulnes, arrojaron datos con más concentración de  $^{222}\text{Rn}$  que por ejemplo el pozo ubicado un campo cercano a San Carlos (60 metros de profundidad).

Como recomendación para futuras investigaciones, es importante realizar muestreos con una metodología que evite el contacto de la muestra con el aire para evitar la volatilización del  $^{222}\text{Rn}$ . También asegurarse de que los pozos muestreados estén en operación regular, es decir, con uso continuo o reciente, para así garantizar que el agua extraída refleje las condiciones reales del acuífero y no agua estancada que pueda alterar la concentración de radón.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- ATSDR. (6 de Mayo de 2016). *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades*. Obtenido de [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs145.html#:~:text=El%20rad%C3%B3n%20no%20tiene%20usos,de%20hogares%20y%20otros%20edificios.](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs145.html#:~:text=El%20rad%C3%B3n%20no%20tiene%20usos,de%20hogares%20y%20otros%20edificios.)
- Biblioteca del Congreso Nacional. (2017). *Hidrografía Región de Ñuble*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region16/hidrografia.htm#:~:text=Con%20una%20cuenca%20de%201.386,al%20regad%C3%ADo%20a%20la%20zona.>
- Biblioteca del Congreso Nacional. (2017). *Región de Ñuble*. Obtenido de Chile Nuestro País: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region16>
- Branco, R., Virgílio Cruz, J., Silva, C., Coutinho, R., Andrade, C., & Zanon, V. (2021). *Presencia de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en cuerpos de agua subterránea en la isla de São Miguel (Archipiélago de las Azores, Portugal)*. *Ciencias Ambientales de la Tierra*.
- DGA, MOP. (Diciembre de 2011). *Estudio Hidrogeológico Cuencas Bío Bío e Itata*. Obtenido de <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/server/api/core/bitstreams/9bb63730-2817-4098-b766-672952e20c68/content>
- Durridge Company. (2023). *RAD8 (Radon + Thoron Monitor) Manual de Usuario*. Documento, Durridge Company, Parque Tecnológico, Billerica.
- Muñoz Hernández, F. I. (2017). *Uso de  $^{222}\text{Rn}$  como trazador ambiental para determinar la existencia de aportes de agua subterránea en la laguna Santa Elena*. Tesis , Universidad de Concepción, Recursos Hídricos, Chillán. Recuperado el 15 de 06 de 2024
- Organizacion Mundial de la Salud. (2 de Febrero de 2021). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de WHO: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>

- Portal Minero, .. (23 de Julio de 2013). *Portal Minero*. Obtenido de Portal Minero:  
<https://www.portalminero.com/pages/viewpage.action?pagelId=78713765>
- Sánchez-Murillo, Delgado, M., Espinach, D., Lobo, M., Madrigal, F., Moreira, A., . . . Alvarado, G. (2016). *Variación espacial de la composición de  $^{222}\text{Rn}$  en los acuíferos Barva y Colima Superior*. Costa Rica: América Central 55: 147-165. .
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2003). *MAPA GEOLOGICO DE CHILE: VERSION DIGITAL*. Gobierno de Chile, Subdirección Nacional de Geología , Santiago. Obtenido de  
<https://www.ipgp.fr/~dechabal/Geol-millon.pdf>
- SpaDreams. (2020). *SpaDreams*. Obtenido de  
<https://www.spadreams.es/tratamientos/radonterapia/>

## 8. ANEXOS Y APÉNDICES

Tabla A1. Resultados experimento degradación de  $^{222}\text{Rn}$

Muestra	Minutos	Contenido de Radón	Muestra	Minutos	Contenido de Radón	Muestra	Minutos	Contenido de Radón	Muestra	Minutos	Contenido de Radón
1	0	0,56	7	1388	1,01	13	3005	1,01	19	4433	1,07
(13)	5	1,07	(19)	1393	0,96	(25)	3010	0,96	(31)	4438	0,23
	10	1,01		1398	1,07		3015	0,84		4443	0,67
	15	0,96		1403	0,73		3020	0,56		4448	0,9
	20	0,84		1408	0,79		3025	1,07		4453	0,51
	25	0,73		1413	1,13		3030	1,01		4458	0,62
2	57	1,24	8	1438	0,56	14	3056	1,01	20	8652	0,06
(14)	62	1,23	(20)	1443	1,52	(26)	3061	0,84	(32)	8657	0,23
	67	1,18		1448	0,84		3066	1,13		8662	0
	72	1,46		1453	1,46		3071	1,24		8667	0,23
	77	1,35		1458	1,24		3076	1,18		8672	0,06
	82	0,84		1463	0,84		3081	1,18		8677	0,17
3	109	0,67	9	1486	0,79	15	4062	0,11			
(15)	114	1,01	(21)	1491	1,01	(27)	4067	0,06			
	119	1,74		1496	1,01		4072	0			
	124	1,07		1501	0,67		4077	0,06			
	129	0,79		1506	0,84		4082	0,06			
	134	1,52		1511	0,95		4087	0			
4	160	1,4	10	2763	0,9	16	4147	0,06			
(16)	165	1,97	(22)	2768	0,62	(28)	4152	0,06			
	170	1,41		2773	0,84		4157	0			
	175	1,18		2778	0,62		4162	0,06			
	180	1,69		2783	0,62		4167	0,06			
	185	1,8		2788	1,01		4172	0,06			
5	250	1,86	11	2812	1,18	17	4242	0,62			
(17)	255	1,74	(23)	2817	0,84	(29)	4247	0,23			
	260	1,63		2822	0,84		4252	0,28			
	265	1,52		2827	0,96		4257	0,56			
	270	1,07		2832	1,24		4262	0,73			
	275	1,29		2837	0,79		4267	0,45			
6	1335	0,62	12	2857	1,07	18	4297	0,51			
(18)	1340	1,01	(24)	2862	1,13	(30)	4302	0,28			
	1345	0,68		2867	1,41		4307	0,56			
	1350	1,01		2872	0,79		4312	0,39			
	1355	0,96		2877	1,4		4317	0,51			
	1360	0,9		2882	1,41		4322	0,62			

En la Tabla A1 se observan en detalle los resultados de la Figura 12, el numero sin paréntesis representa la numeración desde la primera hasta la última muestra perteneciente al experimento, mientras que el numero entre paréntesis es la numeración que le da el equipo RAD8 a cada muestra luego de su análisis, y sirve para llevar un orden correcto de cada archivo de muestra al momento de llevarlo a un pendrive.

Tabla A2. Promedio de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  para cada muestra tomada en terreno

N° de Muestra	Promedio de contenido de $^{222}\text{Rn}$	N° de Muestra	Promedio de contenido de $^{222}\text{Rn}$	N° de Muestra	Promedio de contenido de Radón
1	1,04	9	10,69	17	0,68
2	1,66	10	0,45	18	4,42
3	0,31	11	4,51	19	1,60
4	0,94	12	0,41	20	1,93
5	8,96	13	1,37	21	5,89
6	1,01	14	8,66	22	1,81
7	1,76	15	4,75	23	0,13
8	4,73	16	1,35	24	18,05

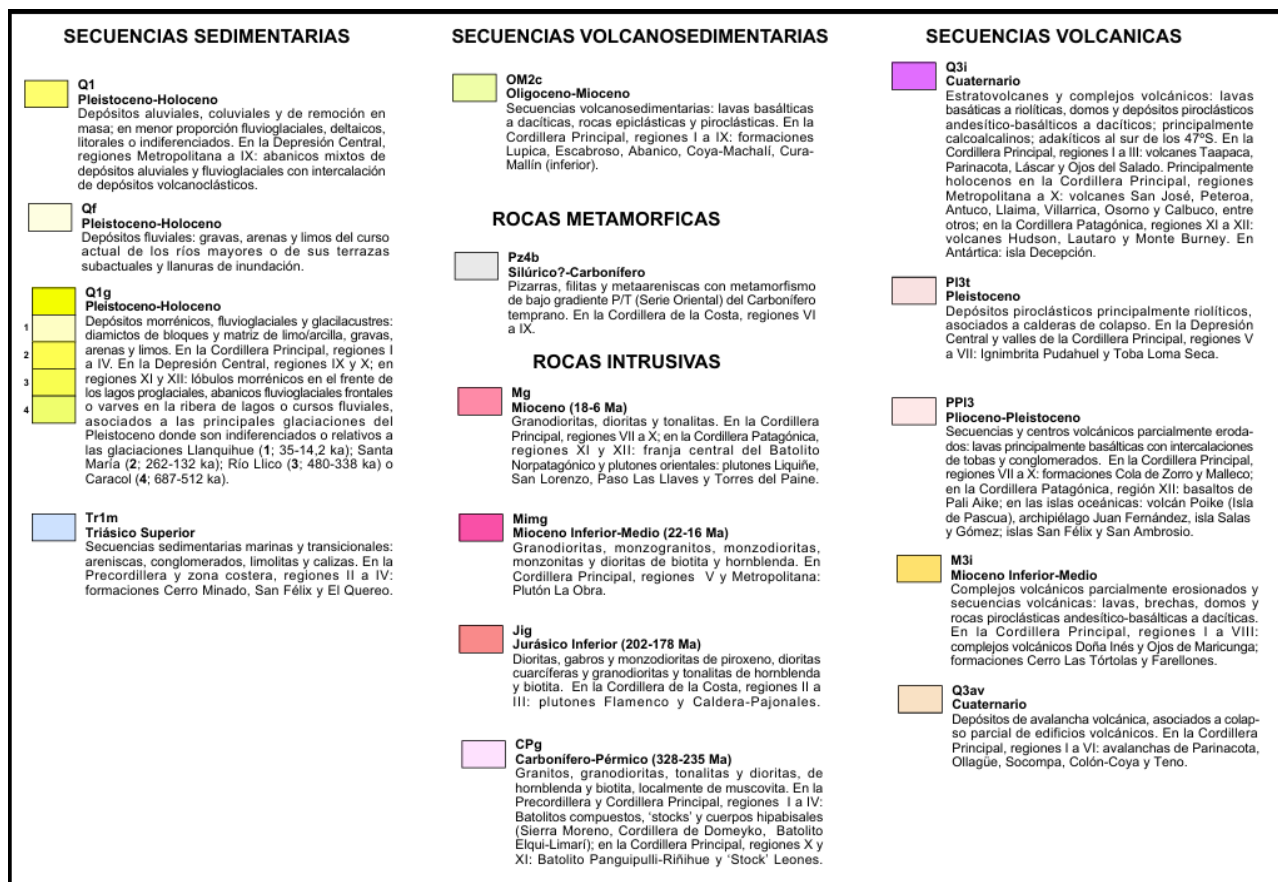


Figura A1. Leyenda detallada del mapa geológico de la Figura 16.

(SERNAGEOMIN, 2003)