



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

“IDENTIFICACIÓN DE POSIBLES ZONAS DE DESCARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA,  
MEDIANTE EL USO DE TRAZADORES NATURALES (RADÓN, TEMPERATURA Y  
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA) EN LA LAGUNA GUABIZHUN PROVINCIA DEL  
CAÑAR, ECUADOR”

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero Ambiental

AUTOR: WILIAN ANDRÉS GUZHÑAY MEJÍA  
TUTOR: FIS. TONY JESÚS VILORIA ÁVILA, Ph.D.

Cuenca - Ecuador

2023

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Wilian Andrés Guzhñay Mejía con documento de identificación N° 0106457252, manifesté que:

Soy el autor y el responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 20 de septiembre del 2023

Atentamente,



---

Wilian Andrés Guzhñay Mejía

0106457252

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Wilian Andrés Guzhñay Mejía con documento de identificación N° 0106457252, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Trabajo experimental: “Identificación de posibles zonas de descarga de agua subterránea, mediante el uso de trazadores naturales (radón, temperatura y conductividad eléctrica) en la laguna Guabizhun provincia del Cañar, Ecuador”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Ambiental, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 20 de septiembre del 2023

Atentamente,



---

Wilian Andrés Guzhñay Mejía

0106457252

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Tony Jesús Viloría Ávila con documento de identificación N° 0151688264, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “IDENTIFICACIÓN DE POSIBLES ZONAS DE DESCARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA, MEDIANTE EL USO DE TRAZADORES NATURALES (RADÓN, TEMPERATURA Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA) EN LA LAGUNA GUABIZHUN PROVINCIA DEL CAÑAR, ECUADOR”, realizado por Wilian Andrés Guzhñay Mejía con documento de identificación N° 0106457252, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Trabajo experimental que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 20 de septiembre del 2023

Atentamente,



---

Fis. Tony Jesús Viloría Ávila, Ph.D.

0151688264

## **Agradecimiento**

Primeramente, quiero agradecer a Dios y a la Virgen por haberme forjado en el camino del bien en mi transcurso de vida universitaria quienes están conmigo a diario en la toma de mis decisiones.

Quiero agradecer a mis padres Luis Ángel Guzhñay y María Matilde Mejía por darme a diario el apoyo incondicional y creer en mí siempre, enseñándome a valorar todo lo que tengo y el sacrificio que tiene cada cosa.

A mis hermanos Josselin, Vilma, Erika y Jenifer quienes han estado siempre conmigo llenando mi vida felicidad y brindándome su apoyo.

A mi asesor de tesis Dr. Tony Vilorio por orientarme en la elaboración del tema de titulación.

## **Dedicatoria**

Este trabajo de titulación se lo dedico a mis padres Luis Guzhñay y María Matilde Mejía quienes con su paciencia, amor y esfuerzo lucharon por darme una excelente educación y así convertirme en un profesional, gracias por la paciencia y por inculcar en mí el ejemplo de valentía y sacrificio, y, a no dejarme vencer fácilmente.

A mis hermanos Jenifer, Vilma, Erika y Josselin por su cariño y apoyo incondicional, y de manera especial a Rosa Tenesaca quien fue mi compañera de lucha y sacrificios en todo el transcurso mi vida universitaria demostrándome que todo se puede lograr con esfuerzo y ganas.

Finalmente, a mis abuelitos Santiago Mejía y Mercedes Quilli, por apoyarme siempre dándome palabras de aliento e inculcándome buenos valores de respeto y firmeza en las decisiones que tome y además de manera especial a mi abuelita Cruz Morocho, quien fue una de las primeras personas que puso la fe en mí y me apoyo en mis primeras caídas proporcionándome palabras de aliento para no abandonar mi sueño de ser profesional, le agradezco a la vida por ser mi ejemplo para seguir.

## Resumen

En la presente investigación se determinó la identificación de posibles zonas de descarga de agua subterránea, mediante el uso de trazadores naturales (radón, temperatura y conductividad eléctrica) en la laguna Guabizhun provincia del Cañar, Ecuador. La identificación directa de posibles descargas o intercambio de flujo entre el agua superficial y el agua subterránea llegan a ser complejas y en muchos de los casos requiere un equipamiento especial, llegando a ser restringida en ciertos campos de estudio por la falta de estos. Existen diferentes métodos para el análisis de la identificación de descargas o intercambio de flujo de agua. Entre los que resaltan los métodos de los trazadores ambientes. Estos utilizan los diferentes parámetros presentes en el medio para el análisis del flujo de agua, tales como la temperatura, las especies iónicas disueltas, isótopos estables y/o radiactivos, como el  $^{222}\text{Rn}$ . El objetivo de este proyecto de investigación es presentar un análisis cuantitativo de las variaciones de la temperatura y conductividad de las columnas de agua, las concentraciones de huellas nucleares en los Detectores Sólidos de Trazas Nucleares (DSTN) y de la temperatura en los sedimentos, en 5 puntos de muestreo de la laguna de Guabizhun, y correlacionar los mismos con posibles descargas o intercambio de flujo entre el agua superficial y el agua subterránea.

**Palabras clave:** trazadores naturales, flujo de agua, conductividad eléctrica, temperatura, radón, agua subterránea, descarga de agua.

## Abstract

In the present investigation, the identification of possible areas of groundwater discharge was determined, through the use of natural tracers (radon, temperature, and electrical conductivity) in the Guabizhun lagoon, Cañar province, Ecuador. The direct identification of possible discharges or flow exchange between surface water and groundwater becomes complex and, in many cases, requires special equipment, becoming restricted in certain fields of study due to their lack. There are different methods for the analysis of the identification of discharges or exchange of water flow. Among which stand out the methods of ambient tracers. These use the different parameters present in the medium for the analysis of the water flow, such as temperature, dissolved ionic species, stable and/or radioactive isotopes, such as  $^{222}\text{Rn}$ . The objective of this research project is to present a quantitative analysis of the variations of the temperature and conductivity of the water columns, the concentrations of nuclear traces in the Solid-State Nuclear Tracks Detectors (SSNTD) and of the temperature in the sediments, in 5 sampling points of the Guabizhun lagoon, and correlate them with possible discharges or flow exchange between surface water and groundwater.

**Key words:** natural tracers, water flow, electrical conductivity, temperature, radon, groundwater, water discharge.

## Índice General

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación.....	II
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana .....	III
Certificado de dirección del trabajo de titulación.....	IV
Agradecimiento.....	V
Dedicatoria.....	VI
Resumen.....	VII
Abstract.....	VIII
<b>Capítulo I: Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Formulación del problema.....	5
1.3.1 Problema general .....	5
1.3.2 Problemas específicos.....	5
1.4 Hipótesis .....	5
1.5 Objetivos.....	6
1.5.1 Objetivo general.....	6
1.5.2 Objetivos específicos .....	6
1.6 Justificación .....	6
1.7 Delimitación.....	9
1.7.1 Delimitación Espacial .....	9
1.7.2 Delimitación temporal .....	10
<b>Capítulo 2: Marco teórico .....</b>	<b>12</b>
2.1 Agua Subterránea.....	12
2.2 Movimiento del agua subterránea.....	13
2.3 Composición del agua subterránea .....	15
2.4 Análisis de las zonas de recarga y descarga del agua .....	15
2.5 Interacción de agua subterránea y superficial.....	17

2.6 Agua subterránea fuente de nutrientes .....	18
2.7 Identificación de descargas de flujos de agua superficial y agua subterránea.....	19
2.8 Radón .....	20
2.8.1 Comportamiento del radón en el agua subterránea.....	20
2.9 Radón como trazador .....	21
2.10 Temperatura .....	22
2.10.1 Comportamiento de la Temperatura en el agua subterránea.....	22
2.11 Temperatura como trazador .....	22
2.12 Conductividad eléctrica .....	23
2.12.1 Contribuyentes iónicos principales y secundarios .....	24
2.13 Conductividad eléctrica como trazador .....	24
<b>Capítulo 3: Materiales y métodos.....</b>	<b>26</b>
3.1 Ubicación del área de estudio .....	26
3.2 Caracterización de la laguna de Guabizhun.....	27
3.3 Muestreo .....	27
3.3.1 Ubicación de los puntos de muestreo.....	28
3.4 Materiales.....	29
3.5 Metodología .....	31
3.5.1 Montaje de la infraestructura .....	32
3.5.2 Sensores de conductividad eléctrica y sensores de temperatura .....	35
3.5.3 Estructura del módulo para la protección del sistema eléctrico.....	37
3.5.4 Diseño de flotadores para los MORADs .....	38
3.5.5 Diseño de la sonda rígida de temperatura. ....	40
3.5.6 Muestreo de temperatura y conductividad eléctrica. ....	42
3.5.7 Análisis de datos de la temperatura y conductividad eléctrica .....	48
3.5.8 Método para la extracción de Rn-222 de la laguna.....	50
3.5.9 Técnica de análisis para la medición de radón.....	54
3.6 Análisis de los datos obtenido por los sensores de temperatura y CE .....	56
<b>Capítulo 4: Resultados y Discusión .....</b>	<b>59</b>
4.1 Registro de datos de los valores de temperatura y conductividad eléctrica.....	59
4.1.1 Temperatura y conductividad eléctrica en la columna de Agua de la laguna.....	59

4.1.2 Temperatura en la profundidad del lecho de la laguna .....	60
4.2 Analisis de temperatura y conductividad eléctrica en la columna de agua y la profundidad del lecho.....	61
4.3 Numero de huellas nucleares en los detectores solidos de trazas nucleares (DSTN), LR-115 .....	86
4.4 Discusión.....	87
<b>Conclusiones .....</b>	<b>89</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>91</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>92</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>100</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Posición geográfica de la Laguna de Guabizhun.....	9
<b>Tabla 2</b> Niveles máximos, mínimos y promedios de radón (expresado en Bq·m-3) en diferentes ambientes superficiales y subsuperficiales. ....	21
<b>Tabla 3</b> Materiales utilizados en el proceso de investigación.....	29
<b>Tabla 4</b> Color para identificar los datos recolectados del sensor de temperatura y conductividad eléctrica.....	60
<b>Tabla 5</b> Color para identificar los datos recolectados del sensor de temperatura en el lecho.....	61
<b>Tabla 6</b> Número de huellas nucleares .....	86
<b>Tabla 7</b> Valores máximos y mínimos de los puntos de que presentan anomalías. ....	87

## Índice de Ilustraciones

<b>Ilustración 1</b> Diseño de los MORADs en CivilCAD de 3D.....	38
<b>Ilustración 2</b> Incrustación de la sonda rígida de temperatura en el lecho de la laguna. ....	42
<b>Ilustración 3</b> Diseño del SRACR en la laguna. ....	52
<b>Ilustración 4</b> Técnica para el análisis de las concentraciones de radón presentes en el agua. ...	55

## Índice de gráficos

<b>Figura 1</b> Identificación de los puntos de muestreo. ....	10
<b>Figura 2</b> Representación esquemática de los tipos de roca según su relación entre textura y porosidad.....	14
<b>Figura 3</b> Los lagos pueden recibir entrada de agua subterránea (A), perder agua como filtración al agua subterránea (B), o ambos (C).....	18
<b>Figura 4</b> Ubicación de la laguna de Guabizhun. ....	26
<b>Figura 5</b> Puntos de muestreo de la laguna de Guabizhun. ....	28
<b>Figura 6</b> Modulo para el análisis de temperatura y conductividad eléctrica. ....	32
<b>Figura 7</b> Estructura del sistema de Arduino.....	33
<b>Figura 8</b> Placa para la instalación de los sensores de conductividad eléctrica y temperatura en el sistema de Arduino. ....	34
<b>Figura 9</b> Alimentación fotovoltaica de la batería que permite trabajar al Arduino continuamente. ....	35
<b>Figura 10</b> Sensores de temperatura y conductividad eléctrica.....	36
<b>Figura 11</b> Cable reforzado para la distribución de los sensores a diferentes profundidades de la laguna.....	37
<b>Figura 12</b> Diseño del sistema de flotación para los MORADs.....	39
<b>Figura 13</b> Módulo de flotación y estabilidad.....	40
<b>Figura 14</b> Diseño de la sonda rígida de temperatura .....	40
<b>Figura 15</b> Peso incorporado en el diseño de la sonda rígida de temperatura.....	41
<b>Figura 16</b> Equipamiento para la medición del perfil de temperatura. ....	43
<b>Figura 17</b> Muestreo de temperatura y conductividad eléctrica.....	44

<b>Figura 18</b> Método de la movilización de los SDR de temperatura y conductividad eléctrica. ....	45
<b>Figura 19</b> Diseño final del SDR de temperatura y conductividad eléctrica.....	46
<b>Figura 20</b> Instalación de los SDR en la laguna de Guabizhun.....	47
<b>Figura 21</b> Control y mantenimiento de los MORADs. ....	48
<b>Figura 22</b> Toma de datos proporcionados por los MORADs incrustado en el perfil de agua. ....	49
<b>Figura 23</b> Pluviómetro manual para identificar la presencia de lluvia en el lugar de estudio. ....	50
<b>Figura 24</b> Envases HDPE para recolección de agua en la laguna de Guabizhun. ....	51
<b>Figura 25</b> SRACR en la laguna.....	53
<b>Figura 26</b> SRACR en la laguna sin contaminar el medio o la muestra extraída.....	54
<b>Figura 27</b> Detector LR-115 para el análisis de la concentración de radón. ....	56
<b>Figura 28</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 1( <b>semana 1</b> ). ....	63
<b>Figura 29</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 2 ( <b>semana 1</b> ). ....	64
<b>Figura 30</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 3( <b>semana 1</b> ). ....	65
<b>Figura 31</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica, en el MORAD 4 ( <b>semana 1</b> ). ....	66
<b>Figura 32</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 5 ( <b>semana 1</b> ). ....	67
<b>Figura 33</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 1 ( <b>semana 2</b> ). ....	69

<b>Figura 34</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 2( <b>semana 2</b> ). .....	70
<b>Figura 35</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 3( <b>semana 2</b> ). .....	71
<b>Figura 36</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 4 ( <b>semana 2</b> ). .....	72
<b>Figura 37</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 5 ( <b>semana 2</b> ). .....	73
<b>Figura 38</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 1( <b>semana 3</b> ). .....	75
<b>Figura 39</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 2 ( <b>semana 3</b> ). .....	76
<b>Figura 40</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 3 ( <b>semana 3</b> ). .....	77
<b>Figura 41</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 4 ( <b>semana 3</b> ). .....	78
<b>Figura 42</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 5 ( <b>semana 3</b> ). .....	80
<b>Figura 43</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 1( <b>semana 4</b> ). .....	81
<b>Figura 44</b> Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 2 ( <b>semana 4</b> ) .....	82

**Figura 45** Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 3 (**semana 4**). ..... 83

**Figura 46** Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 4 (**semana 4**) ..... 84

**Figura 47** Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 5 (**semana 4**) ..... 85

## Capítulo I: Introducción

### 1.1 Antecedentes

Comprender las interacciones entre el agua superficial (SW) y el agua subterránea (GW) es un desafío, debido a la falta de información disponible y la complejidad de los procesos involucrados, pero muy imprescindible para la gestión correcta de los recursos hídricos, para lo cual es importante una comprensión integral de las interacciones entre SW y GW (Jafari et al., 2021). Numerosos estudios han utilizado una variedad de mediciones directas e indirectas para cuantificar la descarga de agua subterránea a las lagunas. Se ha evidenciado que la descarga directa de agua subterránea es el principal contribuyente a los balances hídricos, ya sea durante todo el año o durante los meses secos, donde las afluencias superficiales son mínimas (Stieglitz et al., 2013) (Menció et al., 2017).

Se han destacado varios enfoques para estimar las entradas de agua subterránea a sistemas lacustres, incluidos métodos de escala puntual como los medidores de filtración (Duque et al., 2018) y técnicas a gran escala como trazadores geoquímicos, por ejemplo la salinidad y el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), presupuestos de agua, y modelado numérico (Maher et al., 2019). La estimación de las entradas de agua subterránea a las lagunas utilizando balances hídricos volumétricos es un desafío ya que todas las demás variables en el presupuesto de agua también deben estar bien restringidas, es así que los balances de masa de  $^{222}\text{Rn}$  se han convertido en una técnica cada vez más común para cuantificar la descarga de agua subterránea (López et al., 2020).

El  $^{222}\text{Rn}$  es un gas noble con una reactividad química muy baja que generalmente se enriquece en el agua subterránea en relación con el agua superficial, además se produce en los sedimentos a través de la desintegración del isótopo  $^{226}\text{Ra}$  (Baskaran, 2016). Este se desintegra con una vida media aproximada 3,8 días, y esta vida media y volatilidad relativamente cortas

significan que no viaja muy lejos en las aguas superficiales desde su ubicación de descarga, por lo tanto, su presencia indica una descarga local de agua subterránea (Peterson et al., 2019). Según Coluccio et al., (2021). La disponibilidad de detectores de radón portátiles en tiempo real, como el RAD7 y los detectores pasivos LR-115 han hecho que el análisis de radón sea más accesible y preciso, especialmente en sitios de campo remotos, así mismo la naturaleza a gran escala de los balances de masa de radón permiten la cuantificación de la descarga de agua subterránea en sitios grandes o geológicamente heterogéneos, donde los métodos de escala puntual no serían prácticos

Oceanógrafos han estado interesados durante mucho tiempo en obtener mediciones del flujo de calor del hipolimnion marino y relacionar estas con la temperatura global, presupuestos energéticos, edad de la litosfera oceánica, tectónica de placas e hidrogeología marina, para ello los perfiles de profundidad de temperatura de los sedimentos oceánicos generalmente se registran desde un barco al bajar una sonda impulsada por la gravedad que contiene una cadena de termistores a profundidades del lecho marino de 5 a 10 m, pero a medida que se disponía de más datos sobre la temperatura del lecho marino, muchos científicos notaron que los perfiles térmicos a menudo presentaban curvatura, lo que atribuyeron al flujo vertical de fluidos (Abbott et al., 1981). Desde ese entonces los flujos de agua subterránea a un cuerpo superficial (lago, rio entre otros) generalmente se pueden cuantificar a partir de la curvatura de los perfiles de temperatura-profundidad (Kurylyk et al., 2018), esto a su vez en un cuerpo de agua o en un lago, se puede estratificar el cuerpo de agua ya que según su profundidad vamos a tener diferencia de temperatura presentando así según la profundidad del cuerpo de agua tres zonas; la zona superior del lago conocida como epilimnion, la zona intermedia de transición como metalimnion y la zona profunda de temperatura más fría como hipolimnion.

Se conoce también que el agua subterránea contiene una amplia variedad de constituyentes químicos inorgánicos disueltos en diversas concentraciones, resultantes de interacciones químicas y bioquímicas entre el agua y los materiales geológicos (Sarath Prasanth et al., 2012), cuando las sales se disuelven en agua, sus iones se disocian y aumentan tanto la cantidad de sólidos disueltos en la solución como su conductividad (Dahaan et al., 2016).

## **1.2 Planteamiento del problema**

El flujo subterráneo desempeña un papel importante en el funcionamiento de los lagos, en el mantenimiento de sus servicios ecosistémicos y es una fuente de suministro de agua vital para la humanidad, además de formar parte en las aportaciones o intercambio del flujo de agua en los ríos, lagos y humedales que llegan a ser manifestaciones superficiales de las aguas subterráneas.

La afluencia de aguas subterráneas a lagos es un vector para el transporte de especies químicas, metales pesados, nutrientes, carbono y minerales de tierras raras; incluso cuando la descarga de agua subterránea comprende una pequeña proporción del balance hídrico de una laguna, puede contribuir con una carga de nutrientes significativa, porque el agua subterránea a menudo contiene altas concentraciones de especies disueltas (Maher et al., 2019).

El intercambio de flujo de agua ya sea entre el agua superficial y el agua subterránea o viceversa puede contrarrestar varios problemas entre ellos la aportación de las mismas puede llegar a transportar e intercambiar materia disuelta entre sedimentos y aguas superficiales que está regulado por el flujo subterráneo, y que puede afectar fuertemente la zonificación ecológica y la productividad, por ende, es importante tener una comprensión cuantitativa del flujo subterráneo (Sadat-Noori et al., 2021) y comprender las interacciones entre el (SW) y (GW).

Estas interacciones entre el SW y GW al no tener presente una comprensión clara pueden generar efectos negativos importantes en las propiedades y funciones que cumplen las aportaciones

que realiza la misma, debido a estas alteraciones del flujo de agua por la presencia de sólidos disueltos (aguas servidas) o presencia de una carga de nutrientes por la utilización de fertilizantes en los cultivos del lugar de estudio que es una zona rural, trae consigo diferentes consecuencias como lo es la Infiltración de aguas servidas de pozos sépticos en el suelo, debido a la carencia de alcantarillado en la zona, esto a su vez se infiltra en el suelo y puede llegar a afectar el acuífero que tiene una fuerte conexión con el agua subterránea formando parte del caudal. Al existir esta interacción de agua subterránea al cuerpo de agua superficial, puede existir contaminación, alterando en si las características físicas del agua al interactuar directamente con el agua superficial. Por lo tanto, si esta agua subterránea tiene interacción con el agua superficial de la laguna de estudio puede generar problemas ambientales, alteración ecosistémica de la fauna del lugar y servicios ecosistémicos que brinda la laguna.

En los casos en los que hay un desarrollo importante de los recursos hídricos, al utilizar tanto las SW como las GW se afectan mutuamente. Por su interrelación se deben analizar y considerar como un recurso único (Winter et al 1998). Por ello es importante conocer la interacción que tiene el agua subterránea con el agua superficial lo que nos permitirá verificar la calidad del agua y la alteración que puede llegar a generar si esta reserva de agua considerada como un recurso escondido (Reilly et al 2008), que no podemos ver ni medir directamente, puede llegar a afectarse cuando entra en contacto con diferentes microorganismos o contaminantes presentes en el aporte del flujo de agua.

## **1.3 Formulación del problema**

### ***1.3.1 Problema general***

¿Cómo Identificar las posibles zonas de descarga de agua subterránea, mediante el uso de trazadores naturales (radón, temperatura y conductividad eléctrica) en la laguna Guabizhun Provincia del Cañar, Ecuador?

### ***1.3.2 Problemas específicos***

¿Cómo determinar los valores de las magnitudes relacionadas con el radón, la temperatura y la conductividad eléctrica en los distintos puntos de muestro identificados en la laguna de Guabizhun?

¿Qué similitudes y diferencias se encuentran en el análisis estadístico de los valores de las magnitudes relacionadas con el radón, la temperatura y la conductividad eléctrica para identificar las posibles zonas de descarga de agua subterránea?

¿Cuáles son las anomalías existentes entre los valores de las magnitudes relacionadas con el radón, la temperatura y la conductividad eléctrica entre la laguna y el agua subterránea?

## **1.4 Hipótesis**

Los valores de las magnitudes relacionadas con el radón, la temperatura y la conductividad eléctrica en los distintos puntos de muestro identificados en la laguna de Guabizhun nos ayuda a identificar las posibles zonas de descarga de agua subterránea.

Las similitudes y diferencias existentes en los análisis estadísticos de los valores de las magnitudes relacionadas con el radón, la temperatura y la conductividad eléctrica para identificar las posibles zonas de descarga de agua subterránea nos ayuda a verificar si existe aportación de agua subterránea a la laguna o viceversa si la laguna aporta su flujo de agua a el agua subterránea.

Las anomalías existentes entre los valores de las magnitudes relacionadas con el radón, la temperatura y la conductividad eléctrica entre la laguna y el agua subterránea nos ayuda a verificar si existe zonas de descarga de agua subterránea.

## **1.5 Objetivos**

### ***1.5.1 Objetivo general***

Identificar las posibles zonas de descarga de agua subterránea, mediante el uso de trazadores naturales (radón, temperatura y conductividad eléctrica) en la laguna Guabizhun Provincia del Cañar, Ecuador.

### ***1.5.2 Objetivos específicos***

- Determinar los valores de las magnitudes relacionadas con el radón, la temperatura y la conductividad eléctrica en los distintos puntos de muestro identificados en la laguna.
- Analizar estadísticamente los valores de las magnitudes encontradas del radón, la temperatura y la conductividad eléctrica en la laguna.
- Identificar anomalías entre los valores de las magnitudes relacionadas con el radón, la temperatura y la conductividad eléctrica, de posibles contribuciones de agua subterránea a el agua de la laguna.

## **1.6 Justificación**

El flujo subterráneo juega un papel importante en el funcionamiento de los lagos y en el mantenimiento de sus servicios ecosistémicos, específicamente el transporte e intercambio de materia disuelta entre sedimentos y aguas superficiales que está regulado por el flujo subterráneo, y que puede afectar fuertemente la zonificación ecológica y la productividad, por ende, es importante tener una comprensión cuantitativa de este flujo subterráneo (Sadat-Noori et al., 2021). Estudios en este ámbito, han demostrado que la afluencia de aguas subterráneas a lagos es un

vector para el transporte de especies químicas, metales pesados, nutrientes, carbono y minerales de tierras raras; incluso cuando la descarga de agua subterránea comprende una pequeña proporción del balance hídrico de una laguna, puede contribuir con una carga de nutrientes significativa, porque el agua subterránea a menudo contiene altas concentraciones de especies disueltas (Maher et al., 2019).

Los flujos subterráneos son procesos particularmente complejos debido a su heterogeneidad espacial y temporal y, por lo tanto, a menudo son el componente menos cuantificado de un balance hídrico de humedales (Webb et al., 2017). Para superar los desafíos de cuantificar el flujo subterráneo mediante métodos hidrométricos, también se han aplicado ampliamente trazadores naturales. El  $^{222}\text{Rn}$  es uno de los gases que predominan en las técnicas de trazadores más efectivas y establecidas en la investigación hidrogeológica (Rosenberry et al., 2020) (Savatier & Rocha, 2021), así como los desarrollos recientes en la medición de temperatura y los componentes químicos del agua, como los sólidos disueltos totales (SDT) (Xu et al., 2017) (Gordon et al., 2012). Estos trazadores naturales al ser muy eficaces, de accesible manipulación e investigados por estudiosos del tema, hace que se apliquen ampliamente en los estudios de aguas subterráneas para una variedad de propósitos, incluida la cuantificación de los intercambios verticales intraacuíferos e interacuíferos.

Considerando lo expuesto en la literatura, se cree que es posible aplicar estas técnicas con trazadores naturales ( $^{222}\text{Rn}$ , Temperatura y conductividad eléctrica) en un sistema lacustre, para determinar el aporte de agua subterránea. Si suponemos que, el lago está bien mezclado y que los valores de medición tanto de  $^{222}\text{Rn}$ , temperatura y conductividad eléctrica del agua subterránea es mayor que la del agua del lago, al mezclarse esta última con la del lago, los valores de medición

de los trazadores en la vecindad del afluyente subterráneo aumentarán, generando un gradiente de concentración con dirección vertical y sentido hacia la parte más profunda del cuerpo de agua.

Los resultados de este trabajo permitirán contribuir al desarrollo de más investigación para explorar a detalle las numerosas aplicaciones del  $^{222}\text{Rn}$  como trazador natural, al igual que el uso de mediciones de temperatura y conductividad en el perfil vertical de cualquier sistema lacustre, y así mismo asiste a generar alternativas de resiliencia del medio, pues aportará a la mejora de la gestión de los recursos hídricos y por ende a resguardar la calidad y el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos.

Todavía no se otorga una alta prioridad al cuidado de la Laguna de Guabizhun ya que ninguna institución se encontraba involucrada, y está claro que cuando esta se inicie se tendrá que llenar los vacíos históricos; aspecto esencial para dar seguimiento a los análisis. Hay que tomar relevancia también en proteger a los acuíferos de la contaminación, ya que imponen las necesidades de realizar estudios más detallados, controlar su compartimiento a través de trazadores ambientales, también controlar las extracciones.

En la actualidad la vulnerabilidad de los acuíferos se ve afectada por los problemas de contaminación, pues debido a fuentes potenciales de contaminación sobre la zona de recarga tales como el uso de agroquímicos, aguas residuales, residuos sólidos, entre otros llegan a contaminarse y tomando en cuenta a estos factores se puede determinar que en el caso de que exista aportación o capacitación del agua subterránea, su directa conexión con los acuíferos y al llegar a interactuar directamente con el aporte al agua superficial puede generar alteración en las características propias de la laguna.

## 1.7 Delimitación

### 1.7.1 Delimitación Espacial

El presente proyecto de investigación de la interacción entre el agua subterránea y el agua superficial se desarrolló en la laguna de Guabizhun cuya ubicación se especifica en la Tabla 1:

**Tabla 1**

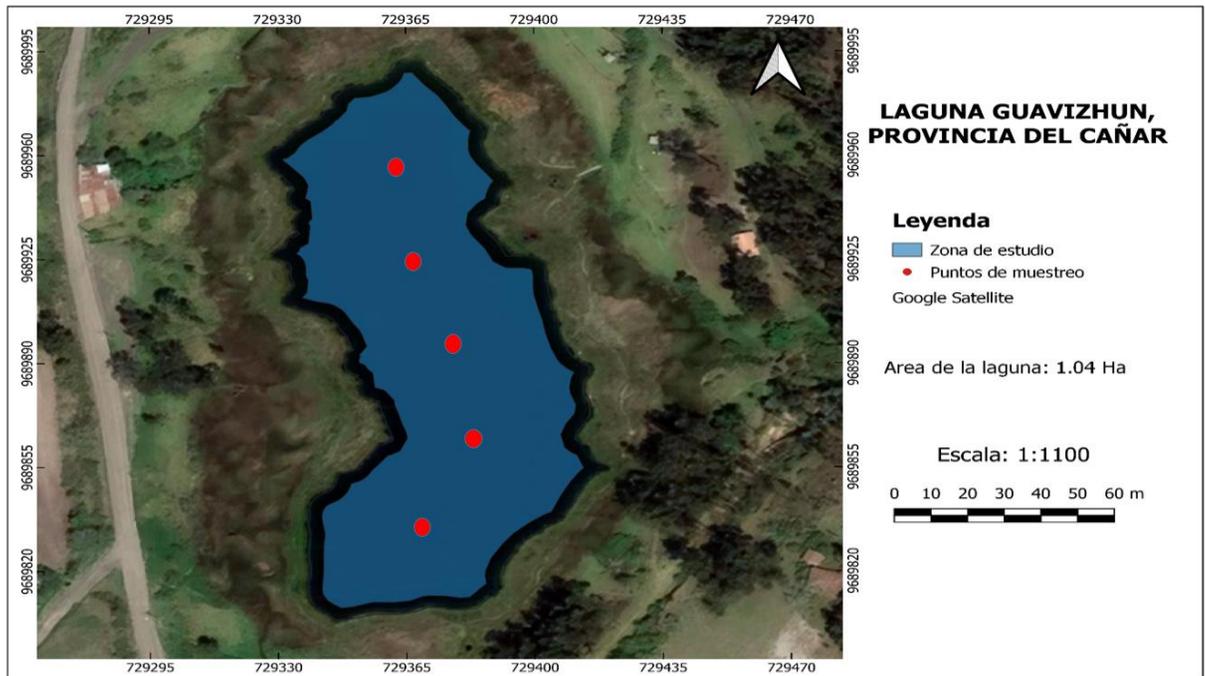
*Posición geográfica de la Laguna de Guabizhun*

Laguna de Guabizhun	
Provincia:	Cañar
Cantón:	Déleg
Parroquia:	Solano
Altitud:	2655 m.s.n.m
Extensión (largo):	210 metros
Extensión (Ancho):	100 metros

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 1**

Identificación de los puntos de muestreo.



**Fuente:** Elaboración propia

### ***1.7.2 Delimitación temporal***

El respectivo muestreo se lo realizó en el área superficial del cuerpo de agua. Se estudió en detalle la laguna, donde se realizó una caracterización física del área de estudio para poder determinar si existía la interacción del agua superficial con el agua subterránea.

Las mediciones de las concentraciones de conductividad eléctrica y temperatura en esta investigación se realizaron mediante cinco módulos que utilizaron sensores de temperatura y conductividad eléctrica los cuales fueron diseñados y construidos especialmente para detectar anomalías en el cuerpo de agua. Las señales emitidas por los sensores fueron recolectadas y almacenadas por un sistema Arduino. La data se analizó e interpretó haciendo uso de gráficas temporales.

Los parámetros térmicos de los sedimentos se determinaron mediante observación de campo de acuerdo a las pautas proporcionadas por Lapham, (1989), donde se tomaron mediciones a distintas profundidades mediante sensores instalados en tubos de acero, los mismo que permanecieron sumergidos en la laguna e incrustados en el lecho de la laguna, mientras que, las mediciones de las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  se realizaron de acuerdo a la técnica de medición basada en la exposición de detectores pasivos LR-115.

En el presente proyecto se realizaron 5 muestreos a lo largo de la laguna de Guabizhun, durante un periodo de 30 días.

Este trabajo está conformado por 4 capítulos: en el primer capítulo se describen los elementos metodológicos necesarios para planificar la investigación y que justifican el estudio. En el segundo se presentan los elementos teóricos que sustentan la investigación. Luego, en el tercero, se desarrolla el capítulo referencial a materiales y métodos que se utilizado para el desarrollo de la investigación. En el cuarto capítulo y final, se exponen los resultados obtenidos de la investigación y se interpretara los resultados obtenidos. Finalmente, las conclusiones, la bibliografía consultada y citada, así como un conjunto de anexos que complementan el trabajo.

## Capítulo 2: Marco teórico

En este capítulo se proporcionará una breve explicación sobre las aguas subterráneas, la interacción que existe entre el agua superficial y el agua subterránea y los trazadores naturales para la identificación de las aguas subterráneas que se encuentra enfocado al estudio desde la parte superficial de la laguna hasta la profundidad su lecho.

### 2.1 Agua Subterránea

Las aguas subterráneas son aquellas masas de agua que se encuentran bajo la epilimnion del suelo, consideradas también como un suministro fiable de agua dulce (Kanchana et al., 2023). Según (Caraballo & Xavier, 2012) forman parte del ciclo hidrológico, estas se desarrollan de la infiltración que se da a través del agua de lluvia, de la nieve, del agua que se infiltra de las lagunas y los ríos, o en general, cuando la capa superficial del suelo se encuentra saturada de agua. Su calidad está influenciada tanto por su geología, el clima, las características del acuífero, la geografía, las actividades del subsuelo y los diferentes procesos geoquímicos que llegan a caracterizarse por ser tanto de tipo dulce a salobre y dulce (Subba Rao & Chaudhary, 2019).

Esta recarga procede principalmente de las precipitaciones, pero se puede producirse también a partir de escorrentías y cursos superficiales de agua que pueden surgir de acuíferos próximos o de retornos de ciertos usos como el riego. Funcionan además como reservorios de agua, lo que hace posible poder extraer agua en cualquier época del año de prácticamente cualquier punto de la epilimnion del acuífero, aunque según (Calvey et al., 2022) sin la extracción, las anomalías de almacenamiento de agua subterránea todavía ocurren naturalmente debido a los cambios en la precipitación y la humedad del suelo.

Por sus características hidrogeológicas el agua subterránea presenta menor susceptibilidad a contaminación antrópica y a las variaciones ambientales (Cerón et al., 2021), aunque según su

naturaleza dinámica se puede ver fuertemente afectados por factores tales como la expansión de la industrialización, las actividades de riego, y la urbanización; por lo tanto, conservar y monitorear este importante recurso es esencial y de vital importancia.

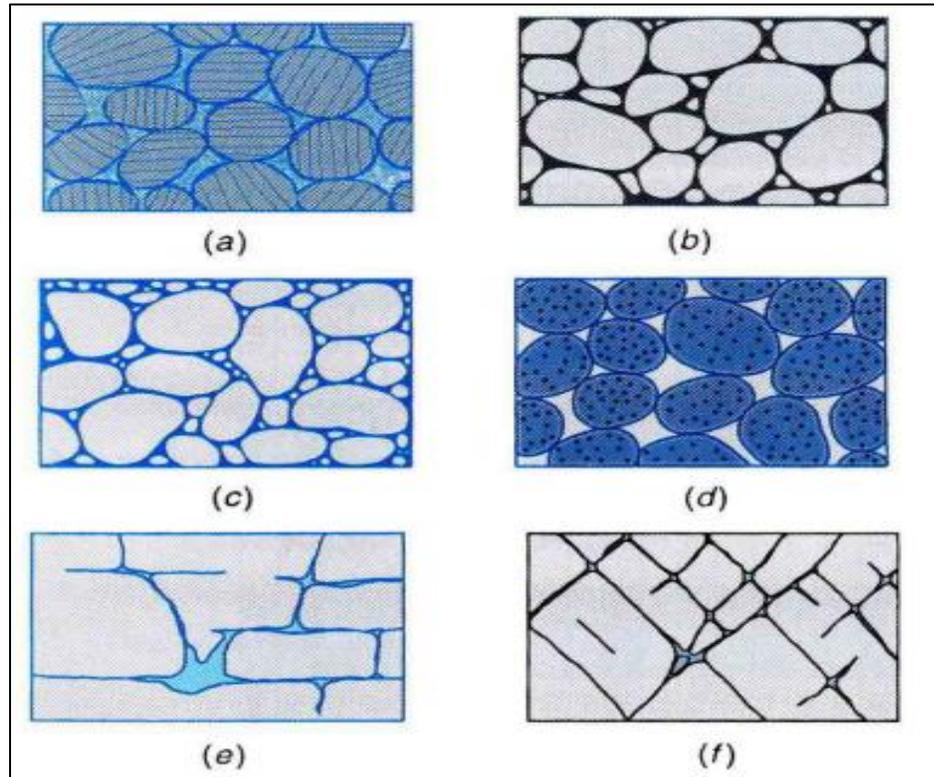
## **2.2 Movimiento del agua subterránea**

El agua subterránea se mueve desde las regiones altas en donde tiene más carga hidráulica hacia regiones donde tiene menor carga. La carga se lo relaciona con la altura a la cual el agua puede elevarse por arriba del nivel de referencia y se mide en metros (m), siendo una medida que se puede registrar como la cantidad de energía que el agua posee, en lo descrito anteriormente se deduce que la energía producida cuando fluye el agua subterránea es lenta esto ocasionada por su movimiento que puede llegar a ser muy pequeño, aunque según su elevación y presión son otras formas de manifestación de energía del agua (Price & Back, 2016).

Agregando a lo anterior el agua subterránea se almacena y se mueve también a través de las fracciones geológicas que tienen poros o vacíos, que según su volumen total de un material se lo define como porosidad total, y porosidad eficaz, aunque esto no representa más que una porción de la porosidad total (m), constatando que la porosidad eficaz se ve afectada por la distribución del tamaño de los granos, presencia de arcilla y su estado de hidratación. Dicha porosidad se puede representar según la porosidad primaria que son espacios entre los granos, en cambio se representa como porosidad secundaria a vacíos generados por las fisuras, grietas y fracturas de rocas consolidadas o cuevas formadas por disolución de la roca. Por último, la facilidad con que un fluido pueda moverse entre ellos va a depender en sí de la permeabilidad entre los poros o espacios vacíos conectado entre sí, que según la literatura especializada a esto se denomina comúnmente como conductividad hidráulica (Quintero, 2011).

## Figura 2

*Representación esquemática de los tipos de roca según su relación entre textura y porosidad.*



**Fuente:** (Quintero, 2011).

- a) Sedimento bien clasificado y con gran porosidad
- b) Sedimento mal clasificado y con baja porosidad
- c) Sedimento con matriz o cemento en sus intersticios con porosidad alta.
- d) Sedimentos con minerales en los intersticios, con disminución de la porosidad.
- e) Roca con porosidad por disolución.
- f) Roca con la porosidad por fracturación.

En otras palabras, la porosidad del sedimento va a estar asociado entre los espacios entre los granos, fisura y fracturas y el movimiento de fluido del agua subterránea va a depender de la porosidad que tenga la roca.

### **2.3 Composición del agua subterránea**

La composición natural del agua subterránea dependerá de la precipitación local del sitio analizado que se ve fuertemente apegado a los factores climáticos y a el agua lluvia del lugar, sin dejar de lado la interrelación que tiene entre el suelo y las rocas que llega a tener una composición química según la filtración del agua y los procesos microbiológicos del suelo, ya que una vez que el agua se infiltra y pasa a través del suelo y la roca, hay disolución de materiales lo que genera un cambio en la composición de las aguas subterráneas. Estos elementos químicos, que generalmente están presentes en el suelo llegan a ser el resultado de las etapas del ciclo hidrológico que con la presencia de los gases atmosféricos, partículas de polvo o aerosoles en el aire llegan a un punto de condensación y caen en el suelo en forma de gotas de lluvia, o como elementos en suspensión (Quintero, 2011).

Por lo tanto, la composición del agua subterránea va a depender de la composición que llega a general agua lluvia, de los tipos de suelo y rocas que tenga que atravesar la infiltración del agua desde su tiempo de contacto y los procesos químicos y microbiológicos en la zona saturada y no saturada.

### **2.4 Análisis de las zonas de recarga y descarga del agua**

Para un análisis de la recarga de agua, se debe considerar un estudio hidrológico que evalúa el comportamiento histórico de la precipitación, infiltración, evapotranspiración, flujo base, escorrentía. Del mismo modo, se puede llegar a estimar valores de recarga de agua a partir de balances volumétricos obtenidos de los registros e inventarios de fuentes, los cuales llegan a

responder a una distribución espacial y temporal que provienen de los procesos naturales, influenciados principalmente por evapotranspiración y la precipitación, por zonas de interconexión hidráulica aledañas, o por procesos que intervienen las actividades humanas. Por otra parte para estimar la recarga de agua subterránea existen diversos métodos que se desarrollan según los balances hidrológicos hasta el método de fluctuaciones del nivel freático; por ello el método elegido debe ser técnicamente sustentado que muestre un zonificación de la recarga de agua que va a desarrollarse según la realidad de la zona de estudio y a la disponibilidad de información (Zavaleta, 2016).

En las zonas de recarga de agua un indicador llega a ser la conductividad hidráulica de la roca, ya que es la que permite la infiltración del agua lluvia, teniendo en cuenta que una zona de recarga debe reunir una serie de características que propicien la infiltración de agua hasta alcanzar el nivel freático, tomando en consideración según (Peñuela-Arévalo y Carrillo-Rivera, 2013, p. 24) que las zonas del nivel freático es profundo, y el suelo poco desarrollado y ácida, con bajas concentraciones de sodio, sales y poca cantidad de materia orgánica.

Por otro lado, las zonas de descarga, en cambio se llega a representar por tener propiedades son más visibles, que se caracterizan por tener una elevación topográfica más baja respecto a donde se origina la recarga; teniendo en cuenta que el movimiento de agua es vertical ascendente desde el subsuelo, y contribuyen junto con la infiltración superficial, a la formación de cuerpos de agua (lagos, ríos, lagunas costeras, entre otras). Los suelos que se encuentran asociados a esta recarga de agua tienden a ser más salinos y alcalinos, con mayor presencia de materia orgánica, y llegan a tener rasgos hidromórficos, en cambio en la vegetación asociada sobrevive en regiones permanentemente inundadas (vegetación freatofita) y/o tolerantes a la salinidad (vegetación halófila) ya que mayoritariamente la circulación del agua es lateral.

## 2.5 Interacción de agua subterránea y superficial

La interacción entre el agua subterránea y superficial se refiere en sí, al intercambio de flujos que puede llegar a generar el agua superficial con el agua subterránea, nos ayuda a comprender cuándo el agua subterránea se descarga en el agua superficial o viceversa, cuándo el agua superficial se filtra en el agua subterránea. Según (Quintana, 2018) la postura relativa de la interacción del agua subterránea en el espacio o lugar, se distinguen tres tipos de sistemas de interacción: local, intermedio y regional, en donde pueden sobreponerse verticalmente unos con otros dentro de una cuenca sedimentaria (sedimentos). En un sistema de interacción de flujo local, el agua fluye hacia un área de descarga próxima, tal como lo es un curso de agua, o una laguna. En un sistema de flujo intermedio llega a caracterizarse por la presencia de uno o varios altos o bajos topográficos que son localizados entre zonas de recarga y descarga de flujos locales y finalmente en un sistema de flujo regional, en la que el agua atraviesa distancias más largas que las del flujo local y estas a su vez se descarga en el océano, en los ríos principales y en los grandes lagos (Quintana, 2018).

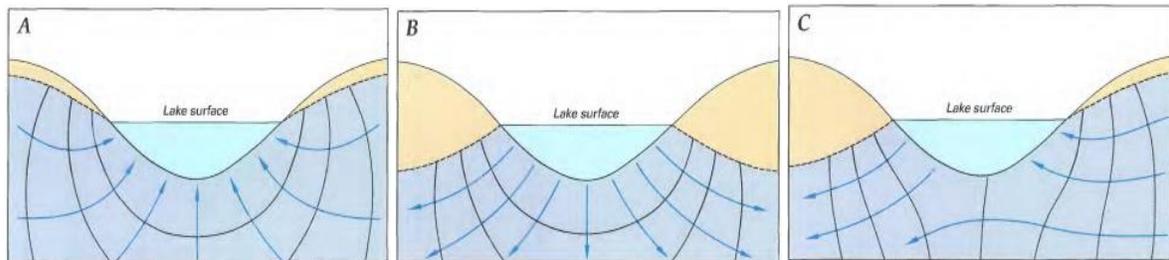
La interacción entre el agua subterránea y superficial en sí, llegan a ser complejas, y para entender esta interacción no solo se debemos centrarnos en la interacción sino también en una amplia relación que llega a tener según la geología, el clima, la calidad de agua y la hidrología del lugar, en la que se debe tener en cuenta un modelo conceptual hidrogeológico adecuado, o debe apegarse a un análisis de los sistemas ambientales en los que se consideran los factores bióticos, ya que esta interacción llega a ser bidireccional dependiendo del régimen hidrogeológico y las condiciones climatológicas (Ntona et al., 2022).

Por otro lado según la organización jerarquizada del sistema de flujos, en donde interactúan las aguas subterráneas con las aguas superficiales, conlleva a tener también sistemas lacustres que

se ilustran en la figura 3, que interactúan con el agua subterránea de tres formas básicas: ocurre cuando el agua subterránea se descarga en el agua superficial, o el agua superficial se filtra en el agua subterránea, o también puede suceder ambos procesos a la vez, es decir, que los lagos reciban agua subterránea y al mismo tiempo tengan pérdidas por infiltración al agua subterránea a través su lecho (Sechu et al., 2022).

### **Figura 3**

*Los lagos pueden recibir entrada de agua subterránea (A), perder agua como filtración al agua subterránea (B), o ambos (C).*



**Fuente:** (Winter et al., 1999).

## **2.6 Agua subterránea fuente de nutrientes**

Kornelsen & Coulibaly, (2014) y Robinson, (2015) concuerdan que las interacciones entre las aguas subterráneas y superficiales son complejas y la predicción de la carga de nutrientes desde las aguas subterráneas hasta los cuerpos de agua y sus afluentes presenta numerosos desafíos, considerando que en la actualidad se reconoce ampliamente que las fuentes no puntuales de agua subterránea también contribuyen a la carga de nutrientes. Frente a aquello la hipótesis planteada por Brookfield et al., (2021), alega que los largos tiempos de residencia hacen que el agua subterránea sea geoquímica y biológicamente distinta del agua superficial, lo que permite que las

entradas de agua subterránea modulen la dinámica de la proliferación de algas (crecimiento, disminución, toxicidad).

## **2.7 Identificación de descargas de flujos de agua superficial y agua subterránea.**

La identificación y cuantificación de los flujos de agua subterráneas que se descargan en cuerpos de agua superficiales es esencial para la gestión de un recurso hídrico (Echegoyen et al., 2018), esta se puede llevar a cabo con una variedad de métodos dependiendo de la captación del agua se puede dar pruebas hidráulica, modelos numéricos de agua subterránea y métodos de trazador ambiental basados en el campo, teniendo relevancia en nuestro estudio los trazadores ambientales que según los sectores de identificación de descarga de los flujos de agua, en general se puede realizar en la zona superficial mediante la utilización de diferentes trazadores, tales como la temperatura o en otros casos según las especies iónicas disueltas e isótopos estables, así como la conductividad eléctrica, y por otro lado para detectar el flujo de agua subterránea, que gracias a la altas concentración de radón presentes en el flujo de agua y al corto tiempo de desintegración de aproximadamente 3,8 días, el radón  $^{222}\text{Rn}$  es considerado como una técnica de medición que puede ser utilizada para detectar la descarga de la mismo, que en numerosos ejemplos la aplicación de este trazador ha demostrado su importancia y utilidad que es en la determinación de flujos entre los curso, intercambio de flujos de agua y en la interfaz agua- sedimento (Martínez, 2018).

Los trazadores ambientales mencionados con anterioridad, al ser monitoreados en aguas naturales nos proporcionan información valiosa para poder comprender los procesos de interacciones que se puede llegar a generar entre el agua superficial-agua subterránea, en donde realizando un análisis cualitativos y cuantitativos nos ayuda a estimar el intercambio bidireccional de agua asociado con las interacciones a que se genera a pequeña escala entre las aguas superficiales y aguas subterráneas (Xu et al., 2017).

## 2.8 Radón

El radón es un gas noble incoloro, inodoro, inerte y radiactivo que se encuentra de forma natural en el medio ambiente. De los 37 isótopos radiactivos ( $^{195}\text{Rn}$  a  $^{231}\text{Rn}$ ) del radón, el  $^{222}\text{Rn}$  es el más abundante y el que tiene una vida media más larga ( $t_{1/2}=3,8$  días) en comparación con sus otros isótopos, además es el más denso entre los gases nobles (masa atómica=222), es soluble en agua, y su solubilidad disminuye al aumentar la temperatura.

### 2.8.1 Comportamiento del radón en el agua subterránea

Para el estudio y la aplicación del método de recolección de radón en la laguna es importante conocer el comportamiento del radón en las aguas subterráneas. El radón en el agua subterránea bajo condiciones normales está alterado directa o indirectamente por la desintegración de los isótopos que participan en la generación del radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), se inicia con el uranio ( $^{238}\text{U}$ ), y a su vez se desintegra en el radón, dado que este es un gas procedente en su mayor parte de las rocas y de los suelos.

La presencia de radón en el agua subterránea se debe principalmente a que el flujo de agua se distribuye principalmente por las rocas o suelos que en su mayor parte contienen altos niveles de radón, esencialmente en las rocas ígneas intrusivas y efusivas ácidas, como las riolitas o granito, así como las rocas sedimentarias ricas en fosfatos y las rocas metamórficas derivadas de las mismas o también de origen ígneo. Dado que el radón es un gas, su presencia en el flujo de agua subterránea se debe principalmente por los largos tiempos de contacto que se encuentra con minerales portadores de uranio, el mismo que tiene una vida media más larga ( $t_{1/2}=3,8$  días) en comparación con sus otros isótopos, le permite transportarse largos trayectos hasta una zona donde es captada y consumida (Martínez, 2018)

Según (Santamarta Cerezal et al., 2020) los niveles de radón presente en el agua subterránea suelen tener bajos niveles ( $< 2.000 \text{ Bq/m}^3$ ) ya que la mayor parte del radón disuelto del agua subterránea es exhalado gracias a la agitación de estas, y suele decaer casi por completo en abastecimientos superficiales gracia al decaimiento radioactivo y a la desgasificación que se da al entrar en contacto con la atmosfera (Echegoyen et al., 2018).

**Tabla 2**

*Niveles máximos, mínimos y promedios de radón (expresado en  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ) en diferentes ambientes superficiales y subsuperficiales.*

Ambiente	Máximo	Mínimo	Promedio
Agua subterránea	100.000.000	5.000	500.000
Aire edáfico	5.000.000	1.000	10.000
Aire interior	100.000	10	50
Aire exterior	1.000	1	10

**Fuente:** Modificado de USGS (1992)(Santamarta Cerezal et al., 2020).

## 2.9 Radón como trazador

En la mayoría de los casos, las investigaciones sobre la conectividad de las aguas superficiales y las aguas subterráneas, la hidrodinámica y otros procesos del subsuelo se basaron en herramientas tradicionales invasivas y costosas (p. ej., mediciones hidrométricas, tintes artificiales, etc.) en ese entonces. Las técnicas hidrométricas puntuales pueden alterar las vías de flujo y no son lo suficientemente eficientes en entornos subterráneos dominados por heterogeneidades espaciales. Esos inconvenientes impulsaron la investigación sobre la utilidad del

radón como marcador y precursor en varias aplicaciones hidrogeológicas y geológicas (Chetia et al., 2022)

El  $^{222}\text{Rn}$  posee una reactividad química muy baja que suele estar enriquecido en las aguas subterráneas en relación con las aguas superficiales. Este se produce en los sedimentos a través de la descomposición del isótopo  $^{226}\text{Ra}$ . Debido a su vida media relativamente corta significa que no viaja muy lejos en las aguas superficiales desde su lugar de descarga, por lo tanto, su presencia indica una descarga local de aguas subterráneas (Dimova et al., 2013).

## **2.10 Temperatura**

La temperatura se le considera como un parámetro físico, el cual resulta una medida de la energía cinética interna media de las moléculas que integran el cuerpo de agua, que se da en forma de agitación térmica resultado de la colisión entre las moléculas que forman el agua (Belendez, 2017).

### ***2.10.1 Comportamiento de la Temperatura en el agua subterránea.***

La temperatura del suelo aumenta con la profundidad; cuando el agua subterránea entra en contacto con las rocas en el interior de la tierra, ocurre un intercambio térmico que lleva al agua a equilibrar su temperatura con la de su entorno. Lo inverso ocurre cuando el agua subterránea entra en contacto con las aguas superficiales. En este último caso el calor fluye de las aguas subterráneas a las superficiales, provocando el aumento de la temperatura en el lugar de la contribución de las aguas subterráneas.

## **2.11 Temperatura como trazador**

La temperatura se puede utilizar como trazador, según (Vélez & Vásquez, 2004) nos puede ayudar en dos puntos esenciales como lo es estimar la infiltración proveniente de cuerpos de agua como también determinar cuándo el agua fluye por corrientes efímeras (en especial en zonas

áridas). Este procedimiento se lo realiza dependiendo de las escalas de tiempo y el tipo de sedimento que nos ayuda a monitorear la temperatura a varias profundidades.

Según Salem & Bayumy, (2016), la temperatura del agua subterránea medida en los pozos de observación es la misma que la temperatura de la matriz rocosa, porque es probable que el agua subterránea y la matriz rocosa circundante estén en equilibrio térmico, bajo esta premisa los perfiles de temperatura-profundidad se pueden utilizar para estimar los flujos de agua del subsuelo. Un perfil de temperatura-profundidad en ausencia de un flujo vigoroso de agua subterránea generalmente tiene un gradiente lineal constante gobernado por la conducción de calor. Tal como lo reporta Domenico & Palciauskas, (1973) en su estudio, en el cual encontró que el perfil de temperatura-profundidad muestra una forma convexa hacia abajo en el área de recarga, y una forma convexa hacia arriba en el área de descarga donde el flujo de agua subterránea es predominantemente ascendente.

## **2.12 Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica es una medida que refleja la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, representada en el sistema internacional de unidades como CE, según (Solís-Castro et al., 2018) se relaciona con la concentración de las sales en disolución, que se encuentra estrechamente relacionada con la concentración de sales disueltas en el agua, su solubilidad va a variar según la temperatura del agua, por lo que la conductividad varía según la temperatura del agua. Además, puede actuar como un indicador en la infiltración del agua subterránea o de fugas de aguas residuales debido a que su medida se ve afectada en la combinación del contenido de agua con el suelo, contenido de sales disueltas, contenido de arcillas, mineralogía y temperatura del agua.

### ***2.12.1 Contribuyentes iónicos principales y secundarios***

Según el número de iones en solución se transmite la conductividad eléctrica e indica la cantidad total de sales disueltas en el agua, en las aguas subterráneas naturales. La mayor parte de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico, las mismas que se descomponen tanto en iones cargados positivamente (que se constituyen mayoritariamente) y negativamente (constituyentes secundarios) (Santillán, 2020).

#### ***Constituyentes mayoritarios***

- Aniones:  $\text{HCO}_3^-$ ;  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ .
- Cationes:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ .
- Otros:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{SiO}_4^{4-}$ , o  $\text{SiO}_2$

#### ***Constituyentes minoritarios o secundarios***

- Aniones:  $\text{F}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{SH}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{BO}_3^{3-}$
- Cationes:  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ .
- Constituyentes traza:  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ , entre otros.

Por otro lado, encontramos los nitratos y fosfatos que no contribuyen de forma apreciable a la conductividad, pero llegan a ser muy importantes biológicamente (Solís-Castro et al., 2018). Aunque, dentro del agua dulce natural, estos componentes aparecen en forma iónica generalmente o sales casi separadas y se presentan como iones complejos de sustancias orgánicas o inorgánicas.

### **2.13 Conductividad eléctrica como trazador**

Según Harvey et al., (1997), el método de mapeo de conductividad eléctrica aprovecha las diferencias entre las fuerzas iónicas del agua superficial y del agua subterránea, pues las aguas subterráneas suelen tener una mayor cantidad de sólidos disueltos totales que las aguas superficiales, por lo tanto al existir una descarga de agua subterránea a un cuerpo de agua

superficial, donde la conductividad eléctrica es menor, ocurrirán anomalías medibles a lo largo de la interfaz sedimento-agua. Un estudio más reciente es el de (Xu et al., 2017), en el cual realizaron análisis cualitativos y cuantitativos para estimar el intercambio de agua bidireccional asociado con las interacciones de agua subterránea y superficial, que, haciendo uso de las mediciones de sólidos disueltos totales, concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  y  $^{18}\text{O}$  y patrones derivados de un método de trazador térmico demostraron la existencia de contribuciones de subterránea a un río.

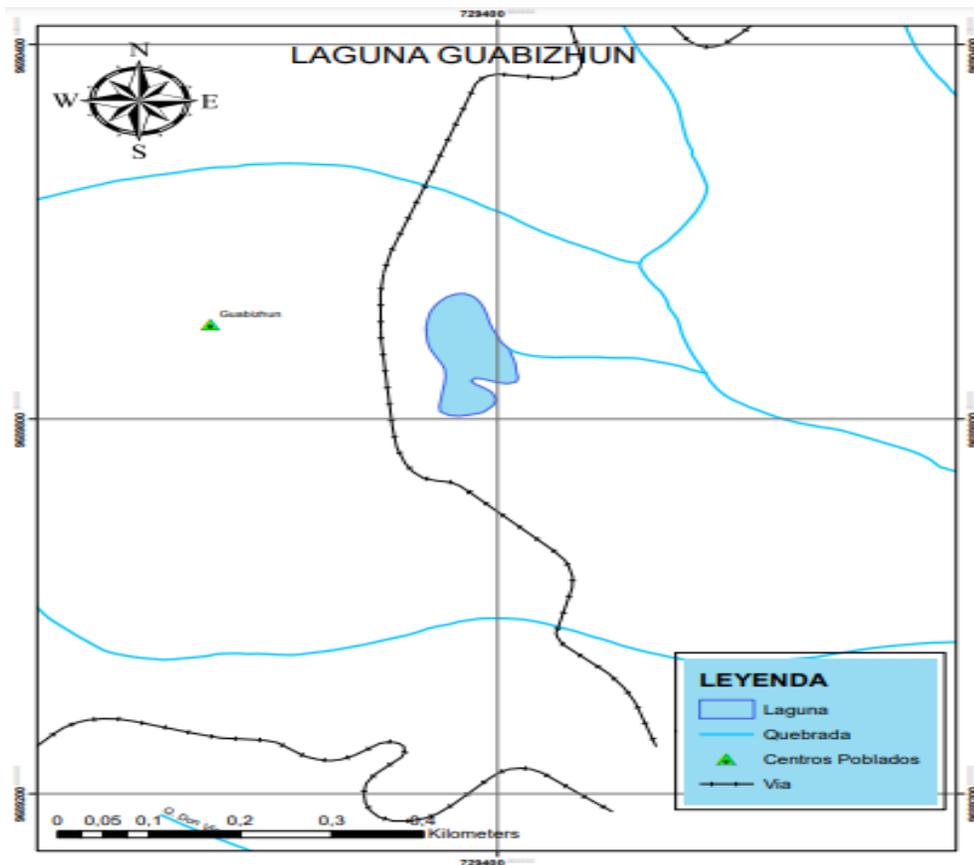
## Capítulo 3: Materiales y métodos

### 3.1 Ubicación del área de estudio

El presente proyecto se realizó en la laguna de Guabizhun, la cual se encuentra ubicada al sur del Cantón Déleg, Provincia del Cañar que limita al norte con la Parroquia urbana de Déleg hacia el sur con la parroquia Llacao (Provincia del Azuay), al este con la Parroquia Javier Loyola (Provincia de Cañar) y hacia el oeste con la Parroquia Octavio Cordero Palacios (Provincia de Azuay) y la Parroquia de Sidcay (Provincia del Azuay).

#### Figura 4

*Ubicación de la laguna de Guabizhun.*



**Fuente:** Elaboración propia

### **3.2 Caracterización de la laguna de Guabizhun**

La laguna de Guabizhun proviene del vocablo quechua Guabizhun que significa Corazón del Hombre; tiene una dimensión aproximada de 210 m de largo por 100 metro de ancho, se encuentra en el kilómetro 2 de la carretera de Solano-Déleg. La formación geológica de esta laguna se debe a la depresión del terreno, en sus alrededores se puede apreciar una variedad de flora, con plantas nativas como la totora, caballo chupa, chilca, retama, cabuya entre otras, y entre la fauna encontramos aves como golondrinas, quillicos. Actualmente el lugar es considerado turístico en donde se puede realizar diferentes actividades recreativas dentro y a los alrededores de la laguna como paseos en bote, pesca deportiva y caminatas por el sector (Prefectura del Cañar, 2015).

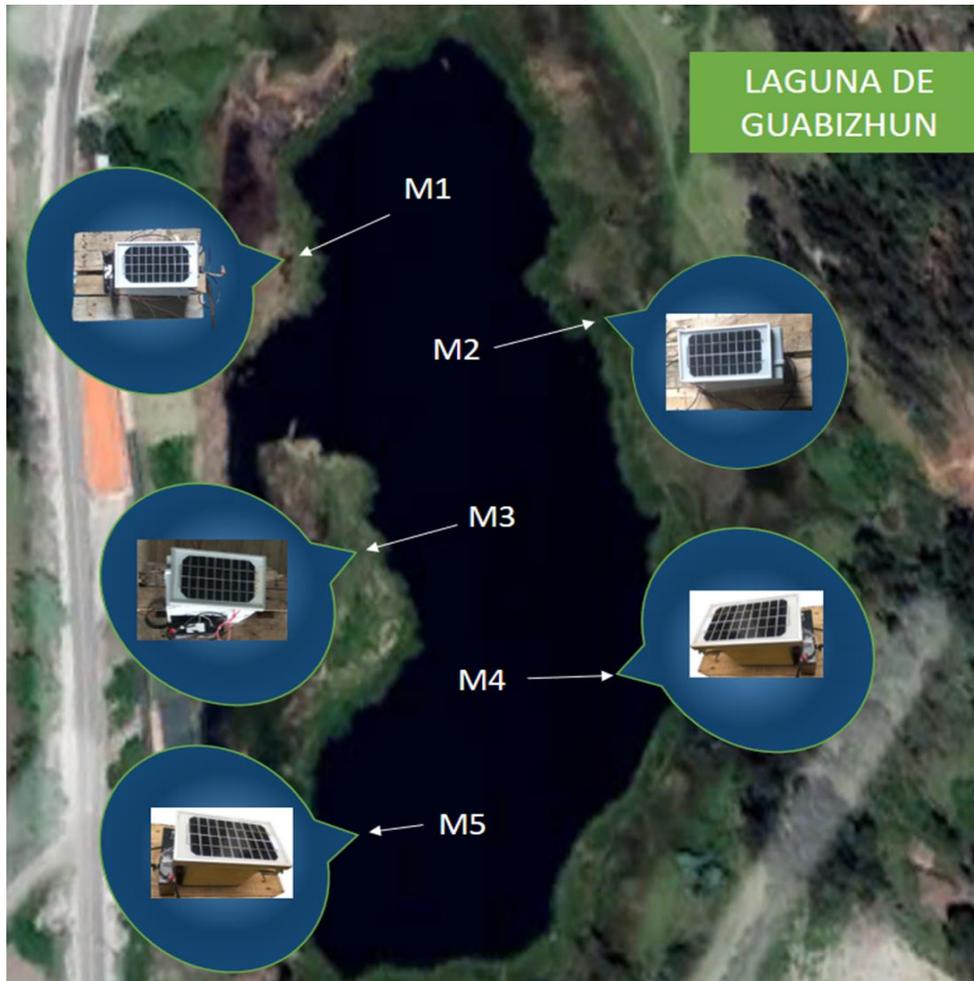
### **3.3 Muestreo**

El muestreo se lo realizo en el área superficial del cuerpo de agua. Se estudiarán en detalle la laguna, donde se realizó una caracterización física del área de estudio.

### 3.3.1 Ubicación de los puntos de muestreo

**Figura 5**

*Puntos de muestreo de la laguna de Guabizhun.*



*Fuente: Google maps.*

Los puntos de muestreo se distribuyeron a lo largo de los 210 metros de largo, partiendo con el primer punto de muestreo desde, la parte este, que limita con la Parroquia Javier Loyola a los 45(m), el segundo a los 40(m), el tercero a los 40(m), el cuarto a los 40(m) y el quinto a los 45(m) que limita con la parte norte de la parroquia urbana de Déleg, abarcando todo el largo de la

laguna, se registró además datos de latitud, longitud y altitud de cada punto de estudio. Cada punto fue identificado con un código como se listan a continuación: M1, M2, M3, M4 y M5.

### 3.4 Materiales

En el presente apartado se detallarán los equipos y elementos utilizados para el diseño y construcción de módulos que recolectan datos de las concentraciones de conductividad eléctrica y temperatura, donde así también se especificaran los equipos utilizados para recolectar la concentración de radón.

**Tabla 3**

*Materiales utilizados en el proceso de investigación.*

<b>Equipamiento:</b>		<b>Materiales.</b>
Estructura del módulo	Temperatura y conductividad eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Equipamientos con diseño técnico de fibra de vidrio.</li> <li>- Sistemas eléctricos y electrónicos con Sistema Arduino y MicroSD.</li> <li>- 30 sensores de Temperatura.</li> <li>- 15 sensores de Conductividad Eléctrica.</li> <li>- Cables reforzados.</li> <li>- Cinco paneles solares.</li> <li>- Cinco baterías de moto.</li> </ul>
Estructura de las Balsas		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Madera de pino con una base de 38 cm x 5 cm de ancho.</li> <li>- Tacos de madera de 28 cm de largo x 3 cm de ancho.</li> <li>- Flotadores (Botellas de Agua) de 2, 3 y 3.8 litros.</li> <li>- Piola.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Clavos.</li> <li>- Martillo.</li> </ul>
Estructura del lecho (Barra de acero).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tubo de acero de 120 cm.</li> <li>- Varilla de acero de 20 cm.</li> <li>- Fierro de Base Rectangular de 50 cm x 15 cm.</li> <li>- Pesos de acero.</li> <li>- Saquillo de polipropileno.</li> <li>- Soga de 4 hebras <math>\frac{3}{4}</math>.</li> </ul>
Movilización de los módulos para la instalación en la laguna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bomba para Inflar el bote.</li> <li>- Remos.</li> <li>- Chalecos salva vidas e indumentaria impermeable.</li> <li>- Soga.</li> <li>- Ancla.</li> </ul>
Medición de Radón.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recipiente de HDPE 2.</li> <li>- Varilla de Acero de 2 pulgadas ( ) de largo.</li> <li>- Varillas de Fierro de 1.5 m de largo con terminaciones soldadas para unión entre piezas.</li> </ul>
Conteo de Trazas de Radón.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Detector LR-115.</li> <li>- Microscopio.</li> <li>- Sulfato de sodio.</li> <li>- Pinzas.</li> <li>- Guantes.</li> <li>- Solución de KOH preparada.</li> <li>- Vinagre y 1 L de agua destilada para lavado.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vasos de plástico cerrado con aluminio para almacenar los detectores.</li> </ul>
Recolección de Datos en la laguna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Computador.</li> <li>- Memoria flash.</li> <li>- Celulares con información meteorológica.</li> <li>- GPS.</li> <li>- Pluviómetro manual.</li> </ul>
Otros:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Metro.</li> <li>- Piola.</li> <li>- Nylon.</li> <li>- Marcador.</li> <li>- Desarmador.</li> <li>- Pesos.</li> <li>- Cinta.</li> </ul>

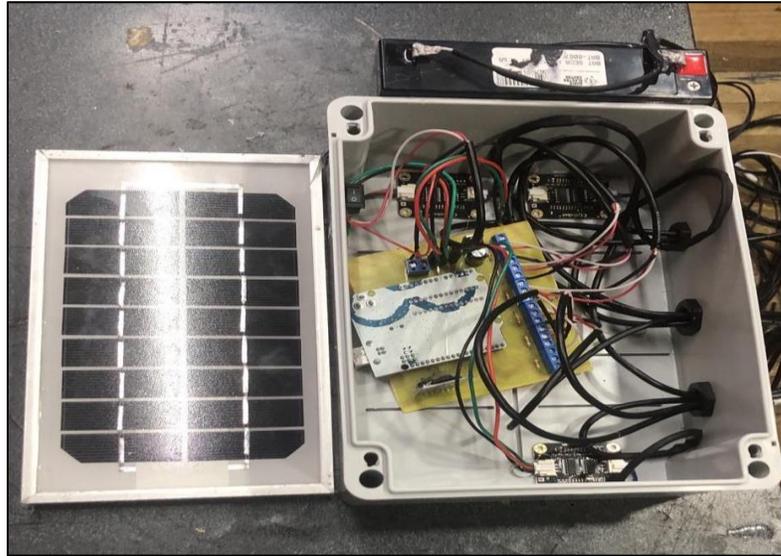
**Fuente:** Elaboración propia

### 3.5 Metodología

En referencia al procedimiento metodológico para la ejecución de nuestro proyecto se lo estructuró en fases, teniendo cada una un proceso para la recolección de los valores de conductividad eléctrica y temperatura como la concentración de radón en la laguna. Se debe hacer mención que, para la toma de los valores de concentraciones de temperatura y conductividad eléctrica presentes en la laguna, se diseñaron y se construyeron equipos especialmente para las mediciones de las concentraciones de conductividad eléctrica y temperatura en la laguna de Guabizhún (ver figura 6). que detecta anomalías especialmente en el cuerpo de agua, y emite señales en respuesta a los sensores de conductividad y temperatura instalados en el sistema Arduino que recolecta y almacena las señales emitidas de los sensores.

**Figura 6**

*Modulo para el análisis de temperatura y conductividad eléctrica.*



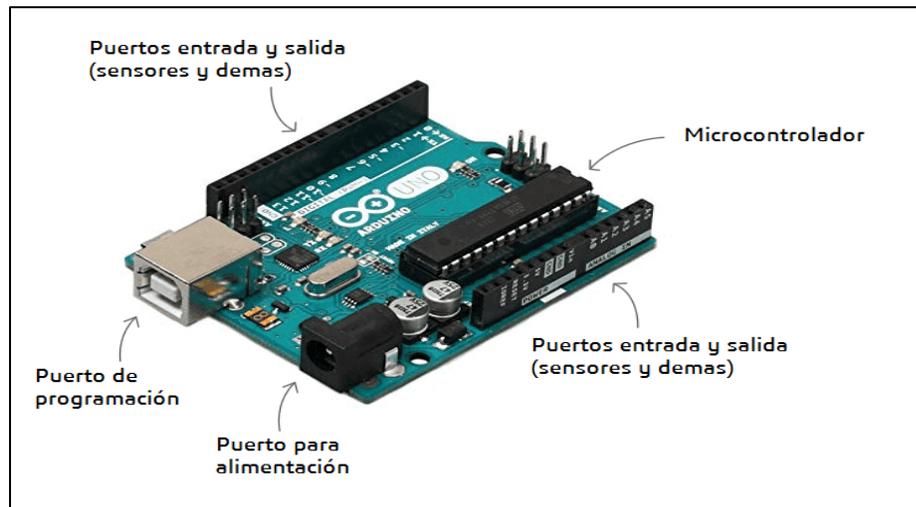
**Fuente:** Autores

### ***3.5.1 Montaje de la infraestructura***

Para el diseño y la construcción de la infraestructura de los módulos de temperatura y conductividad eléctrica se utilizó el sistema Arduino, el cual actúa como microcontrolador, y a partir de un software instalado en un dispositivo electrónico, nos ayuda a configurar los sistemas electrónicos, grabar instrucciones y controlarlo a partir de un lenguaje de programación que nos permite establecer conexiones entre el controlador y los diferentes sensores; actúa en si como el “cerebro” de un circuito.

**Figura 7**

*Estructura del sistema de Arduino.*

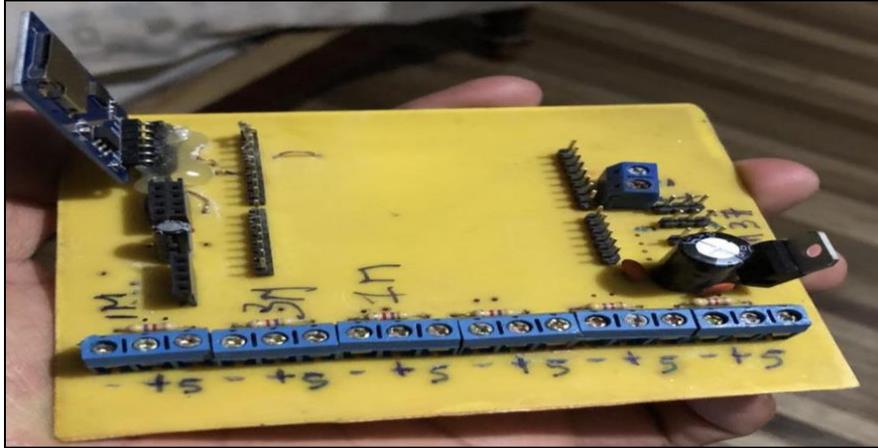


**Fuente:** Arduino CC.

El sistema de programación que se utiliza para crear el algoritmo correcto dentro del sistema del Arduino sirvió para darle un uso establecido a los sensores de conductividad eléctrica y sensores de temperatura que trabajaron en conjunto con el sistema para la recolección de datos en el tiempo que se establezca en la programación. Para poder establecer conexión con los pines de Arduino-sensores y otros circuitos eléctricos se desarrolló una placa (ver figura 8), que nos ayudó a poder establecer conexión con diferentes circuitos como lo es: para el almacenamiento de los datos, el encendido y apagado de modulo y un alimentador de batería para mantener el sistema de Arduino encendido y recolectando información.

## Figura 8

*Placa para la instalación de los sensores de conductividad eléctrica y temperatura en el sistema de Arduino.*



**Fuente:** Autores

El sistema de Arduino se le mantuvo encendido continuamente en el transcurso de nuestro proyecto y esto se logra mediante la utilización de una fuente de voltaje que sirva de alimentación eléctrica de forma continua, por ello se ha utilizado una batería de moto con características específicas de ser una batería seca 6v-10a , con una capacidad de 10 amperios-hora, recargable con un voltaje de carga de 7.45 (VDS) máximo, y tiene una dimensión de 15 x 9.4 x 4.9 cm, trabajando así continuamente la batería con rangos cortos de apagado o según lo establecido en la programación de toma de datos establecida previamente en el Arduino.

**Figura 9**

*Alimentación fotovoltaica de la batería que permite trabajar al Arduino continuamente.*



**Fuente:** Autores

Se debe considerar que la batería utilizada se encontraba conectada a un panel solar, esto para mantener la batería en continuo trabajo y no se descargue por completo. El panel solar va a aprovechar la radiación del sol ya que son módulos fotovoltaicos que llegan a captar energía proporcionada por el sol convirtiéndola en electricidad, por ello el panel está en la capacidad de producir energía a la batería de 6 voltios, abasteciéndola y permitiendo que trabaje continuamente.

### ***3.5.2 Sensores de conductividad eléctrica y sensores de temperatura***

En el presente proyecto se utilizaron sensores de conductividad eléctrica y temperatura. Los cuales se ilustran en la figura 10, que son dispositivos que nos ayudaron a recolectar información tanto de la temperatura del agua como la conducción eléctrica del agua y esto a su vez nos facilitaron recolectar información clave del comportamiento de la laguna de Guabizhun. Los sensores utilizados fueron conectados al sistema Arduino el cual nos ayudaron a guardar y recolectar datos. Los sensores de temperatura recolectaron datos en unidades de grados centígrados

(°C) mientras que los sensores de conductividad recolectaron datos en unidades de partes por millón (ppm).

### **Figura 10**

*Sensores de temperatura y conductividad eléctrica.*



**Fuente:** Autores

Los sensores utilizados fueron distribuidos a diferentes profundidades de la laguna de Guabizhun, distribuidos mediante un cable reforzado (ver figura 11), tomando en consideración la profundidad promedio de la laguna es de 7 metros, se distribuyeron los sensores de la siguiente manera; a 2, 4 y 7 metros de profundidad. Además, considerando el lecho de la laguna, se tomaron registros de la temperatura a un metro más de profundidad, en total utilizando 3 sensores de conductividad eléctrica y 6 sensores de temperatura conectados al sistema Arduino.

## **Figura 11**

*Cable reforzado para la distribución de los sensores a diferentes profundidades de la laguna.*



**Fuente:** Autores

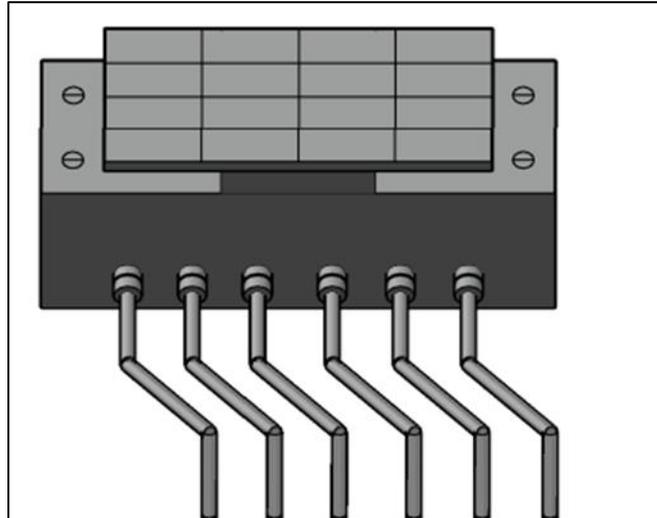
### ***3.5.3 Estructura del módulo para la protección del sistema eléctrico***

El módulo de recepción y almacenaje de la data (MORAD), tipo caja rectangular, está hecha de plástico y fue diseñado de tal manera que protege al sistema eléctrico de filtraciones de agua, este dispositivo se diseñó en CivilCAD. El morad cuenta con una tapa la cual está sujeta a la caja por cuatro tornillos plásticos. Entre la tapa y la caja se ubicó una goma para no permitir el paso del agua al interior de esta (ver figura 12).

El MORAD alberga en su interior las conexiones eléctricas y electrónicas, el sistema de almacenamiento de datos y la protección de nueve sensores conectados internamente con cables que salen hacia el exterior en dirección a la laguna.

## Ilustración 1

*Diseño de los MORADs en CivilCAD de 3D.*



**Fuente:** Autores

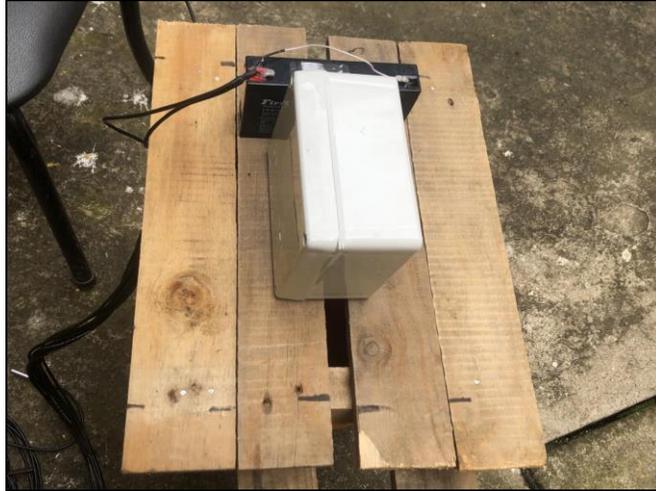
Este diseño lo convierte en módulo de uso libre ya que, gracias a su diseño se puede acoplar o aprovechar su estructura cuadrada, permitiendo ubicar el panel solar en la parte superior de la taca y así poder aprovechar al máximo la radiación solar en todo el transcurso del día. Este equipo Consta de 9 sensores conectados internamente con cables y conductos herméticos.

### ***3.5.4 Diseño de flotadores para los MORADs***

Para incorporar los MORADs en la laguna se diseñó con restos de madera y botellas de plástico reciclables, flotadores o se intentó acercarse a la función que realiza una balsa en el agua, la cual que nos ayudó a que los MORADs puedan flotar en el agua y soporten todo el peso que generan los cables al bajar toda la estructura a la laguna hasta su máxima profundidad.

## Figura 12

### *Diseño del sistema de flotación para los MORADs*



**Fuente:** Autores

El diseño de este sistema de flotación se encuentra estructurado por 4 fracciones de madera de 40 cm de largo por 5 cm de ancho, unidos por dos travesaños de madera de 30 cm de largo por 6 cm de ancho, 5 cilindros plásticos de 38 cm de largo por 10,8 cm de ancho (ver figura 14), y un pequeño espacio, que gracias al diseño del MORAD, nos permitió colocar los cables de los sensores que van en el agua en forma vertical. El equilibrio del sistema de detección y registro (SDR) de temperatura y conductividad eléctrica sobre el agua fue casi perfecto gracias a la distribución de los pesos de cada componente, siendo este resistente a una posible inmersión en el agua, a fuerte vientos, lluvia, granizo y oleajes que se forman con el viento, evitando así casi por completo que el módulo quede en contacto directo con el agua de la laguna.

**Figura 13**

*Módulo de flotación y estabilidad.*



**Fuente:** Autores

### ***3.5.5 Diseño de la sonda rígida de temperatura.***

El diseño de la sonda rígida de temperatura es de esencial importancia para el desarrollo del proyecto, se encontraba sujeta a él MORAD mediante una sonda flexible de temperatura que se ubicaba dentro de la sonda rígida y bajaba toda la estructura del perfil vertical de la laguna de Guabizhun hasta atravesar el lecho de esta.

**Figura 14**

*Diseño de la sonda rígida de temperatura*



**Fuente:** Autores

La estructura de la sonda rígida de temperatura consta de un tubo de hierro de 120 cm de largo por 4cm de ancho, varilla de hierro de 30 cm de largo por 2 cm de ancho y una correa “G” de 45 cm de largo por 8 cm de ancho. La forma final del diseño de la sonda rígida nos proporcionó la facilidad de incorporar tanto dentro del tubo de hierro los sensores de temperatura como a los lados de la correa “G”, peso extra que llegaba a generar una mayor fuerza al bajar el perfil vertical de laguna hasta atravesar el lecho de esta.

### **Figura 15**

*Peso incorporado en el diseño de la sonda rígida de temperatura.*

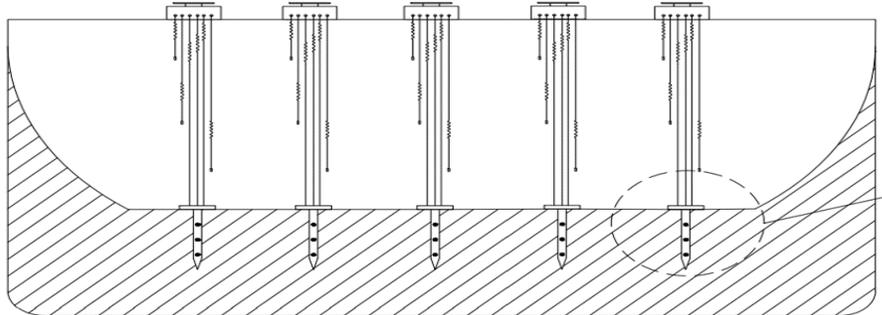


**Fuentes:** Autores

El peso incorporado en la sonda rígida de temperatura corresponde a dos pesos solidos de aproximadamente 10 kilos cada uno, envueltas en un saquillo de polipropileno. Finalmente, para poder tener un control de la sonda dentro del agua se lo aseguro con un cabo de 4 hebras  $\frac{3}{4}$ , que debido a su resistencia podía contener el peso total de la sonda rígida, la cual nos permitió tener un control de los metros incrustados en el agua de la sonda y su correcta posición para la toma de datos.

## Ilustración 2

*Incrustación de la sonda rígida de temperatura en el lecho de la laguna.*



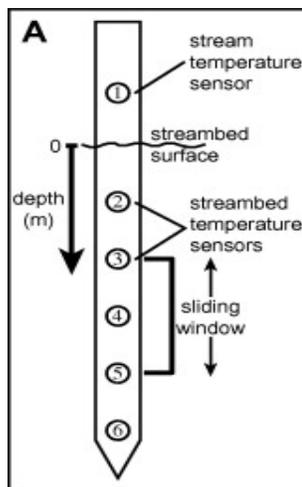
**Fuente:** Autores

### ***3.5.6 Muestreo de temperatura y conductividad eléctrica.***

Con el sistema de detección y registro (SDR), de temperatura y conductividad eléctrica contruidos y diseñados, se realizó mediciones de temperatura y conductividad eléctrica en función de los puntos de muestreo identificados con el GPS, respecto a la columna de agua donde se tomó mediciones por cada minuto durante un periodo de un mes, en cada punto de muestreo de acuerdo a lo descrito por Schmidt et al., (2008) y Xu et al., (2017).

**Figura 16**

*Equipamiento para la medición del perfil de temperatura.*



**Fuente:** (Gordon et al., 2012)

Los parámetros térmicos se determinó mediante la observación de campo de acuerdo a las pautas proporcionadas por Lapham, (1989), donde se tomó mediciones a distintas profundidades mediante sensores instalados en el MORAD y en la sonda rígida de temperatura los mismo que permanecieron sumergidos en la laguna e incrustados en el lecho de la misma. Por otro lado, se tomó también valores de conductividad eléctrica mediante la utilización de sensores instalados en el MORAD, con la diferencia que esta medición de los valores no se lo realizó en la profundidad de lecho, si no, solo en distintas profundidades de la laguna, que se dio según la distribución en partes iguales de todo el perfil vertical de la laguna hasta el lecho de esta. Esto nos ayudó a identificar la capacidad de conducir electricidad en el agua a distintas profundidades de la laguna y así mediante un trabajo en el campo verificar cuando existe anomalías o alteraciones en el agua de la laguna.

## Figura 17

*Muestreo de temperatura y conductividad eléctrica.*



**Fuente:** Autores

El muestreo de conductividad eléctrica y temperatura se desarrolló según el diseño final del (SID), de temperatura y conductividad que se encuentra estructurada por 4 fases; MORAD, módulo de flotación y estabilidad, sonda flexible de temperatura y conductividad eléctrica, y un sensor rígido de temperatura. El muestreo de los valores recolectados se generó en todo el perfil vertical de la laguna hasta la profundidad del lecho, para posterior a ello analizar posibles anomalías generadas dentro del agua de la laguna y así generar un análisis comparativo de los valores recolectados de conductividad eléctrica y temperatura.

Para la instalación del (SDR) de temperatura y conductividad eléctrica se consideró también, el traslado de cada uno de los (SDR) en la laguna, para ello se utilizó un bote inflable con capacidad de aguante promedio de 1 tonelada (ver figura 18), el cual se encuentra estructurado también por chalecos salvavidas para la protección de posibles caídas en el agua y dos remos para

poderse movilizarse en el agua, todo el equipo utilizado para el trabajo en el campo es armable de fácil movilización en cualquier medio de transporte.

### **Figura 18**

*Método de la movilización de los SDR de temperatura y conductividad eléctrica.*



**Fuente:** Autores

El traslado de los SDR, de temperatura y conductividad eléctrica dentro de la laguna se dio de forma homogénea (ver figura 19), teniendo en cuenta todo el sistema instado en el MORAD, se distribuyó en todo el perfil vertical de la laguna. los sensores de conductividad eléctrica y temperatura se encontraron distribuidos de forma igualitaria en todo el perfil vertical y en la profundidad del lecho introducidos por la sonda rígida de temperatura a un metro más. La estabilidad del (SDR), en la instalación se generó en base a los módulos de flotación y estabilidad que presenta una estructura rectangular, lo cual nos permitió ubicar a lado de MORAD, la batería

de 6 voltios, el panel solar y mantener todo el (SDR), seguro al no quedar expuesto en una relación directa con el agua de la laguna.

**Figura 19**

*Diseño final del SDR de temperatura y conductividad eléctrica.*

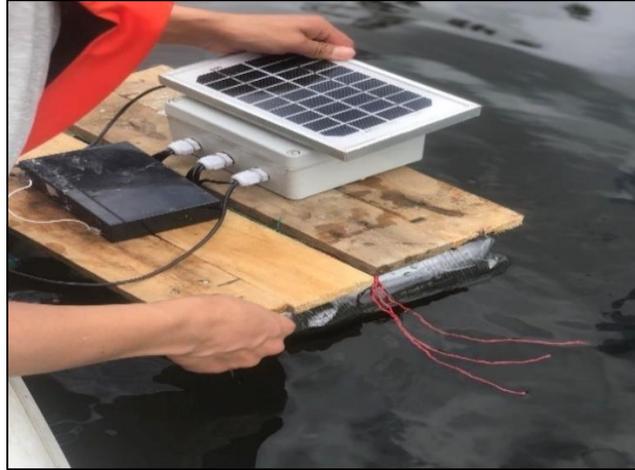


**Fuente:** Autores

El diseño de los módulos de flotación y estabilidad nos permitió, además soportar el peso generado por los sensores de los MORAD que baja toda la estructura vertical de la laguna y la sonda rígida de temperatura. El peso generado del SDR, nos ayudó a tener equilibrio en el punto de muestreo marcado debido a que genero fricción desde la epilimnion con los MORAD hasta la profundidad del lecho con la incrustación de la sonda rígida. Finalmente, todo el peso fue compensado y equilibrado con la incorporación en la base de los módulos de flotación y estabilidad de cilindros plásticos evitando así posibles hundimientos en la laguna de cada uno de los SDR de temperatura y conductividad eléctrica.

## Figura 20

*Instalación de los SDR en la laguna de Guabizhun.*



**Fuente:** Autores

Finalmente se debe considerar también, el mantenimiento y la verificación del correcto funcionamiento de los de los sensores instalados al interior de los MORADs, por ello cada dos días se procedía a abrir la estructura de los MORADs, ya que era propenso a generarse en la interior humedad por la estructura hermética que presentaba o en otros casos por el calor generado por el funcionamiento del sistema eléctrico y a la alta radiación presentada en el lugar. Posterior a ello se procedió a la toma de data, que según la programación en Arduino se especificaba la recepción de datos cada 48 horas.

## **Figura 21**

*Control y mantenimiento de los MORADs.*



**Fuente:** Autores

### ***3.5.7 Análisis de datos de la temperatura y conductividad eléctrica***

El análisis de datos de la temperatura y conductividad eléctrica se realizó a partir del registro y detección de datos por los sensores en la laguna, que según la presencia relevante que presente cada parámetro en el agua se procedió a un análisis comparativo entre las variables obtenidas. En referencia a esto se procede a revisar los datos obtenidos por los módulos instalados en el perfil de la laguna de Guabizhun.

## Figura 22

*Toma de datos proporcionados por los MORADs incrustado en el perfil de agua.*



**Fuente:** Autores

Entre las herramientas usadas para el análisis de los datos obtenido en la laguna, se utiliza un desarmador para destornillar el ensamblaje del módulo que contiene una seguridad, la cual no permite la infiltración de agua dentro de los MORADs. Además, se utilizó un procesador (portátil) para recolectar los datos obtenidos que en base a la programación realizada en el sistema de Arduino mediante una tarjeta de memoria incorporada internamente en el sistema eléctrico. El (MORAD) realizó un análisis aproximado de cada 2 días comenzando desde el lunes hasta el viernes, se trabajó durante 4 semanas, dando como resultado un análisis de la laguna de un tiempo aproximado de un mes.

Sin embargo se debe considerar también, la precipitación o presencia de lluvia en el lugar de estudio, ya que, por la presencia de esta, puede llegar a generar anomalías considerables al llegar el agua lluvia por escorrentía a la laguna alterando así las características normales del agua.

El agua lluvia del lugar al tener un contacto directo con el suelo puede arrastrar varios químicos o contaminantes presentes en las misma llegando a generar anomalías fuertes en el parámetro de conductividad eléctrica.

### **Figura 23**

*Pluviómetro manual para identificar la presencia de lluvia en el lugar de estudio.*



**Fuente:** Autores

El análisis de la precipitación en el lugar se lo realiza mediante la instalación de un pluviómetro manual, que nos ayudara a saber si hubo presencia de agua ya sea en la madrugada, día, tarde o noche, esto se lo realiza mediante la instalación manual de una botella de plástico reciclable en el lugar de estudio ubicado específicamente en los alrededores de la laguna, en donde nos permitirá verificar si hubo o no presencia de lluvia en el lugar.

#### ***3.5.8 Método para la extracción de Rn-222 de la laguna***

Todas las muestras de agua se recolecto en valdes HDPE según sus siglas de inglés (High Density Polyethylene) también conocido como PEAD (Polietileno de Alta Densidad) de un galón, es un tipo de plástico conocido ampliamente por su relación resistencia-densidad, conteniendo así

una densidad mayor a la que presenta el gas radón. Los recipientes HDPE se estructura de una base cilíndrica plástica y una tapa circular que al unirlos sella por completo la muestra recolectada, evitando las salidas del gas radón y su desgasificación desde el traslado de la muestra hasta medir la concentración de este en el agua.

**Figura 24**

*Envases HDPE para recolección de agua en la laguna de Guabizhun.*

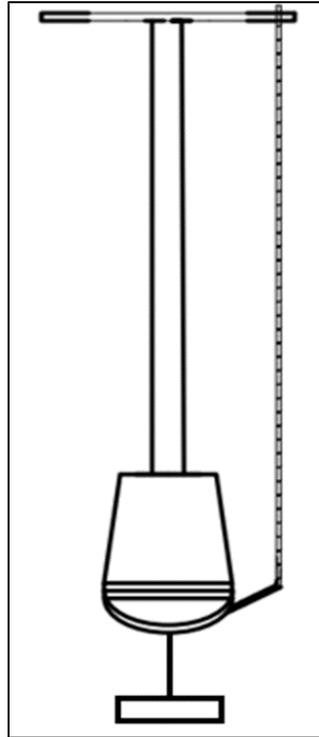


**Fuente:** Autores

El diseño del sistema de recolección de agua para la concentración de radón (SRACR) presente en el agua, se generó de forma manual mediante la utilización de herramientas que van a ser estructuradas y utilizadas de forma homogénea que consta de la siguiente estructura ; cilindro plástico de un galón, una soga 4 hebras  $\frac{3}{4}$  de 9 metros, varilla de hierro de 1,5 metros de largo por 4cm de ancho, con terminaciones soldadas de varias tuercas en roscables para la unión de las varillas y por ultimo dos pesos de 5 toneladas cada uno, ver en la ilustración 3.

### Ilustración 3

*Diseño del SRACR en la laguna.*



**Fuente:** Autores

El método de recolección de agua para la concentración de radón presente en la laguna se desarrolló mediante la utilización de la Ley de Boyle-Mariotte, que redacta que, a igual temperatura, si el volumen ocupado por un gas aumenta, su presión disminuye, en base a esto podemos describir que al ubicar el recipiente de forma volteada en la laguna se generará una mayor presión. La presencia de aire en el interior del recipiente, genera a tener una densidad mayor que la del agua de la laguna, debido a la presión atmosférica que mantuvo el recipiente de plástico antes de ingresar a la laguna.

## Figura 25

### *SRACR en la laguna*



**Fuente:** Autores

El SRACR en la laguna se desarrolló en base la ley de Boyle-Mariotte, su manejo en el campo de muestreo se generó en base a la presión generada en el recipiente, por ello se trató de generar una mayor presión a la que genera el recipiente en el agua. La presión mayor en el agua se logró con la incorporación del peso de 7 kilogramos sujetos a el recipiente cilíndrico de plástico, el mismo se va a mantener en el medio del recipiente y mediante la utilización de varillas de hierro de 1.50 metros en roscables se llegó a tener una presión mayor en el agua. Finalmente, el SRACR va a estar sujetado a una sogá de 4 hebras  $\frac{3}{4}$  al mismo, que cumple con la función tanto sujetar el peso como de extraer el recipiente una vez se consiga la profundidad requerida para la recolección de la muestra.

**Figura 26**

*SRACR en la laguna sin contaminar el medio o la muestra extraída.*



**Fuente:** Autores

Este método estructurado nos ayuda a extraer agua sin contaminar la muestra pura desde el punto de muestreo hasta la epilimnion, teniendo en cuenta que el agua jamás ingreso al recipiente mientras se sumergía, debido a la presión que ejerció el aire contenido en el recipiente volteado en el agua y en base a la estructura que se utilizó nos permitió que una vez llegue a la profundidad requerida se extraiga el agua sin que se contamine la muestra de agua.

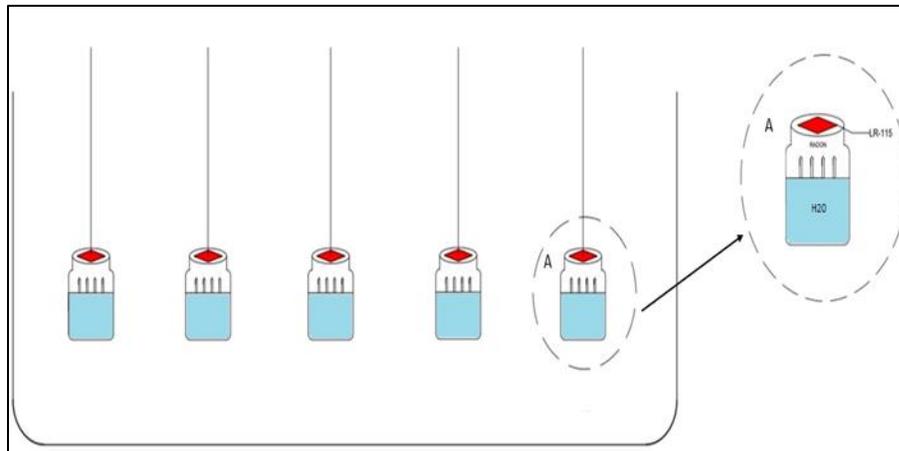
### ***3.5.9 Técnica de análisis para la medición de radón***

La técnica de análisis de las concentraciones de radón presente en el agua de la laguna de Guabizhun, se basa en la exposición de detectores pasivos LR-115 a las partículas alfa emitidas por el radio emanado de las muestras de agua. Como la vida media del  $^{222}\text{Rn}$  es de 3,82 días, el período de exposición elegido fue de 30 días, durante los cuales se descompone el 99,5% de los

núcleos de radón contenidos en las muestras de agua. Como se observa en la ilustración 4, el sistema de monitoreo de radón consta de un recipiente tipo taza estrechamente acoplados, en la tapa del recipiente contiene el dispositivo de detección LR-115 y el otro contiene el agua.

#### **Ilustración 4**

*Técnica para el análisis de las concentraciones de radón presentes en el agua.*



**Fuente:** Autores

Entre las herramientas utilizadas para el análisis de radón en la laguna, es una regla para poder establecer una distancia entre el detector LR-115 y la muestra de agua recolectada, el detector se le ubico en la tapa circular de plástico (ver figura), así se intenta aprovechar la emisión del gas al máximo teniendo en consideración que la emisión no se da siempre de forma horizontal, si no la mayor parte de emisión de este gas se emite de forma vertical.

**Figura 27**

*Detector LR-115 para el análisis de la concentración de radón.*



**Fuente:** Autores

La detección de este gas se llevó a cabo con los recipientes circulares y cilíndricos de plástico sumamente bien acoplados y reforzados con cinta adhesiva para evitar la desgasificación del gas que se puede desarrollar cuando se encuentra expuesto directamente con la atmosfera. El análisis previo de la revelación de los detectores LR-115 se desarrolló en el laboratorio en un periodo de reposo de la muestra de agua recolectada de 30 días, luego de este periodo se contó las trazas de radón detectadas por el detector utilizado.

### **3.6 Análisis de los datos obtenido por los sensores de temperatura y CE**

Se observó la presencia de vacíos y valores erróneos entre los registros de varios equipos, tanto de los sensores de temperatura como de conductividad eléctrica y a pesar de que estos sensores están programados para la recolección de datos de 2 días de manera continua, existen períodos en que los equipos dejaron de registrar información, estos vacíos varían desde algunos minutos hasta una hora. Según Aparicio Mijares (1994), es frecuente que se encuentre en un registro datos faltantes para un cierto período, debido en su mayoría a fallas en el aparato registrador.

En cuanto a las series de datos de conductividad eléctrica que contienen pocos valores erróneos, dichas alteraciones se relacionan directamente a la toma de datos, en dicho caso aquel dato se descarta y realiza una interpolación lineal para rellenar el vacío que deja el dato erróneo o se correlaciona con datos similares a los anteriores si no existe mucha variación. Así mismo al identificar datos de temperatura y se encuentren vacíos mayores, en este caso al igual que lo anterior, se realizan correlaciones entre datos semejantes a aquella serie de datos erróneos encontrados, entonces si la correlación entre dichas series es aceptable, se pueden determinar los datos faltantes de la serie de datos puede ser remplazado por la anterior.

Una vez que los datos han sido corregidos de sus datos erróneos, se realiza el análisis estadístico de los mismos, donde se determinan las medidas de tendencia y variación que presenta cada uno de los datos recolectados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica. Los datos de medida de tendencia se realizan a una hora para ello se saca el promedio aritmético o media, de cada uno de los datos recolectados ya que los datos se encuentran a un minuto y para el mejor manejo de los datos obtenido se saca el promedio mediante la siguiente expresión:

**Ec.1**

$$\bar{y} = \frac{\sum_{t=1}^n y_i}{n}$$

Donde:

- $\bar{y}$ : Es el promedio de la muestra de datos recolectada
- $n$ : Es el número de datos recolecta por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica.

Una vez realizada el análisis estadístico, se realizarán las gráficas en base a la lectura de datos recolectados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica. Para las gráficas o resultados de radón se dará mediante el conteo de trazas del gas presentes en el detector LR-115 que son reveladas luego de un mes de estar en contacto con las muestras de agua recolectadas de la profundidad del lecho de la laguna, en base a lo dicho anteriormente el desarrolló de todas la graficas se realizaron con valores diarios que correspondiente a un período de un mes que va desde principios de mayo hasta finales de mayo del 2023. Finalmente, todos estas graficas van a reflejar la información obtenida de los datos registrado y recolectados en el agua de la laguna, para dar un previo análisis cuantificativo de los trazadores ambientales instalados e utilizados en toda la columna de agua de la laguna de Guabizhun para su previo análisis comparativo y la verificación de las alteraciones formadas dentro del cuerpo de agua.

## Capítulo 4: Resultados y Discusión

### 4.1 Registro de datos de los valores de temperatura y conductividad eléctrica

#### 4.1.1 *Temperatura y conductividad eléctrica en la columna de Agua de la laguna*

Los registros de temperatura y conductividad eléctrica gracias a los sensores utilizados se desarrollaron desde principios de mayo hasta finales de mayo del año 2023, dando un periodo de un mes de muestreo; estos sensores de temperatura y conductividad eléctrica van conforme al perfil vertical de la laguna distribuido en partes iguales desde la epilimnion hasta la profundidad del lecho.

Para mayor facilidad a los sensores se los ha organizado y nombrado de la siguiente forma:

- Temperatura en la epilimnion de la laguna: **TS**
- Temperatura en el nivel intermedio de la laguna: **TM**
- Temperatura en lo profundo de la laguna: **TP**
- Conductividad eléctrica en la epilimnion de la laguna: **CES**
- Conductividad eléctrica en el nivel intermedio de la laguna: **CEM**
- Conductividad eléctrica en lo profundo del lecho de la laguna: **CEP**

Además, se han utilizado 3 sensores de temperatura y conductividad eléctrica, en cada uno de los sistemas de detección y recolección de datos (SDRD), tomando en consideración los 5 puntos de muestreo y una programación de detección de datos de cada 2 días. Los puntos de muestreo en la recolección de datos fueron identificados como MORAD 1, 2, 3, 4 y 5.

**Tabla 4**

*Color para identificar los datos recolectados del sensor de temperatura y conductividad eléctrica.*

<b>Datos de Temperatura</b>	<b>Color de Identificación</b>	<b>Datos de conductividad eléctrica</b>	<b>Color de Identificación.</b>
TS		CES	
TM		CEM	
TP		CEP	

**Fuente:** Autores

#### ***4.1.2 Temperatura en la profundidad del lecho de la laguna***

Los registros de temperatura en el lecho de la laguna se datan de principios de mayo hasta finales de mayo del 2023; los sensores de temperatura están sujetos a una sonda rígida metálica colocada en el lecho de la laguna a un metro más de la profundidad máxima del cuerpo de agua de la laguna. Se registran datos de temperatura, según la distribución de cada sensor que fue de una separación de treinta centímetros cada sensor dando un total de la presencia de la distribución de tres sensores a lo largo de la sonda rígida metálica, de esta manera se tiene información de cómo varía la temperatura en la profundidad del lecho de la laguna. Para mayor facilidad a los sensores se los ha organizado y nombrado de la siguiente forma:

- Temperatura en el profundo del lecho 1: **TP1L1**
- Temperatura en el profundo del lecho 2: **TP2L2**
- Temperatura en el profundo del lecho 3: **TP3L3**

Además de los sensores de temperatura en el lecho de la laguna que están por debajo del nivel de la laguna, trabajaron en el mismo sistema de registro y detección de datos en la laguna de Guabizhun identificándolo en los 5 puntos de muestreo como MORAD 1, 2, 3, 4 y 5.

**Tabla 5**

*Color para identificar los datos recolectados del sensor de temperatura en el lecho.*

<b>Temperatura del lecho</b>	<b>Color de Identificación</b>
TP1L1	
TP2L2	
TP3L3	

**Fuente:** Autores

#### **4.2 Analisis de temperatura y conductividad eléctrica en la columna de agua y la profundidad del lecho.**

Para el análisis de los datos, correspondientes a la temperatura y conductividad eléctrica de las columnas de agua, se partió de la hipótesis de que el agua subterránea presenta mayor presencia de minerales, ya que contiene una amplia variedad de constituyentes químicos inorgánicos disueltos en diversas concentraciones, resultantes de interacciones químicas y bioquímicas entre el agua y los materiales geológicos (Sarath Prasanth et al., 2012), y que al momento de interactuar, desde el hipolimnion del lago, pudiera generar pequeñas perturbaciones del sedimento; ambas situaciones traerían como consecuencia el incremento de la conductividad eléctrica y probablemente la temperatura del hipolimnion.

Partiendo de lo antes expuesto hemos construido dos premisas para el análisis de los resultados de este trabajo.

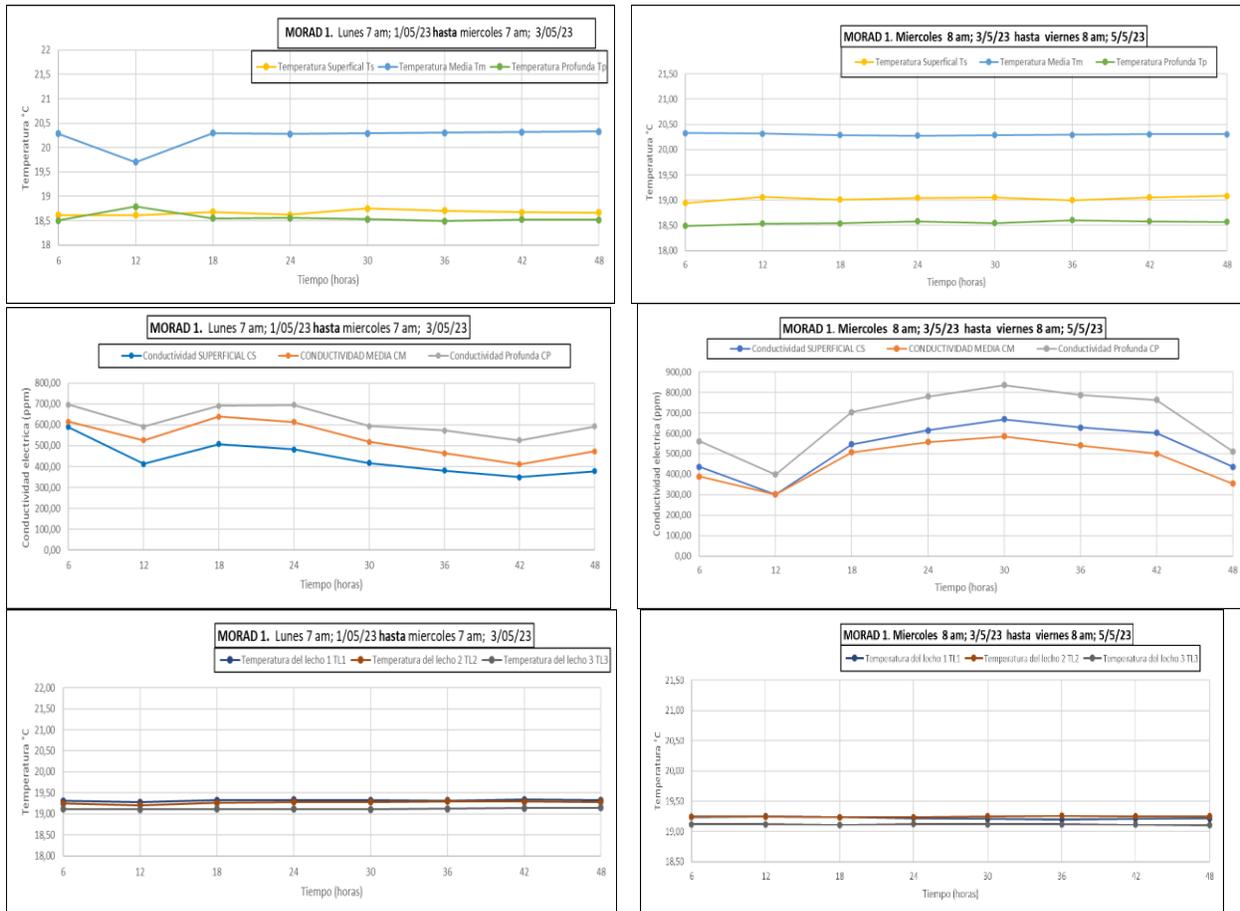
- Si existe una contribución de agua subterránea a la laguna: la temperatura aumenta en el hipolimnion en comparación con el metalimnion y de igual manera la conductividad eléctrica en el hipolimnion será mayor que el metalimnion o el metalimnion tendrá valores cercanos a él hipolimnion.
- Si no hay contribución de agua subterránea: La temperatura en el hipolimnion será menor que la del metalimnion y la conductividad eléctrica el hipolimnion va a ser menor a el metalimnion.

El análisis fue realizado por separado en cada punto de muestreo por un periodo de un mes.

Los datos registrados de la primera semana fueron desde el 1 de mayo hasta 5 de mayo del 2023, en el cuerpo de agua el cual se subdivide en epilimnion, metalimnion e hipolimnion y la temperatura en la profundidad del lecho.

## Figura 28

Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 1(semana 1).



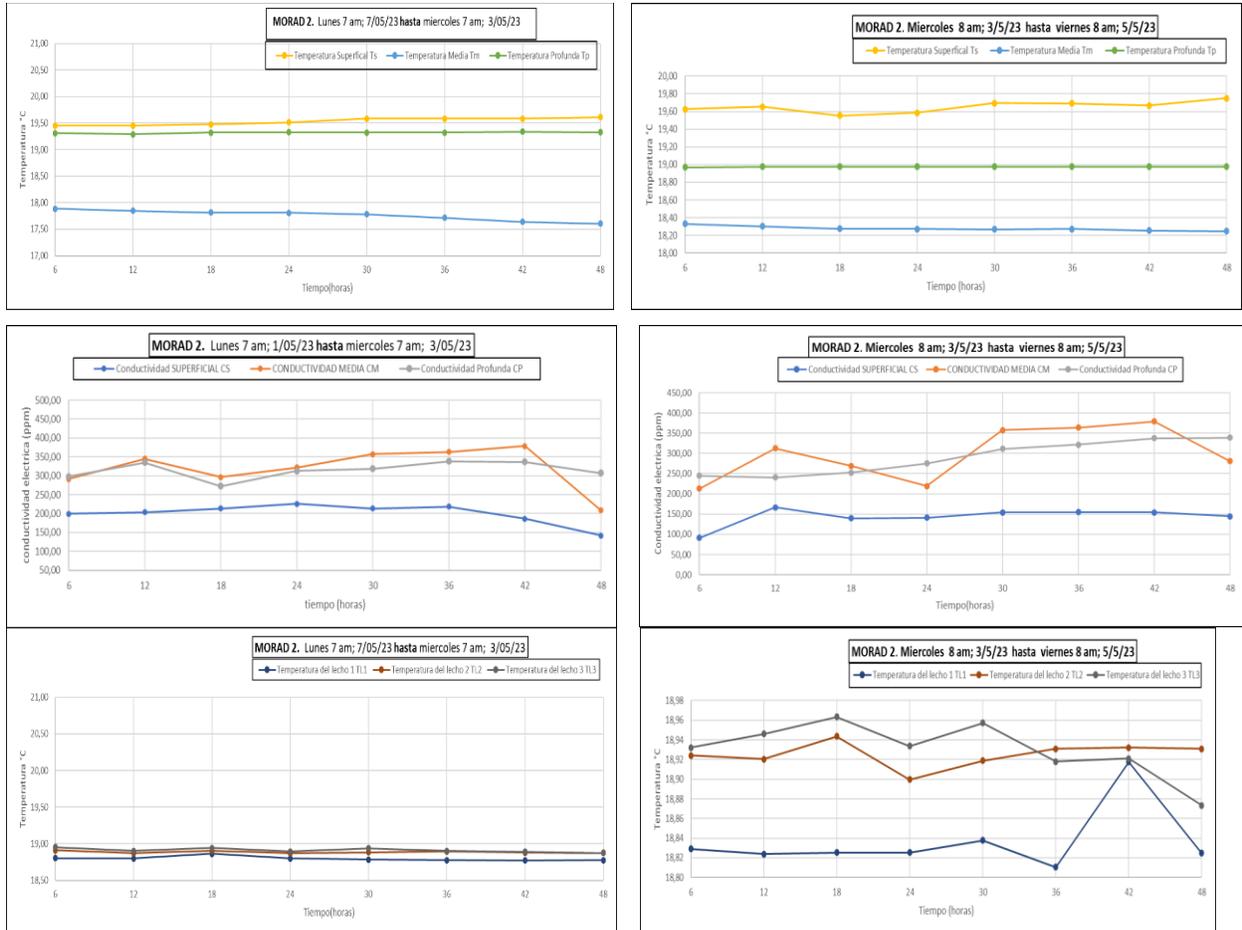
Fuente: Autor

En la figura 28, se muestra la variación de la temperatura y conductividad, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en donde se observa que, en los estratos de la laguna, el comportamiento de la temperatura en el punto 1 difiere enormemente en la superficie de la columna de agua en comparación con los puntos de muestreo adyacentes, y además que muestra una distribución irregular, al considerar que la

temperatura del metalimnion fue mayor que la del epilimnion e hipolimnion. Se decidió descartarlo de análisis general.

**Figura 29**

*Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 2 (semana 1).*



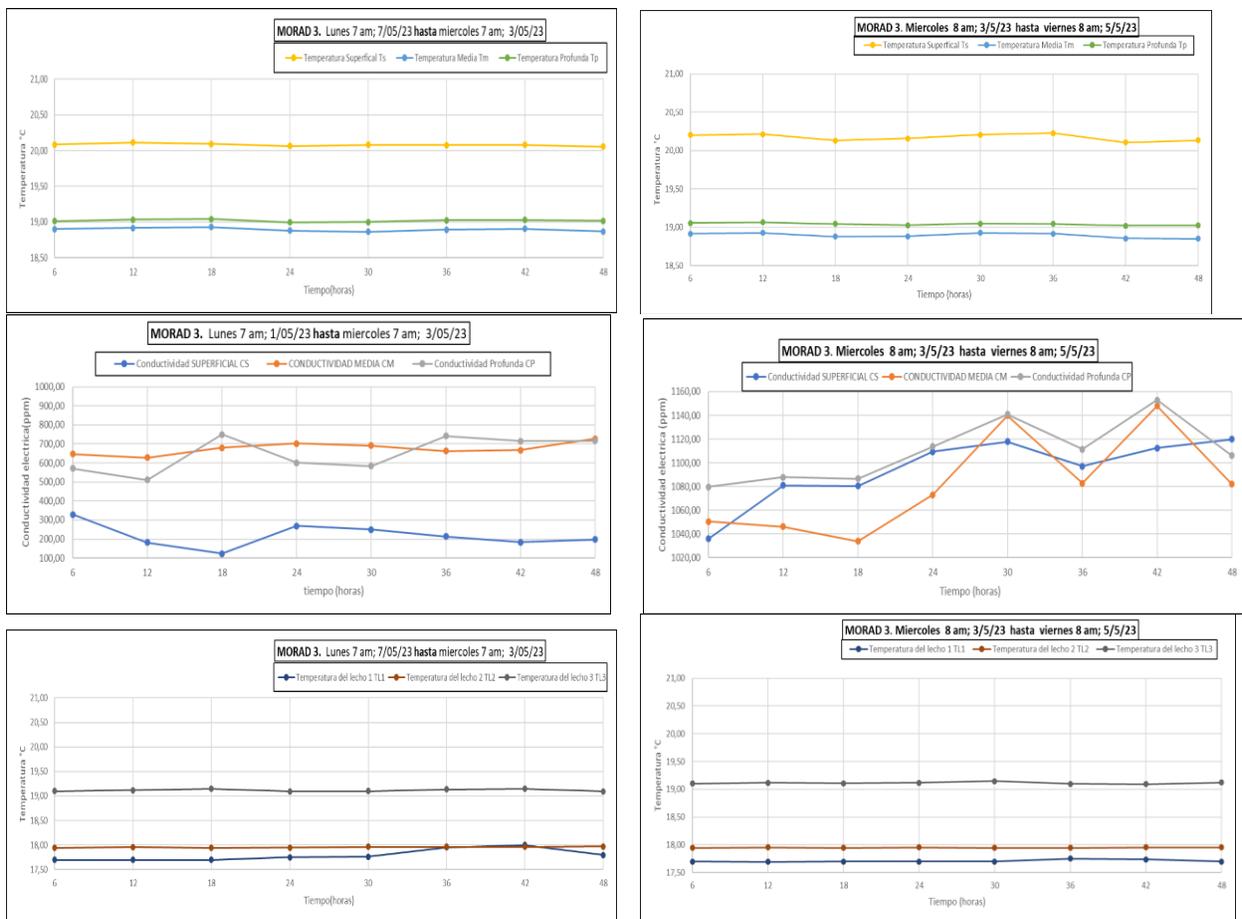
**Fuente:** Autor

En la figura 29 se muestra la variación de la temperatura y conductividad, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en el punto de muestreo número 2. Se observa que la temperatura del hipolimnion presenta valores similares a la de la epilimnion, con una diferencia entre ellas de  $1,5^{\circ}\text{C}$ , mientras que la diferencia

entre el epilimnion y el metalimnion es muy similar. Por otro lado, los valores de conductividad eléctrica en el hipolimnion tienden a presentar valores similares o mayores entre que el epilimnion y metalimnion, esta relación entre alta conductividad y temperatura llega a ser un indicativo de una posible contribución de flujo de agua subterránea a la laguna.

**Figura 30**

*Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 3(semana I).*



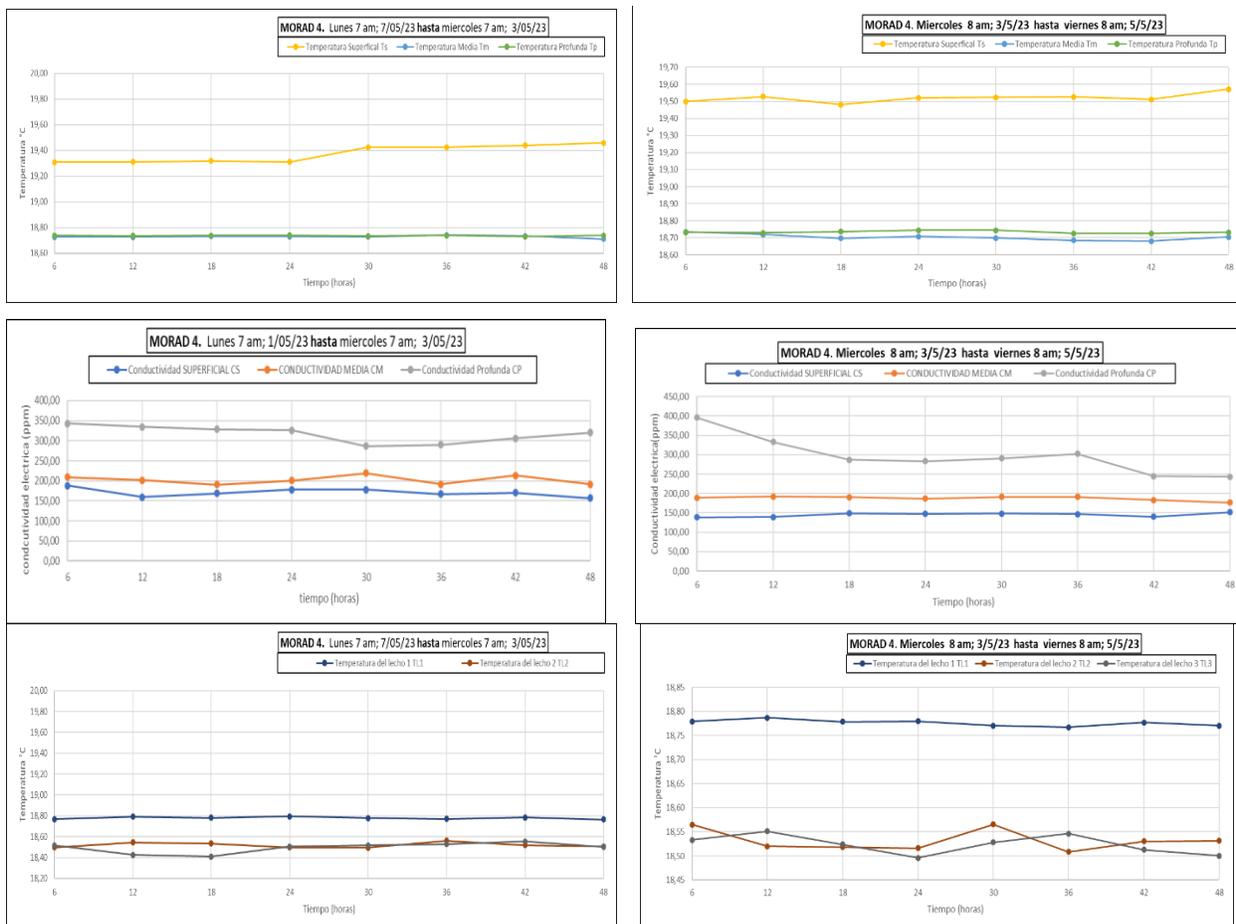
**Fuente:** Autor

En la figura 30, se muestra la variación de la temperatura y conductividad eléctrica, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en el punto de muestreo número 3, se observa que en día 1 y 2, la diferencia de temperatura

es de aproximadamente 0.2 °C entre el hipolimnion y metalimnion, de igual manera los valores de conductividad eléctrica mantiene una similitud aunque en un cierto periodo de tiempo, la conductividad eléctrica en el hipolimnion es mayor que la del metalimnion de aproximadamente 50 ppm , en cambio en el día 3 y 4 , la conductividad del hipolimnion llega a ser mayor que el metalimnion y epilimnion en toda la columna de agua , esta correlación de mayor temperatura y mayor conductividad eléctrica al igual que en la figura 29, llega a ser indicativo de una posible contribución de flujo de agua subterránea a la laguna.

**Figura 31**

*Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica, en el MORAD 4 (semana 1).*

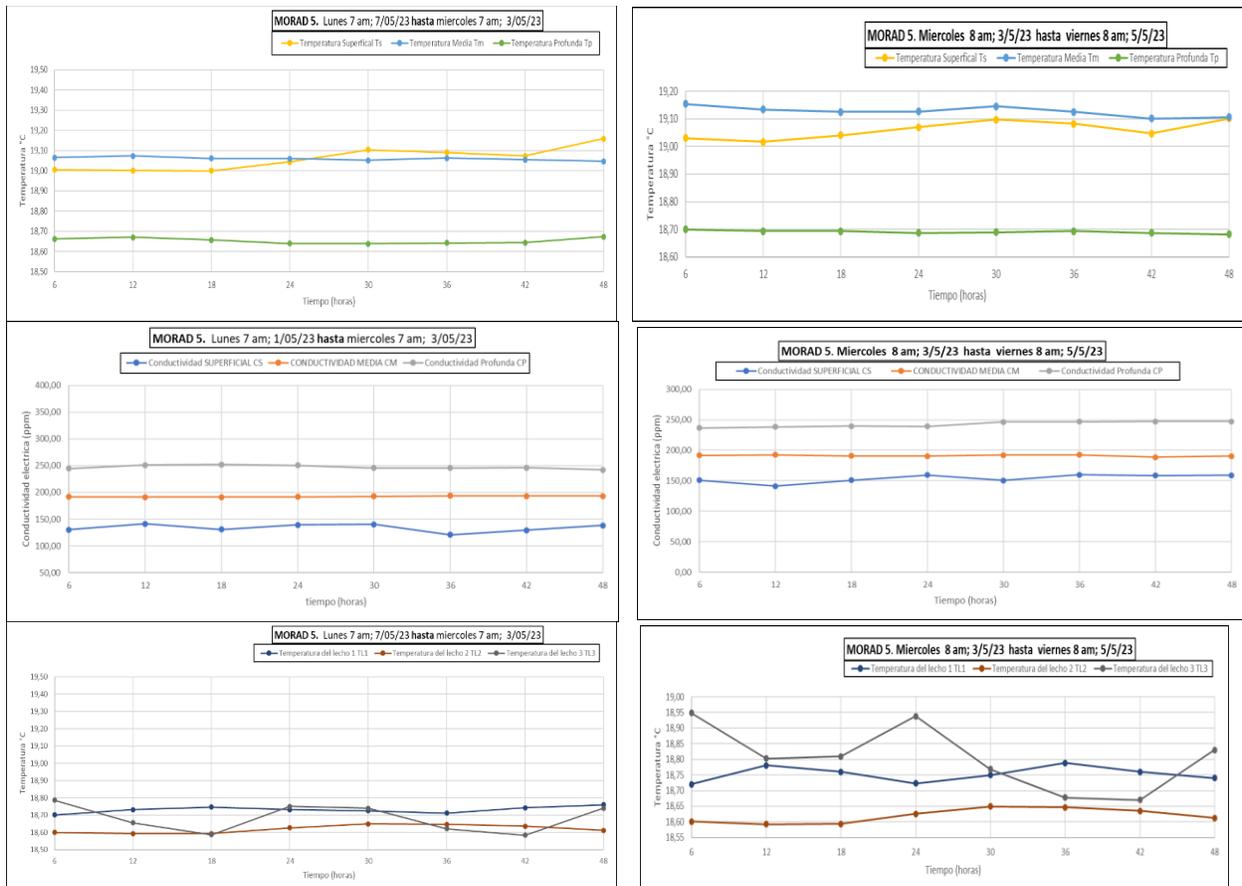


Fuente: Autor

En la figura 31, se muestra la variación de la temperatura y conductividad, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en el punto de muestreo número 4, se observa que la temperatura de la metalimnion e hipolimnion son muy similares y no presentan variación significativa, de igual manera ocurre con los valores de la conductividad eléctrica se encuentran similares y no presenta variación entre metalimnion e hipolimnion, siendo esto es un indicativo de que no existió una contribución de agua subterránea en este punto de muestreo.

**Figura 32**

*Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 5 (semana 1).*



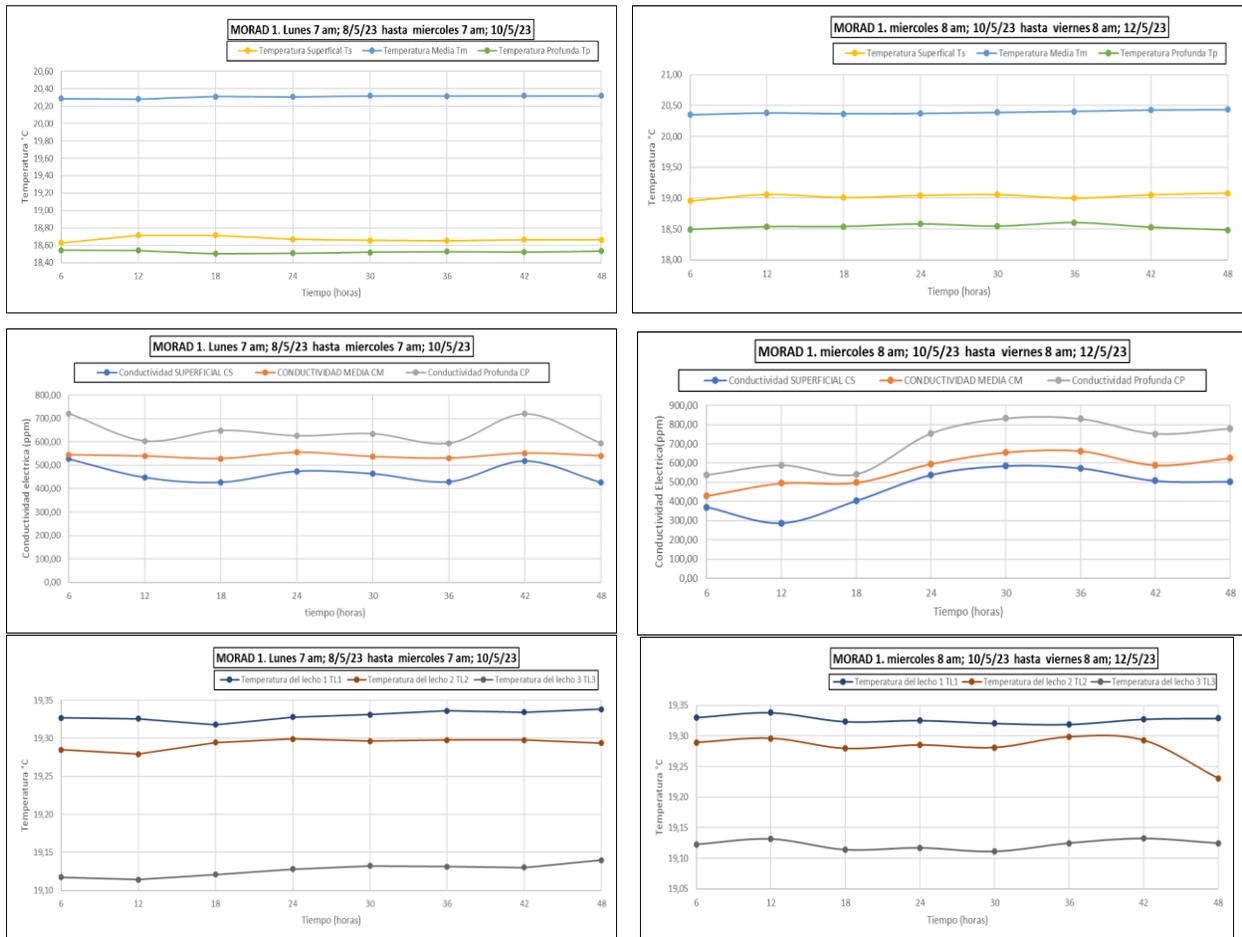
Fuente: Autor

En la figura 32, se muestra la variación de la temperatura y conductividad, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en el punto de muestreo número 5, se observa que la temperatura no presenta una variación relevante manteniéndose la temperatura del epilimnion mayor que los valores del metalimnion y el hipolimnion en la toda la columna, de igual manera ocurre en la conductividad eléctrica, en donde el metalimnion es mayor al hipolimnion en toda la semana de muestreo, esto es un indicativo al igual que el punto 4, que no existió una contribución de agua subterránea a la laguna en este punto de muestreo.

- Segunda semana de registro y recolección de datos del 8 al 10 de mayo del 2023

**Figura 33**

Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 1 (semana 2).



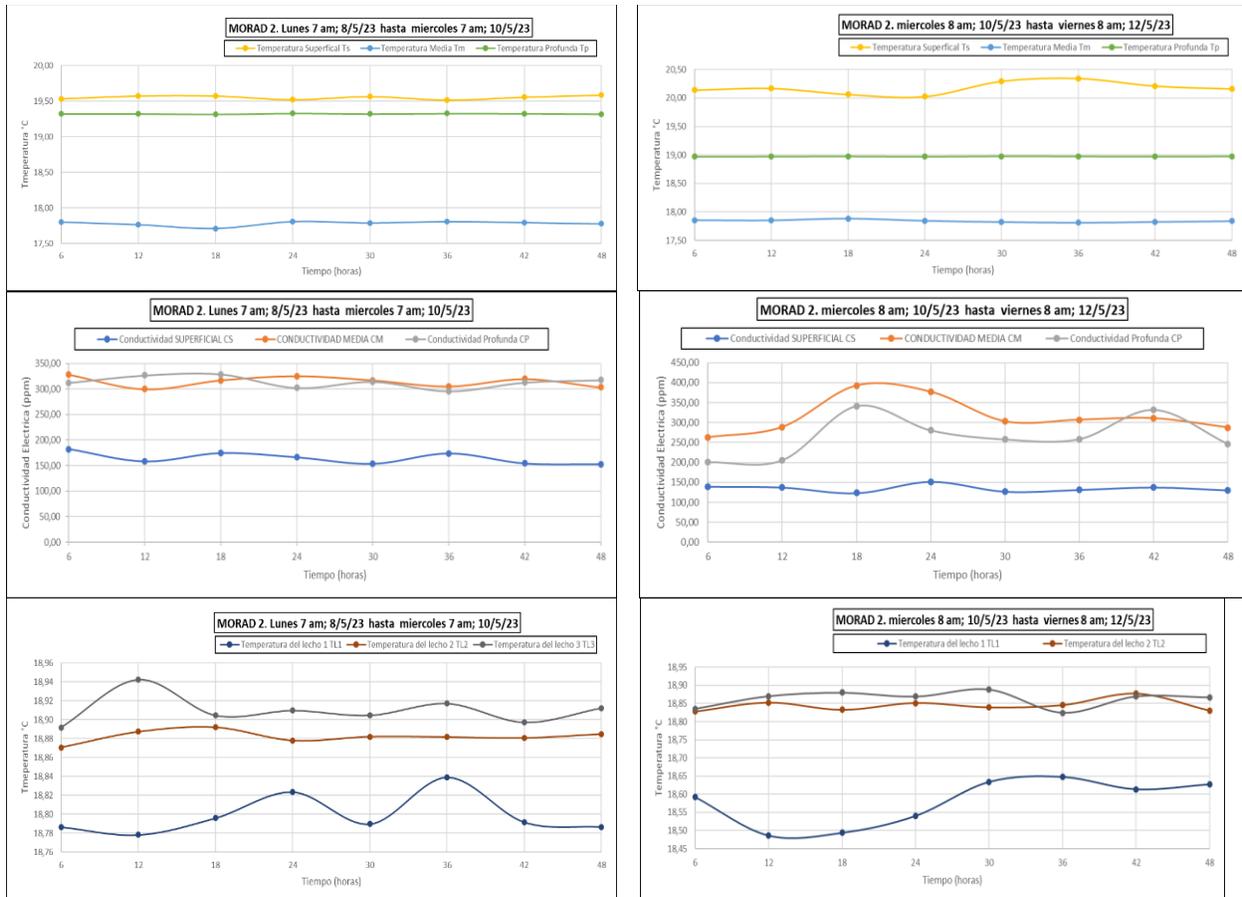
Fuente: Autor

En la figura 33, se muestra la variación de la temperatura y conductividad eléctrica, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en donde se observa el mismo comportamiento de la temperatura que la semana anterior en el punto 1, en donde difiere enormemente de los puntos de muestreo adyacentes, y además que

muestra una distribución irregular, al considerar que la temperatura del metalimnion fue mayor que la del epilimnion e hipolimnion. Se decidió descartarlo de análisis general.

### Figura 34

Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 2(semana 2).



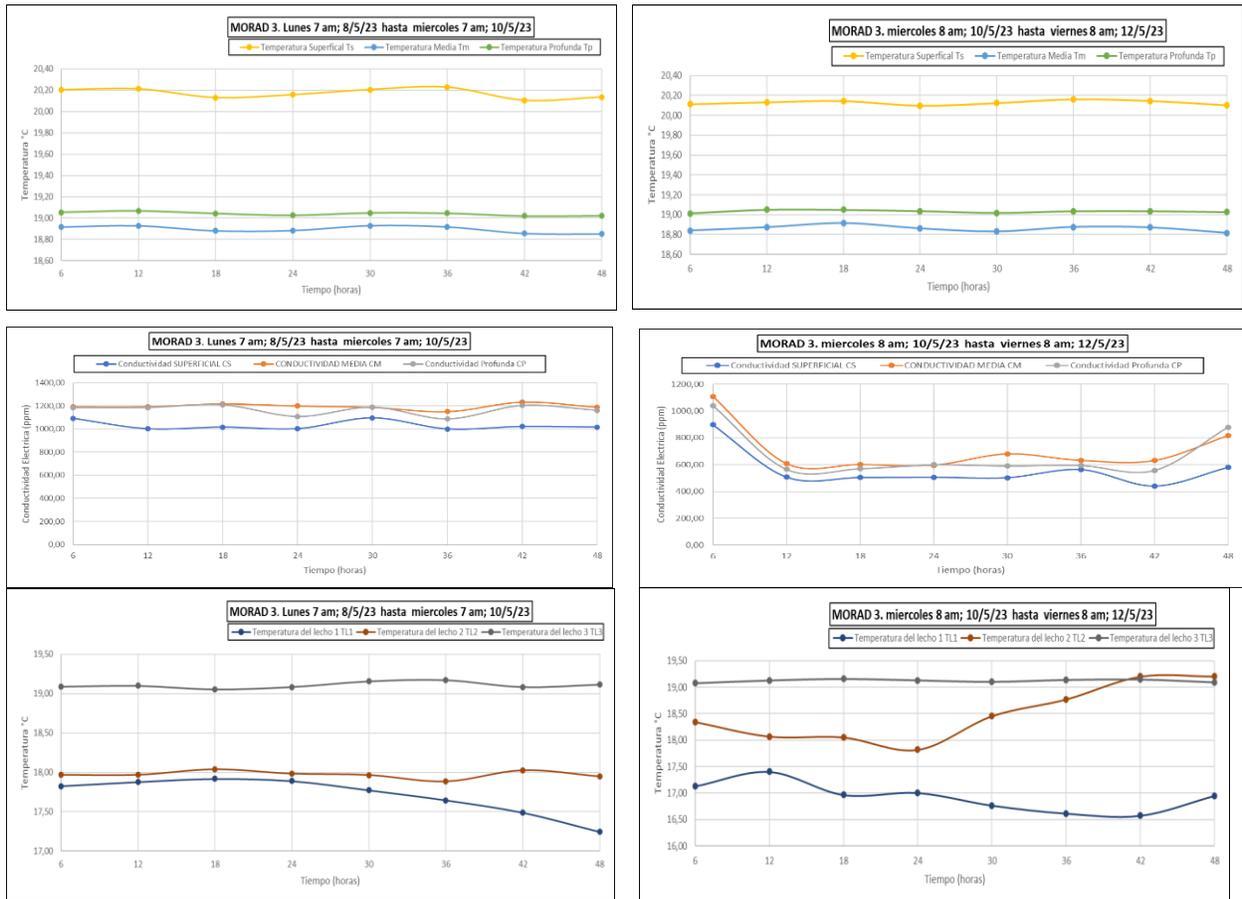
Fuente: Autor

En la figura 34, se muestra la variación de la temperatura y conductividad, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en el punto de muestreo número 2, se observa del lecho 3 que la temperatura del hipolimnion presenta valores cercanos a la del epilimnion, con una diferencia entre ellas de 1,5°C, mientras que la diferencia entre el epilimnion y el metalimnion es muy similar. Por otro lado, la conductividad eléctrica del

hipolimnion es mayor que el metalimnion, con una diferencia de 100ppm, en toda la columna de agua, esto es un indicativo que existió una posible contribución de agua subterránea a la laguna en este punto de muestreo.

**Figura 35**

*Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 3(semana 2).*



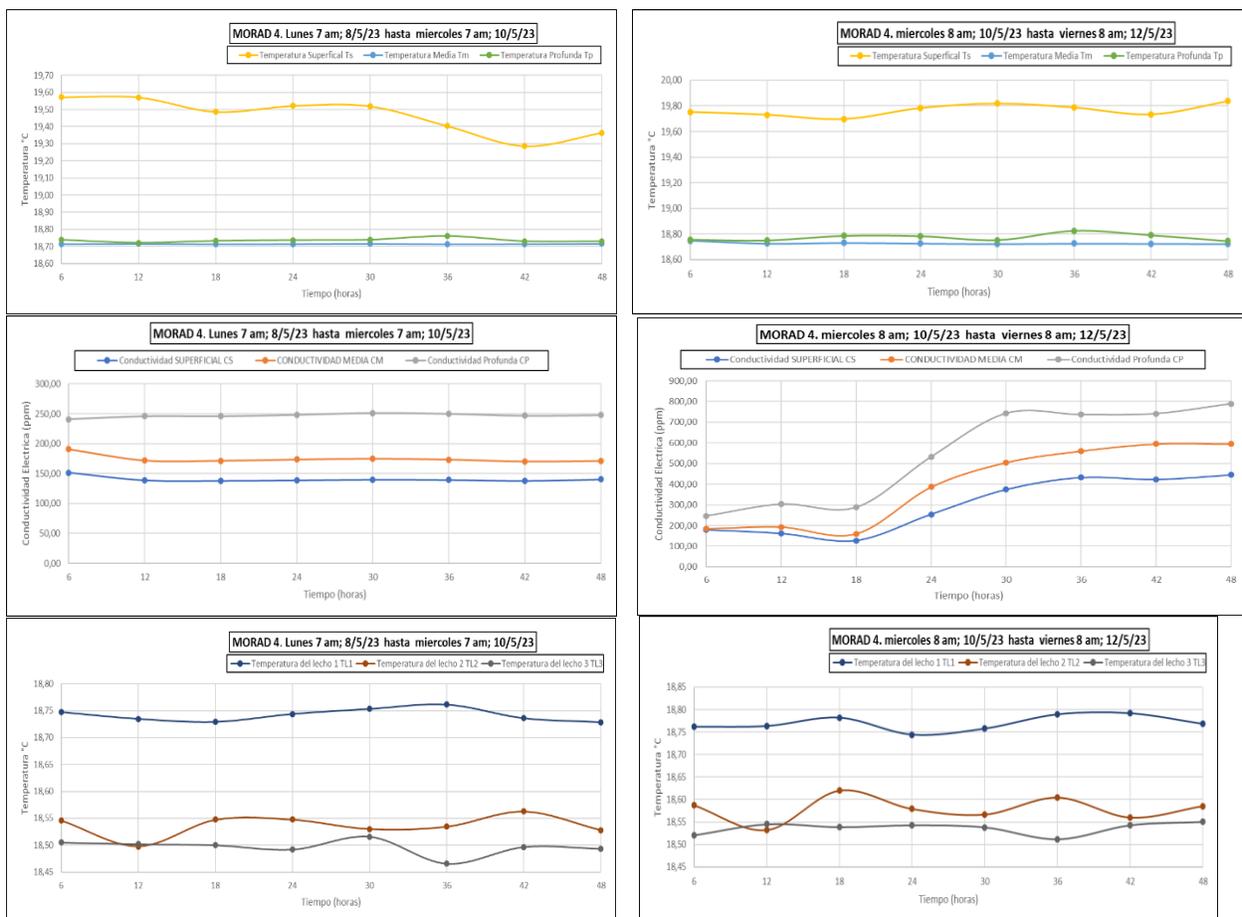
**Fuente:** Autor

En la figura 35, se muestra la variación de la temperatura y conductividad, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en el punto de muestreo número 3, se observa que existe una variación de temperatura en donde el

entre el hipolimnion es mayor que el metalimnion, con una diferencia aproximada de  $0.8^{\circ}\text{C}$ , de igual manera ocurre con la conductividad eléctrica una similitud en sus valores. Aunque en el día 1 y 2 llego a ser el hipolimnion menor que el metalimnion con una diferencia de 100ppm, pero luego a subir y mantener una similitud en los días 3 y 4, siendo similar el hipolimnion con el metalimnion, esto es un indicativo que existió una posible contribución de agua subterránea a la laguna en este punto de muestreo.

**Figura 36**

*Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 4 (semana 2).*

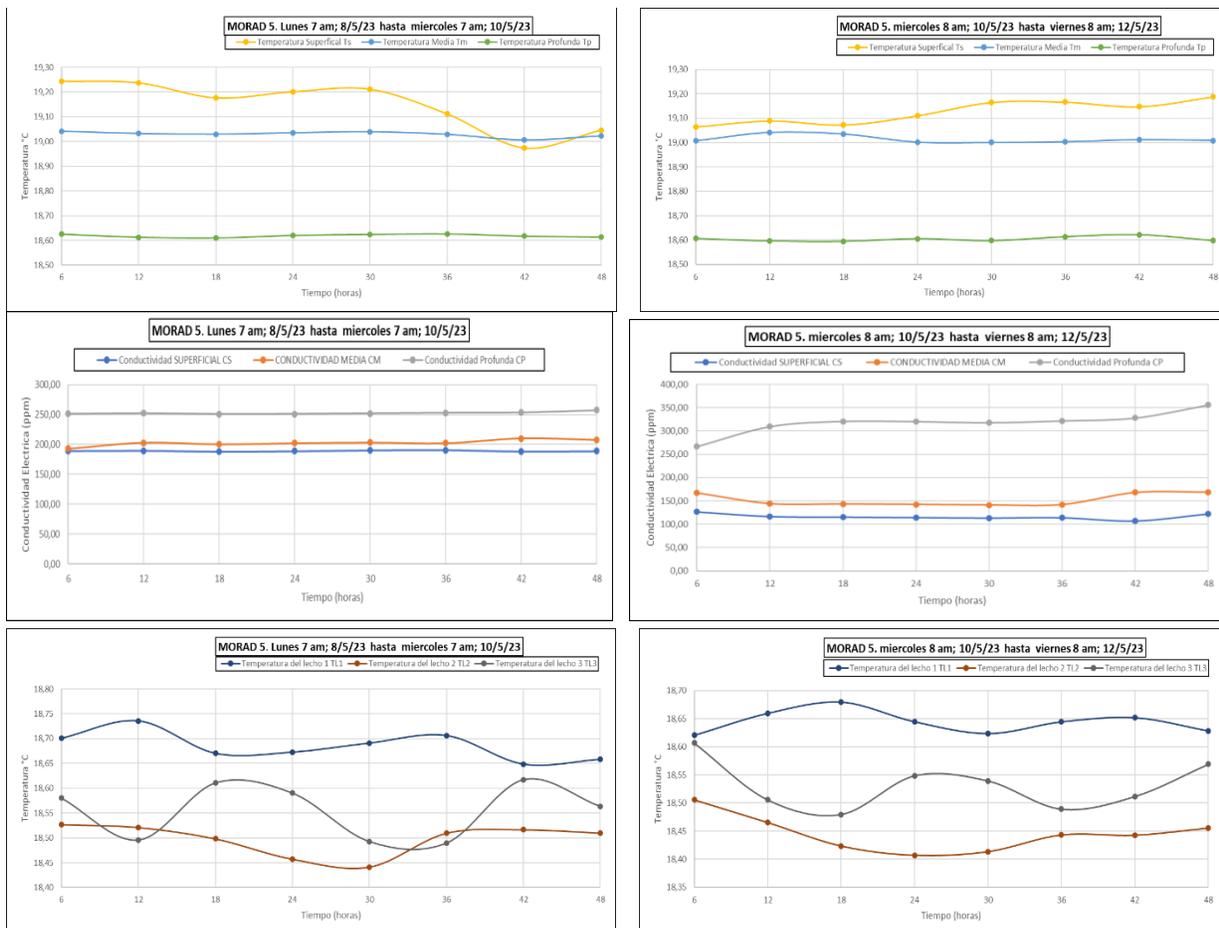


Fuente: Autor

En la figura 31, se muestra la variación de la temperatura y conductividad, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en el punto de muestreo número 4, se observa que la temperatura en la columna de agua el metalimnion e hipolimnion son muy similares y no presentan variación significativa, de igual manera ocurre con los valores de la conductividad eléctrica los valores se encuentran similares y no presenta variación entre metalimnion e hipolimnion, siendo esto un indicativo de que no existió una contribución de agua subterránea el agua de la laguna en este punto de muestreo.

**Figura 37**

*Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 5 (semana 2).*



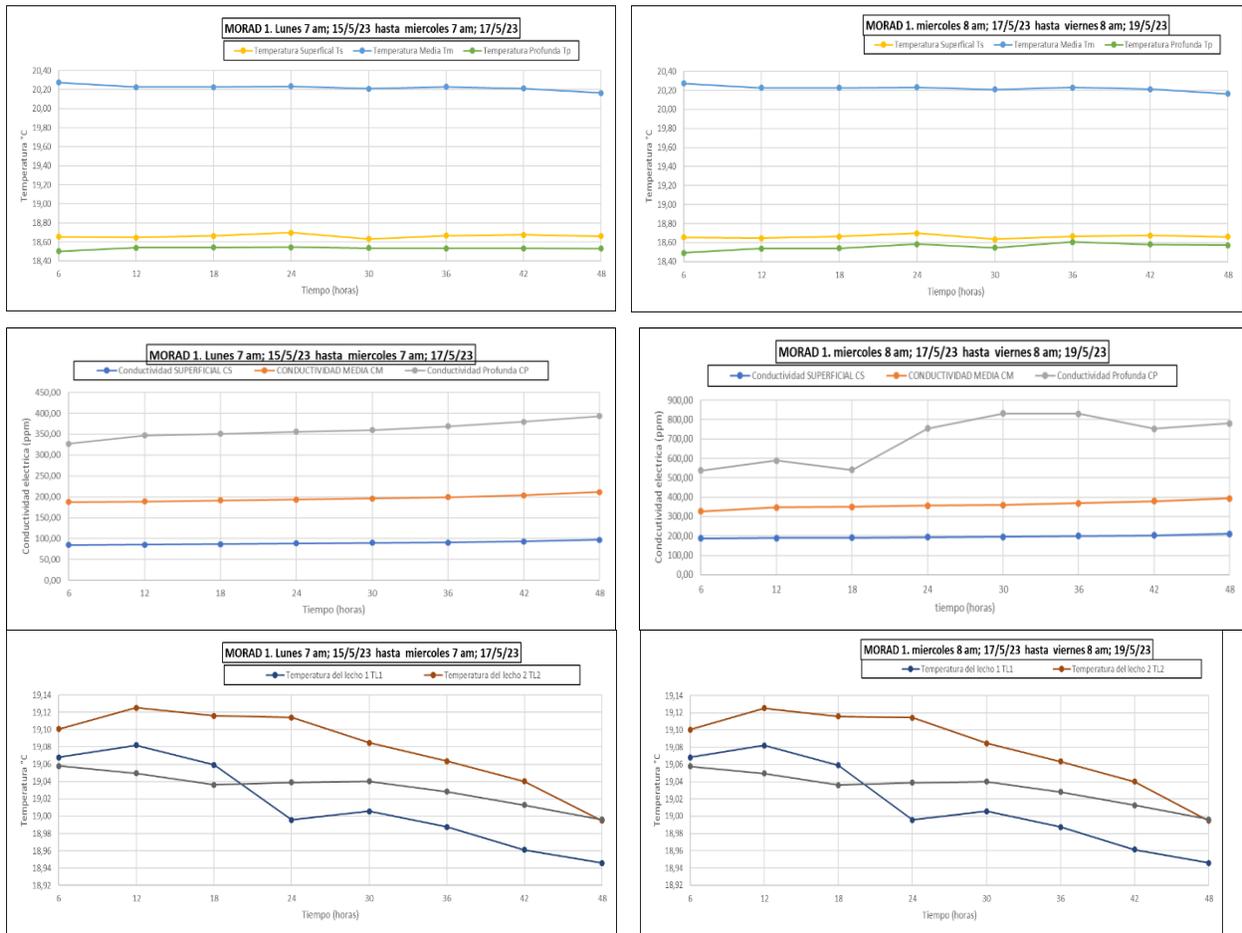
Fuente: Autor

En la figura 37, se muestra la variación de la temperatura y conductividad, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en el punto de muestreo número 5, se observa que la temperatura no presenta una variación relevante manteniéndose la temperatura del epilimnion mayor que los valores del metalimnion y el hipolimnion en la toda la columna, de igual manera ocurre en la conductividad eléctrica, en donde el metalimnion en el día 1 y 2 lleva ser similar al hipolimnion, en cambio en el día 4 y 5 el metalimnion es mayor que el hipolimnion con un rango de separación 100 ppm, esto es un indicativo al igual que el punto 4, que no existió una contribución de agua subterránea a la laguna en este punto de muestreo

- Tercera semana de registro y recolección de datos del 15 al 19 de mayo del 2023

**Figura 38**

Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD I (semana 3).



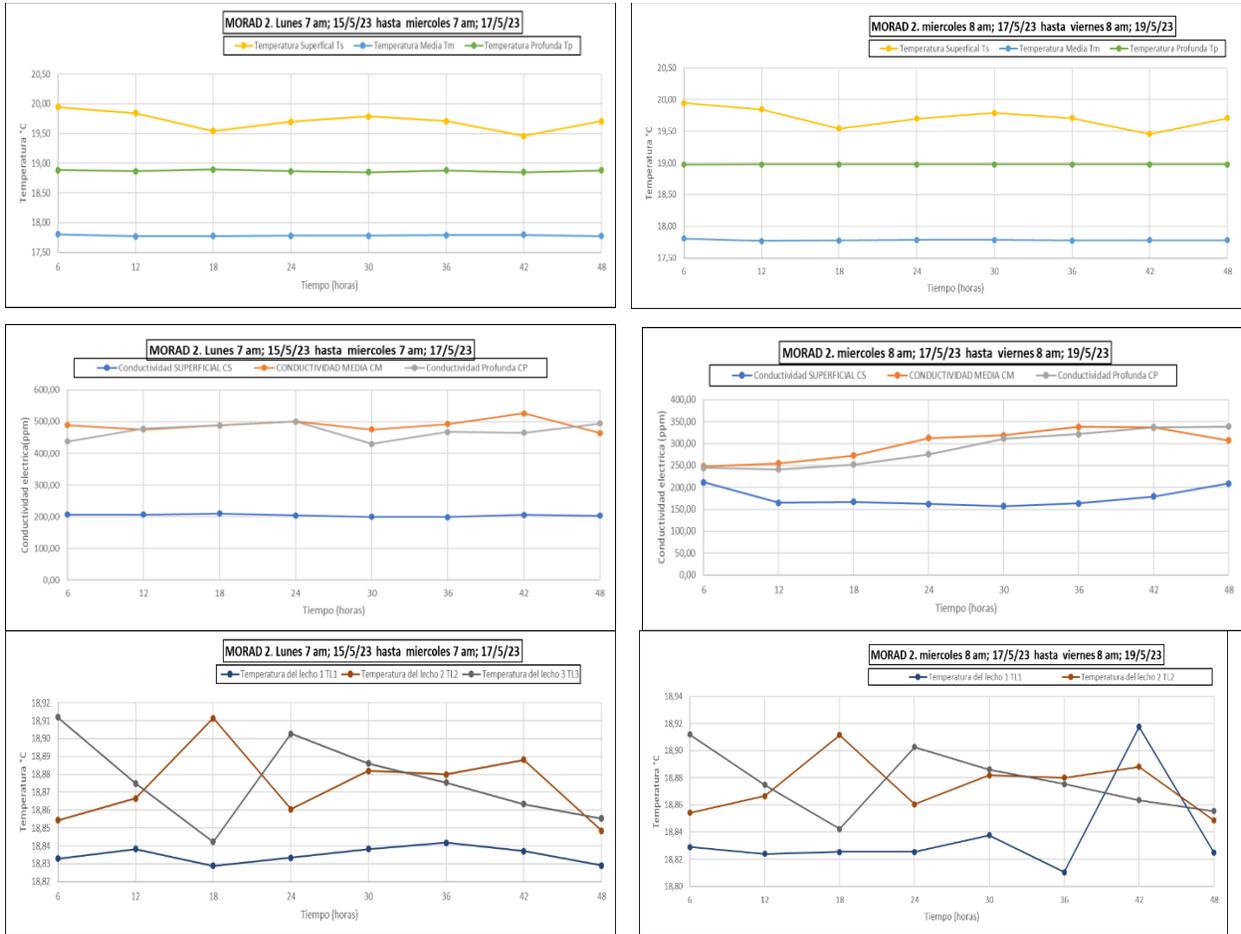
**Fuente:** Autor

En la figura 38, se muestra la variación de la temperatura y conductividad eléctrica, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en donde se observa el mismo comportamiento de la temperatura que las dos semanas anteriores en el punto 1, en donde difiere enormemente de los puntos de muestreo adyacentes, y

además que muestra una distribución irregular, al considerar que la temperatura del metalimnion fue mayor que la del epilimnion e hipolimnion. Se decidió descartarlo de análisis general.

**Figura 39**

*Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 2 (semana 3).*



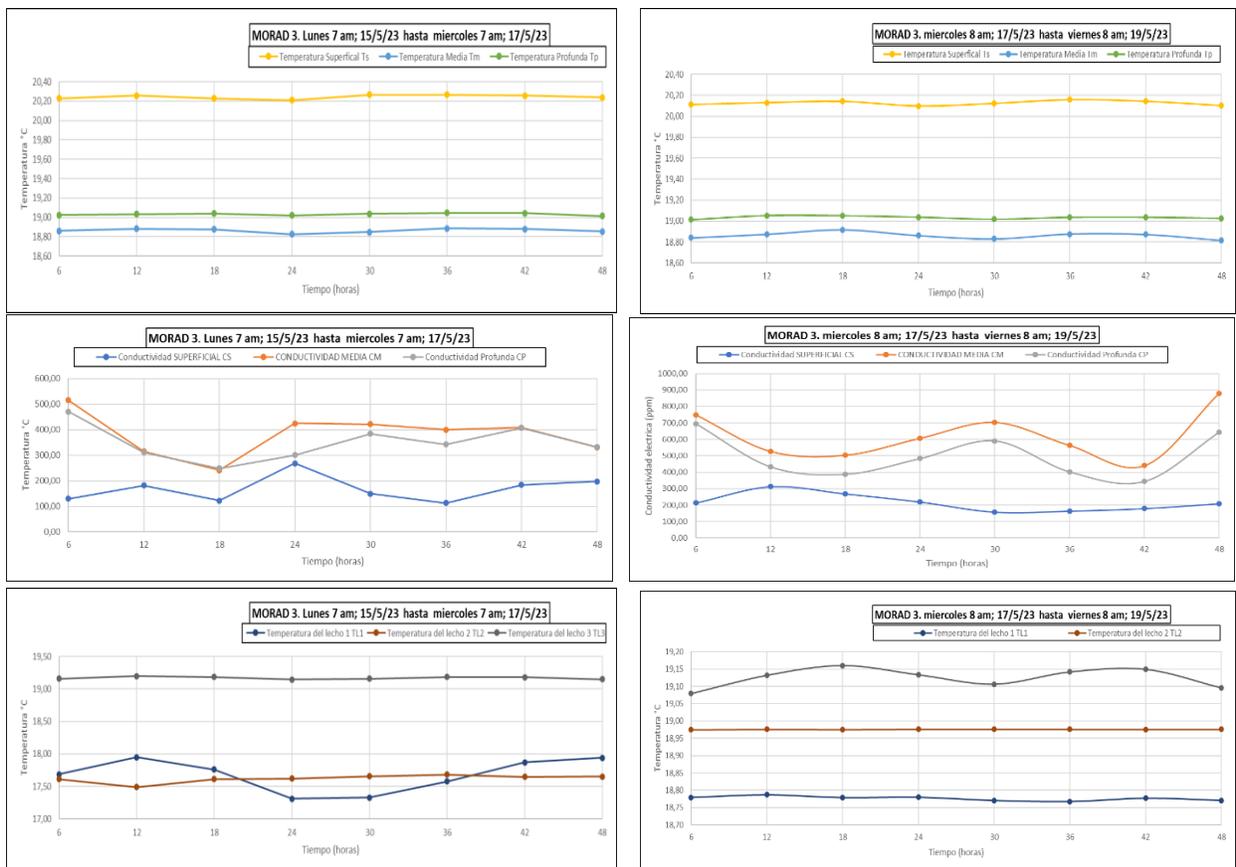
**Fuente:** Autor

En la figura 39, se muestra la variación de la temperatura y conductividad, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en el punto de muestreo número 2, se observa una variación significativa de temperatura siendo el hipolimnion mayor que el metalimnion con una diferencia entre ellas de 1,5 °C. Por otro lado, los

valores de conductividad eléctrica varían en el día 1 y 2 en donde el hipolimnion y el metalimnion es similar con una diferencia de 50 ppm, y en cambio en el día 3 y 4, la conductividad eléctrica de él hipolimnion es mayor que el metalimnion, esto es un indicativo que existió una contribución de agua subterránea a la laguna en este punto de muestreo

**Figura 40**

*Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 3 (semana 3).*



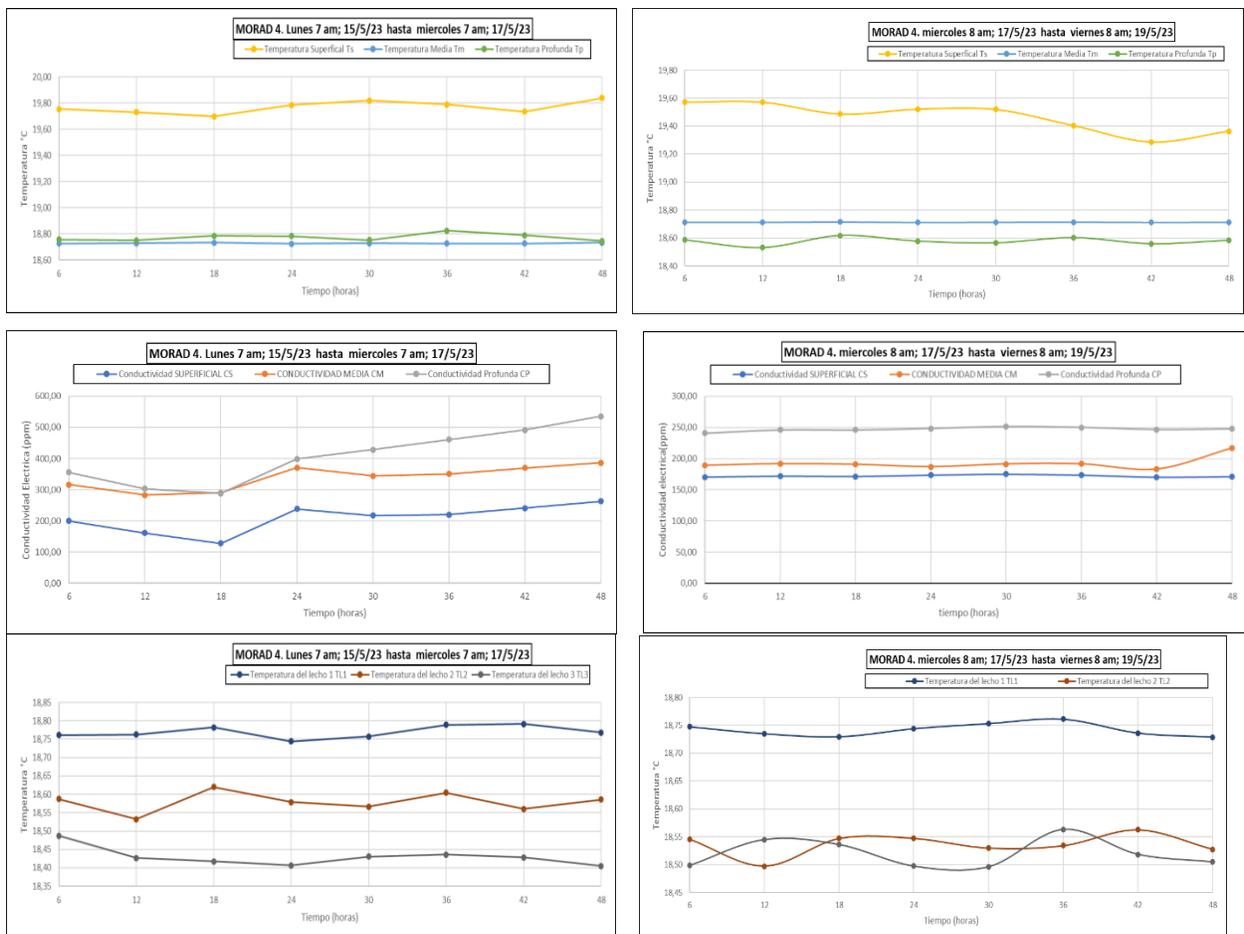
**Fuente:** Autor

En la figura 40, se muestra la variación de la temperatura y conductividad, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en el punto de muestreo número 3, se observa una variación de temperatura en donde el hipolimnion

es similar al metalimnion con una diferencia de  $0,3^{\circ}\text{C}$ , al igual ocurre con la conductividad eléctrica que muestra una similitud entre el metalimnion e hipolimnion y un valor mayor del hipolimnion que la del metalimnion de 40ppm, esto es un indicativo que existió una contribución de agua subterránea a la laguna en este punto de muestreo.

**Figura 41**

*Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 4 (semana 3).*



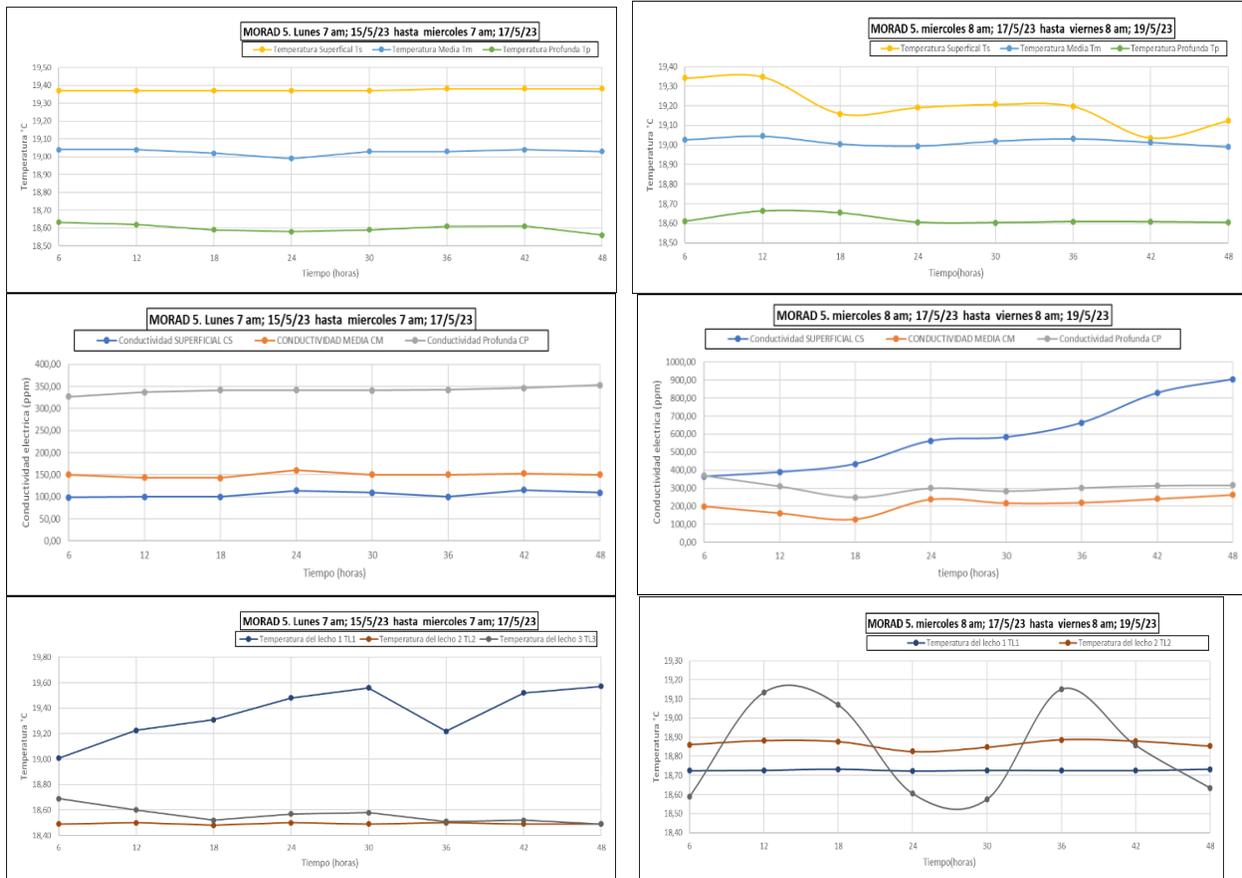
**Fuente:** Autor

En la figura 41, se muestra la variación de la temperatura y conductividad, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en

el punto de muestreo número 4, se observa que existe una variación de temperatura en el día 1 y 2 donde el hipolimnion y el metalimnion llega a ser similares, en cambio en el día 3 y 4 la temperatura del hipolimnion llega a ser menor que la del metalimnion con un diferenciante de cada una de ella de 20 °C. Por otro lado, la conductividad eléctrica al igual que la temperatura llega a tener el mismo comportamiento siendo en el día 1 y 2, en donde mantiene una similitud con una diferencia de 10ppm, pero en los días 3 y 4 la conductividad baja y el hipolimnion llega a ser menor que el metalimnion, al no mantener una variación continua en toda la columna de agua en la temperatura y la conductividad eléctrica, se asocia a que no existió en este punto de muestreo una contribución de agua subterránea el agua de la laguna.

**Figura 42**

*Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 5 (semana 3).*



**Fuente:** Autor

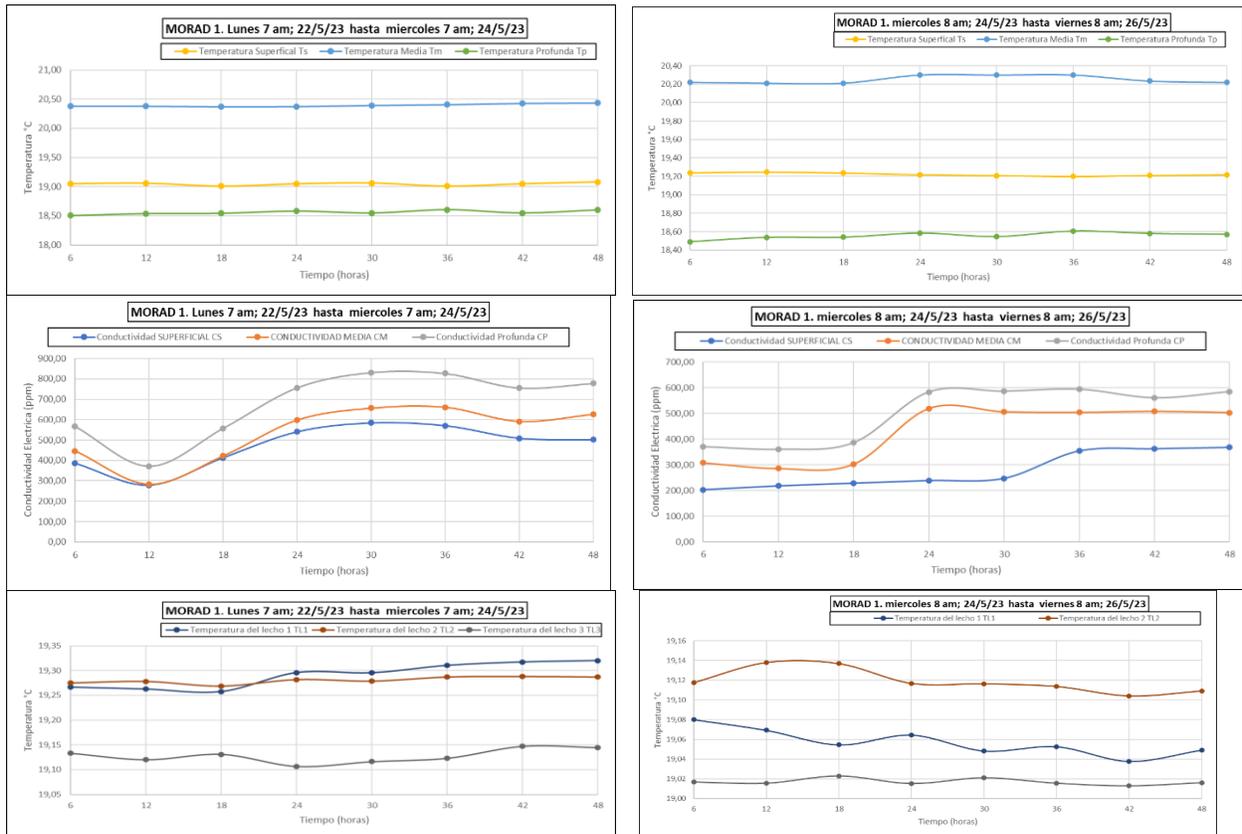
En la figura 42, se muestra la variación de la temperatura y conductividad, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en el punto de muestreo número 5, se observa que la temperatura no presenta una variación relevante manteniéndose la temperatura del epilimnion mayor que los valores del metalimnion y el hipolimnion en la toda la columna, de igual manera ocurre en la conductividad eléctrica, en donde el hipolimnion es menor que el metalimnion, con una diferencia de 25 ppm, esto es un indicativo

al igual que el punto 4, que no existió una contribución de agua subterránea a la laguna en este punto de muestreo.

- Cuarta semana de registro y recolección de datos del 22 al 26 de mayo del 2023

**Figura 43**

*Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 1(semana 4).*



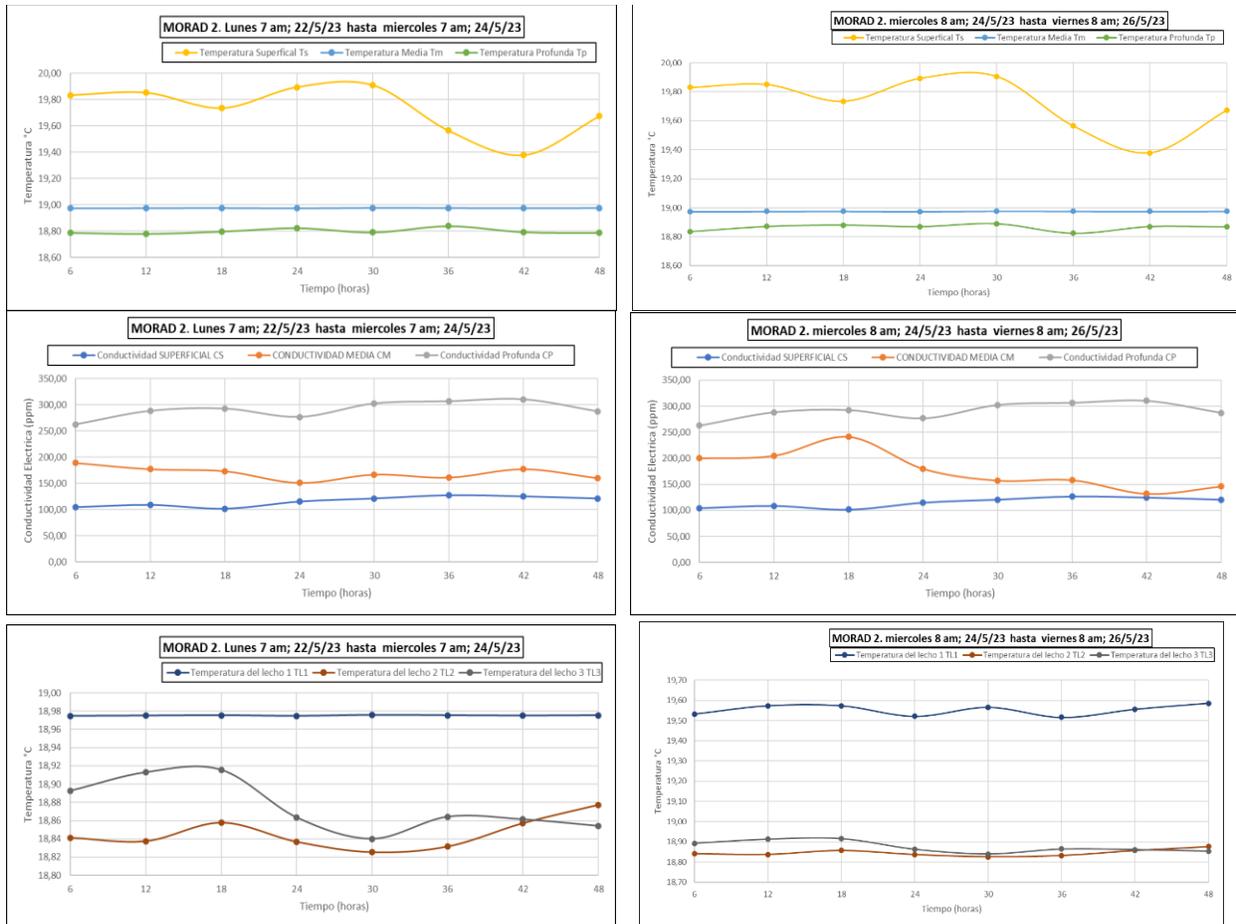
**Fuente:** Autor

En la figura 43, se muestra la variación de la temperatura y conductividad eléctrica, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en donde se observa en el punto 1 en todo el mes de muestre que no cambio el comportamiento de la temperatura, en donde difiere enormemente de los puntos de muestreo adyacentes, y además que muestra una distribución irregular, al considerar que la temperatura del

metalimnion fue mayor que la del epilimnion e hipolimnion. Se decidió descartarlo de análisis general.

**Figura 44**

*Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 2 (semana 4)*



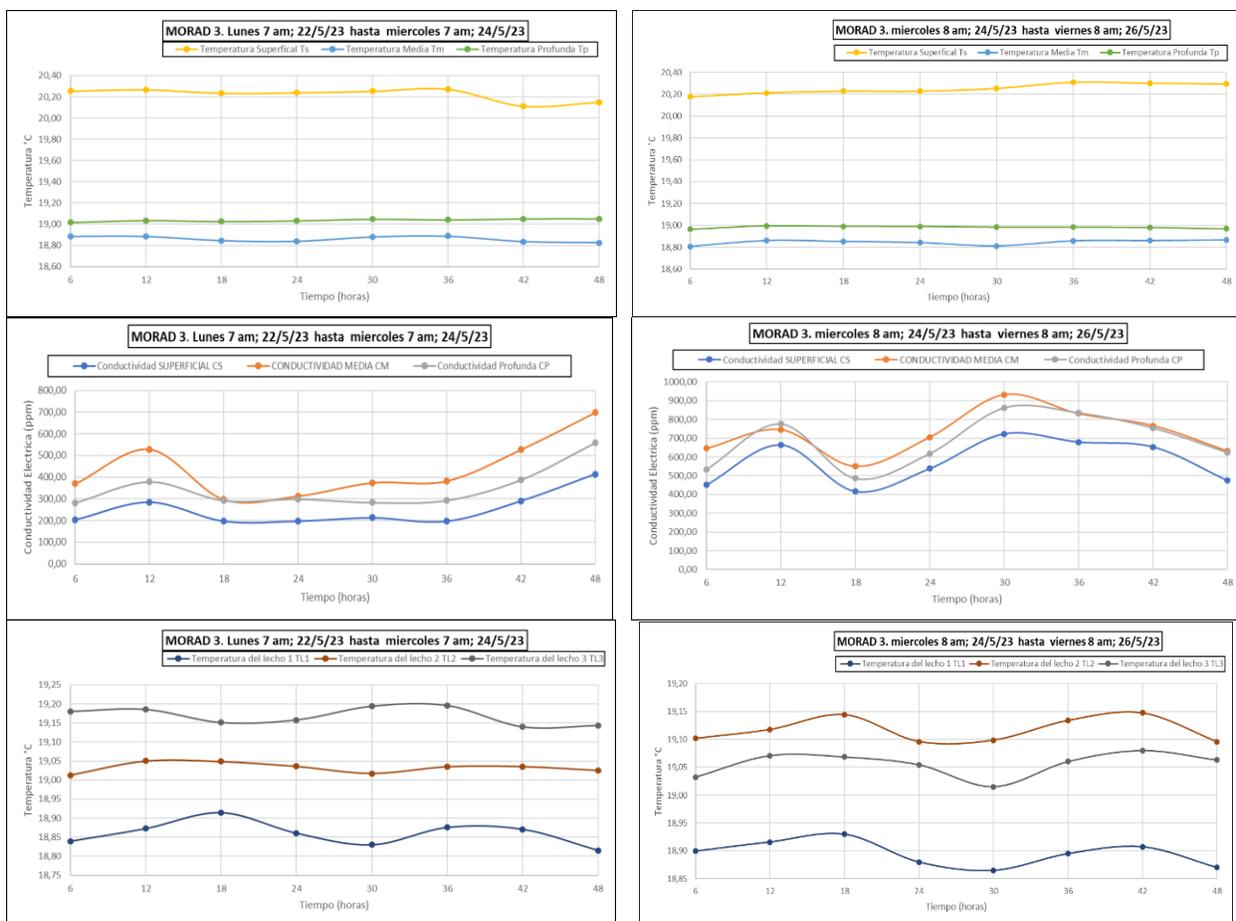
**Fuente:** Autor

En la figura 44, se muestra la variación de la temperatura y conductividad, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en el punto de muestreo número 2, se observó que en el último mes de muestreo no se presenta una similitud con las semanas anteriores muestreadas en este punto, debido a que la temperatura no presenta variaciones significativas en toda la columna de agua, en donde el metalimnion es mayor

que hipolimnion con una diferencia de 1°C, de igual manera ocurre con los valores de la conductividad eléctrica donde el metalimnion es mayor que el hipolimnion con un diferencia de 100ppm, esto es un indicativo que no existió una contribución de agua subterránea a la laguna en esta semana de muestreo.

**Figura 45**

*Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 3 (semana 4).*



**Fuente:** Autor

En la figura 44, se muestra la variación de la temperatura y conductividad, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en el punto de muestreo número 3, se observó una variación de temperatura en toda la columna de

agua en donde el hipolimnion es llega a ser mayor que el metalimnion, con una diferencia de 0,3°C. al igual sucede con la conductividad eléctrica que presenta una similitud entre el metalimnion e hipolimnion, con una diferencia de 50 ppm, esto es un indicativo en este punto existió una contribución de agua subterránea a el agua de la laguna.

**Figura 46**

*Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 4 (semana 4)*



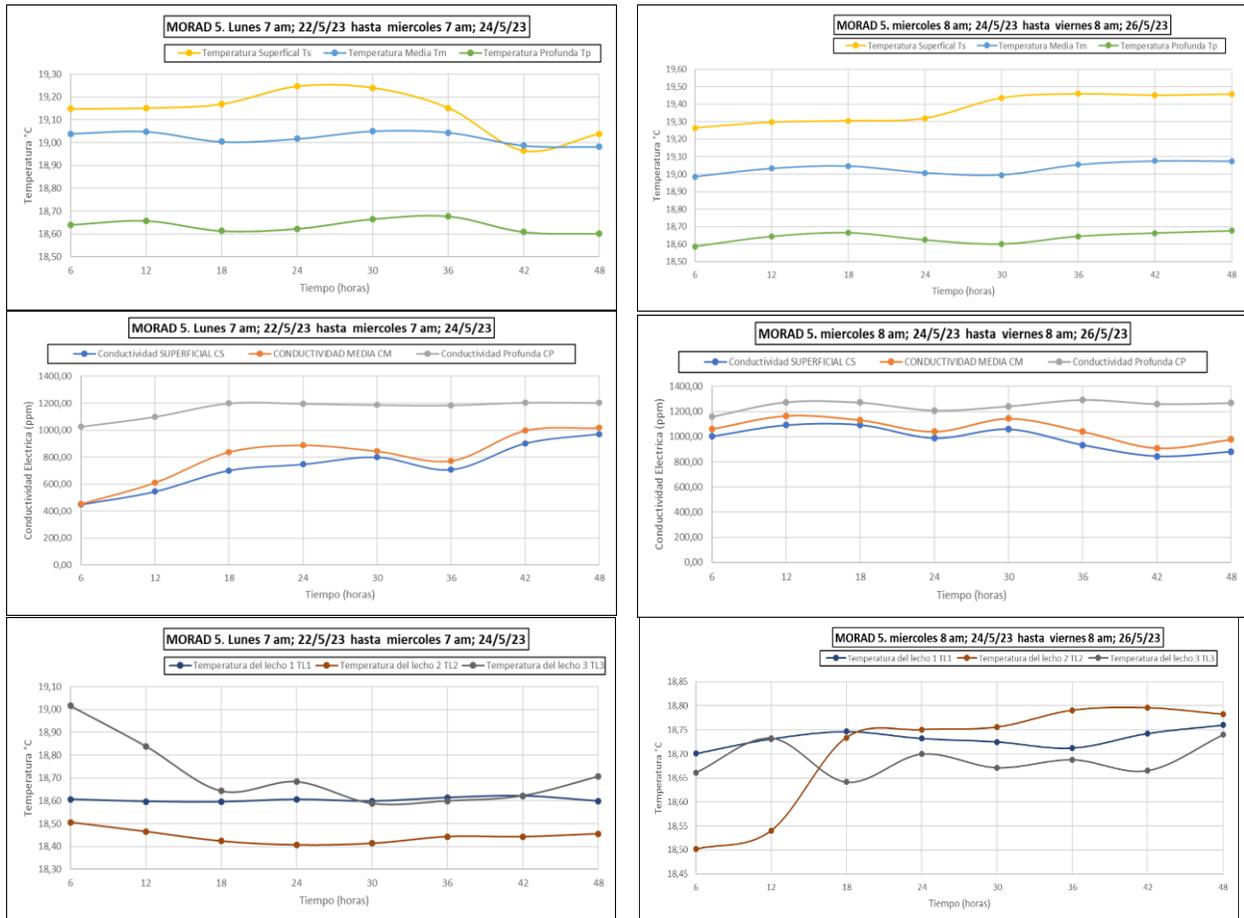
**Fuente:** Autor

En la figura 44, se muestra la variación de la temperatura y conductividad, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en el punto de muestreo número 4, se observó que la temperatura en el hipolimnion es menor que la

que presenta el metalimnion, con una diferencia  $0,1^{\circ}\text{C}$ , mientras que la conductividad eléctrica en el hipolimnion es similar que el metalimnion, esto es un indicativo que no existió una contribución de agua subterránea a la laguna en este punto de muestreo.

**Figura 47**

*Gráficas de datos registrados por los sensores de temperatura y conductividad eléctrica en el MORAD 5 (semana 4)*



**Fuente:** Autor

En la figura 47, se muestra la variación de la temperatura y conductividad, en los estratos epilimnion, metalimnion e hipolimnion. Los datos fueron recopilados a lo largo de una semana en el punto de muestreo número 5, se observa que la temperatura no presenta una variación relevante

manteniéndose la temperatura del epilimnion mayor que los valores del metalimnion y el hipolimnion en la toda la columna, de igual manera ocurre en la conductividad eléctrica, en donde el hipolimnion es menor que el metalimnion en el día 1 y 2, con una diferencia de 25 ppm, en cambio en el día 3 y 4 llega a ser similar el hipolimnion y metalimnion, esto es un indicativo al igual que el punto 4, que no existió una contribución de agua subterránea a la laguna en este punto de muestreo.

#### **4.3 Numero de huellas nucleares en los detectores solidos de trazas nucleares (DSTN), LR-115.**

La concentración de radón exhalada por las muestras de agua es directamente proporcional al número de huellas nucleares que se obtienen al revelar los DSTN. Por tal motivo en este trabajo se utilizó el número de huellas nucleares de forma directa, para comparar la exhalación de radón en cada uno de los puntos de muestreos.

En la tabla número 6, se pueden ver los resultados obtenidos:

**Tabla 6**

*Número de huellas nucleares*

Punto de muestreo	Promedio de huellas nucleares por detector
1	49
2	53
3	47
4	50
5	52
6	46

Fuente: Autor

Cabe destacar que las muestras de agua fueron tomadas en la parte más profunda de la columna de agua de cada uno de los puntos de muestreos. El rango para el numero de huella

nucleares promedios es de 7, lo que resulta un valor relativamente pequeño. Este valor último valor se puede explicar al considerar que el día del muestreo de radón las conductividades eléctricas en la columna de agua fueron muy similares en los tres niveles.

#### 4.4 Discusión

Es bien sabido por reportes en la literatura especializada (Martínez, 2018) que las aguas subterráneas contienen una mayor concentración de iones disueltos que el agua superficial, lo que aumenta su conductividad eléctrica.

El análisis de los valores de conductividad eléctrica y temperatura en la columna de agua muestra, valores en donde la temperatura del hipolimnion es mayor que la del metalimnion y en otros casos la temperatura en el hipolimnion resultó ser menor que el del metalimnion, de igual manera sucede con los valores de la conductividad eléctrica que presenta similitud con los valores referenciados anteriormente, en donde puede generarse una variación de los datos desde la hipolimnion hasta la epilimnion o al contrario desde la epilimnion hasta la hipolimnion de la laguna, este tipo de análisis nos ayuda a identificar la posible existencia o no de contribución de agua subterránea a la laguna.

**Tabla 7**

*Valores máximos y mínimos de los puntos de que presentan anomalías.*

Datos de los valores de temperatura y conductividad eléctrica		
	<b>Temperatura</b> °C	<b>Conductividad eléctrica</b> Ppm-uS/cm
Valores min.	18	300ppm – 468 uS/cm
Valores máx.	19,5	1100 ppm – 1718us/cm

**Fuente:** Autor

En base a los resultados observados de la tabla 7, de los valores mínimos y máximos de la conductividad eléctrica en la identificación de posibles aportes de flujo de agua subterránea a la

laguna, se desarrolla en base al aumento de valores desde la profundidad hasta la epilimnion, de la temperatura y conductividad eléctrica en la columna de laguna, que oscilan valores como la de conductividad de 468 uS/cm mínimos y máximo de 1718 uS/cm, que llega a concordar con los valores registrados por (varni et al., 2003), que oscila entre 244 uS/cm y 1026 uS/cm, en los valores de concentración de conductividad eléctrica presente en la laguna que recibe aporte de agua subterránea. Asimilando que estos valores registrados de conductividad eléctrica pueden asimilarse como un posible indicador, es muy probable que exista un aporte de flujo de agua subterránea a la laguna.

En referencia a los datos reportados sobre la variación de temperatura entre el sedimento y columna de agua, estos oscilan en entre 18 y 19,5 °C, lo cual se acerca a los rangos reportados por (huízar álvarez et al., 2016), en donde se registra intervalos de la temperatura de agua subterránea a un cuerpo de agua, que oscilan entre 20 a 25°C, esta variación se desarrolla desde el hipolimnion hasta el epilimnion, con una variación entre el hipolimnion y el metalimnion de 1,5°C. Este último concuerda con lo descrito por Keery et al. (2007), en donde describe que las temperaturas en los cuerpos de agua superficial van a mostrar oscilaciones de cambio en el día, tarde, noche y madrugada, lo cual impulsa a tener transferencias continuas de energía entre el agua superficial y los sedimentos. La transferencia continua de energía térmica entre el sedimento y la columna de agua se encuentra estrechamente relacionada la contribución de agua subterránea al agua superficial. Por ello una alteración pronunciada de la temperatura en los sedimentos nos proporcionan un mecanismo para estimar las tasas verticales de un probable aporte de flujo de agua desde los sedimentos subyacentes al agua de la laguna.

Finalmente, uno de los trazadores ambientales muy utilizado, según (echevoyen et al., 2018), es el  $^{222}\text{rn}$ , el cual se considera uno de los indicadores principales para verificar el posible

aporte de agua subterránea al cuerpo superficial. Por ello la identificación de la concentración de radón exhalado, presente en la columna de agua, aumenta la probabilidad de un posible aporte de un flujo de agua subterránea a la laguna. Aunque según lo registrado en las concentraciones exhaladas del radón, no solo va a depender del punto de muestreo si no también del tiempo en el que se presentan las variaciones en la columna de agua

### **Conclusiones**

- Cabe destacar que este trabajo es el primer prototipo, reportado en la literatura del país, en el cual se utilizó un sistema de detección y registro de datos (SDRD) con sensores de temperatura y conductividad eléctrica para identificar los posibles aportes de agua subterránea a un cuerpo superficial, mediante la utilización de trazadores naturales como la temperatura y la conductividad eléctrica.
- El SDRD permitió realizar un registro continuo de la variación de la temperatura y la conductividad eléctrica, tanto en la columna de agua como del lecho de la laguna de Guabizhun, por un periodo de cuatro semanas.
- Según el comportamiento de la variación de la temperatura y la conductividad eléctrica en la columna de agua en los cinco puntos de muestreos y el lecho de la laguna, así como la correlación entre los valores de estas variables, se puede concluir que existe una probabilidad de aporte de agua subterránea a la laguna, en la región de los puntos de muestreos 2 y 3.
- En los puntos de muestreo identificados con los números 1, 4 y 5, el comportamiento de la variación, tanto de la temperatura como de la conductividad eléctrica, en la columna de agua, no indicó una posible contribución de agua subterránea al agua superficial, basado en la hipótesis arriba mencionada.

- La diferencia entre las concentraciones de radón exhalado por las muestras de agua, tomadas en los cinco puntos de muestreos de la laguna, no fueron significativos. Lo que implica que el número de muestreos de radón no fueron suficientes y que los momentos en los cuales se llevaron a cabo dichos muestreos no coincidieron con las anomalías de conductividad eléctrica y temperatura, por lo que en este trabajo no se pueden considerar estos datos como un aporte a la determinación de la contribución de aguas subterráneas a la laguna.
- los MORADs resultaron ser muy útiles para el muestreo y registro de la temperatura y la conductividad eléctrica de las columnas de agua y de lecho de la laguna. de igual forma el análisis de la variación y correlación de los trazadores naturales utilizados (el radón, la temperatura y la conductividad eléctrica) en la laguna de Guabizhun, resultaron ser potencialmente útiles para la identificación de posibles zonas de contribución de aguas subterráneas al agua superficial. mientras que el uso del radón como trazador natural es más complicado, debido a que la dificultad de muestreo continuo de este.

## Recomendaciones

- Debido a que los sensores están sujetos a deposición de materia orgánica en su superficie, se recomienda un mantenimiento frecuente.
- Los morads al ser de un estructura hermetica y depender de la energia solar para su continuo funcionamiento, tienden a presentar condensación de agua en las superficies internas. Se recomienda, cada dos días, abrir los morads para secar las superficies internas de excesos de agua, que pudieran provocar cortos circuitos en los dispositivos electrónicos internos. Además se recomienda verificar el correcto funcionamiento de los paneles solares.
- Para futuros trabajos de este tipo, se recomienda, realizar un muestreo a lo largo de todo el año, considerando que las contribuciones de aguas subterráneas pueden ser más notorias en diferentes épocas del año.
- Para posteriores trabajos se recomienda debe tomar en cuenta el tiempo óptimo de registro de los datos en el área a ser muestreada. Un tiempo de muestreo muy corto no permitiría identificar variaciones significativas de aporte de agua subterráneas considerando que estos aportes pueden ser más significativos en periodos de lluvia que en los de sequía.

## Bibliografía

- Abbott, D., Menke, W., Hobart, M., & Anderson, R. (1981). Evidence for excess pore pressures in southwest Indian Ocean sediments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B3), 1813–1827. <https://doi.org/10.1029/JB086IB03P01813>
- Baskaran, M. (2016). Radon in Groundwater System. *Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies*, 167–188. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-21329-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-21329-3_8)
- Belendez, A. (2017). Calor y temperatura. *Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de La Señal*, 1–21.
- Brookfield, A. E., Hansen, A. T., Sullivan, P. L., Czuba, J. A., Kirk, M. F., Li, L., Newcomer, M. E., & Wilkinson, G. (2021). Predicting algal blooms: Are we overlooking groundwater? *Science of The Total Environment*, 769, 144442. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.144442>
- Calvey, C. H., Sánchez, V., White, A. M., Colin, M., Woodworth, S. P., Alt, H. M., Eckert, C. A., & Christopher, W. (2022). *Journal of Metabolic Engineering*, 100953. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100953>
- Cerón, L. M., Sarria, J. D., Torres, J. S., & Soto-Paz, J. (2021). Groundwater: Trends and scientific development. *Informacion Tecnologica*, 32(1), 47–56. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000100047>
- Chetia, T., Baruah, S., Dey, C., Baruah, S., & Sharma, S. (2022). Seismic induced soil gas radon anomalies observed at multiparametric geophysical observatory, Tezpur (Eastern Himalaya),

- India: an appraisal of probable model for earthquake forecasting based on peak of radon anomalies. *Natural Hazards*, 111(3), 3071–3098. <https://doi.org/10.1007/S11069-021-05168-9/TABLES/9>
- Coluccio, K. M., Santos, I. R., Jeffrey, L. C., & Morgan, L. K. (2021). Groundwater discharge rates and uncertainties in a coastal lagoon using a radon mass balance. *Journal of Hydrology*, 598, 126436. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126436>
- Dahaan, S. A. M. Al, Al-Ansari, N., Knutsson, S., Dahaan, S. A. M. Al, Al-Ansari, N., & Knutsson, S. (2016). Influence of Groundwater Hypothetical Salts on Electrical Conductivity Total Dissolved Solids. *Engineering*, 8(11), 823–830. <https://doi.org/10.4236/ENG.2016.811074>
- Dimova, N. T., Burnett, W. C., Chanton, J. P., & Corbett, J. E. (2013). Application of radon-222 to investigate groundwater discharge into small shallow lakes. *Journal of Hydrology*, 486, 112–122. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2013.01.043>
- Domenico, P., & Palciauskas, V. (1973). Theoretical Analysis of Forced Convective Heat Transfer in Regional Ground-Water Flow. *GSA Bulletin*, 84(12), 3803–3814. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1973\)84<3803:TAOFCH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1973)84<3803:TAOFCH>2.0.CO;2)
- Duque, C., Haider, K., Sebok, E., Sonnenborg, T. O., & Engesgaard, P. (2018). A conceptual model for groundwater discharge to a coastal brackish lagoon based on seepage measurements (Ringkøbing Fjord, Denmark). *Hydrological Processes*, 32(22), 3352–3364. <https://doi.org/10.1002/HYP.13264>
- Echegoyen, C., Lecomte, K. L., & Campodonico, V. (2018). *Uso de Radón-222 para determinar el flujo de agua en una laguna freática de la llanura medanosa de San Luis. June 2019.*

- Gordon, R. P., Lautz, L. K., Briggs, M. A., & McKenzie, J. M. (2012). Automated calculation of vertical pore-water flux from field temperature time series using the VFLUX method and computer program. *Journal of Hydrology*, 420–421, 142–158. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2011.11.053>
- Harvey, F. E., Lee, D. R., Rudolph, D. L., Frappe, S. K., Harvey, F. E., Lee, D. R., Rudolph, D. L., & Frappe, S. K. (1997). Locating groundwater discharge in large lakes using bottom sediment electrical conductivity mapping. *WRR*, 33(11), 2609–2615. <https://doi.org/10.1029/97WR01702>
- Huízar Álvarez, R., Carrillo Rivera, J., & Juárez, F. (2016). Fluoride in groundwater: levels, origin and natural control at the Tenextepango region, Morelos, Mexico. *Investigaciones Geográficas - Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México*, 2016(90), 40–58.
- Jafari, T., Kiem, A. S., Javadi, S., Nakamura, T., & Nishida, K. (2021). Using insights from water isotopes to improve simulation of surface water-groundwater interactions. *Science of The Total Environment*, 798, 149253. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.149253>
- Kanchana, V., Kumar, P. M., Kumar, P. S., Kathir, I., Thirumalai, R., Priya, D., Puviarasi, R., & Prasad, M. M. (2023). Investigating underground water salinity in east coastline of Tamil Nadu, India and improving its quality through solar assisted desalination. *Urban Climate*, 49(January), 101440. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101440>
- Kornelsen, K. C., & Coulibaly, P. (2014). Synthesis review on groundwater discharge to surface water in the Great Lakes Basin. *Journal of Great Lakes Research*, 40(2), 247–256.

<https://doi.org/10.1016/J.JGLR.2014.03.006>

Kurylyk, B. L., Irvine, D. J., Mohammed, A. A., Bense, V. F., Briggs, M. A., Loder, J. W., & Geshelin, Y. (2018). Rethinking the Use of Seabed Sediment Temperature Profiles to Trace Submarine Groundwater Flow. *Water Resources Research*, 54(7), 4595–4614. <https://doi.org/10.1029/2017WR022353>

Lapham, W. W. (1989). Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical ground-water flow and vertical hydraulic conductivity. *Water Supply Paper*. <https://doi.org/10.3133/WSP2337>

Lopez, C. V., Murgulet, D., & Santos, I. R. (2020). Radioactive and stable isotope measurements reveal saline submarine groundwater discharge in a semiarid estuary. *Journal of Hydrology*, 590, 125395. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.125395>

Maher, D. T., Call, M., Macklin, P., Webb, J. R., & Santos, I. R. (2019). Hydrological Versus Biological Drivers of Nutrient and Carbon Dioxide Dynamics in a Coastal Lagoon. *Estuaries and Coasts* 2019 42:4, 42(4), 1015–1031. <https://doi.org/10.1007/S12237-019-00532-2>

Martínez, D. (2018). APORTE DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ARROYOS PAMPEANOS: TRAZADORES AMBIENTALES EN LOS ARROYOS VIVORATÁ Y LA BALLENERA Daniel. *Daniel Maritnez, Mauricio Quiroz , Sebastián Grondona, Carolina Calvi, Cristina Dapeña, I.*

Menció, A., Casamitjana, X., Mas-Pla, J., Coll, N., Compte, J., Martinoy, M., Pascual, J., & Quintana, X. D. (2017). Groundwater dependence of coastal lagoons: The case of La Pletera salt marshes (NE Catalonia). *Journal of Hydrology*, 552, 793–806.

<https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2017.07.034>

Ntona, M. M., Busico, G., Mastrocicco, M., & Kazakis, N. (2022). Modeling groundwater and surface water interaction: An overview of current status and future challenges. *Science of The Total Environment*, 846, 157355. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.157355>

Peterson, R. N., Meile, C., Peterson, L. E., Carter, M., & Miklesh, D. (2019). Groundwater discharge dynamics into a salt marsh tidal river. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 218, 324–333. <https://doi.org/10.1016/J.ECSS.2019.01.007>

Prefectura del Cañar. (2015). *Laguna de Guabizhún :: Gobierno Provincial del Cañar :: Provincia Provincial del Cañar*.

Price, M., & Back, W. (2016). *AGUA SUBTERRANEA*.

Quintero, M. V. V. O. O. P. C. V. (2011). Las aguas subterráneas: un enfoque práctico. In *Instituto Colombiano de Geología y Minería*.

Robinson, C. (2015). Review on groundwater as a source of nutrients to the Great Lakes and their tributaries. *Journal of Great Lakes Research*, 41(4), 941–950. <https://doi.org/10.1016/J.JGLR.2015.08.001>

Rosenberry, D. O., Duque, C., & Lee, D. R. (2020). History and evolution of seepage meters for quantifying flow between groundwater and surface water: Part 1 – Freshwater settings. *Earth-Science Reviews*, 204, 103167. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2020.103167>

Sadat-Noori, M., Anibas, C., Andersen, M. S., & Glamore, W. (2021). A comparison of radon, heat tracer and head gradient methods to quantify surface water - groundwater exchange in a

- tidal wetland (Kooragang Island, Newcastle, Australia). *Journal of Hydrology*, 598, 126281. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126281>
- Salem, Z. E., & Bayumy, D. A. (2016). Use of the subsurface thermal regime as a groundwater-flow tracer in the semi-arid western Nile Delta, Egypt. *Hydrogeology Journal*, 24(4), 1001–1014. <https://doi.org/10.1007/S10040-016-1377-Z/FIGURES/19>
- Santamarta Cerezal, J. C., Cruz Pérez, N., Rodríguez Martín, J., Hernández Gutiérrez, L. E., García Talavera, M., & Marrero Díaz, R. (2020). Guía técnica de buenas prácticas frente a la exposición al radón en las instalaciones hidráulicas subterráneas de Canarias. In *Guía técnica de buenas prácticas frente a la exposición al radón en las instalaciones hidráulicas subterráneas de Canarias*. <https://doi.org/10.25145/b.guiahidraulicascanarias.2020>
- Santillán, J. (2020). Universidad Agraria Del Ecuador | Medicina Veterinaria. *Tesis*, 1–89. [http://www.uagraria.edu.ec/carrera\\_medicina\\_veterinaria.php](http://www.uagraria.edu.ec/carrera_medicina_veterinaria.php)
- Sarath Prasanth, S. V., Magesh, N. S., Jitheshlal, K. V., Chandrasekar, N., & Gangadhar, K. (2012). Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in the coastal stretch of Alappuzha District, Kerala, India. *Applied Water Science* 2012 2:3, 2(3), 165–175. <https://doi.org/10.1007/S13201-012-0042-5>
- Savatier, M., & Rocha, C. (2021). Rethinking tracer-based (Ra, Rn, salinity) approaches to estimate point-source submarine groundwater discharge (SGD) into coastal systems. *Journal of Hydrology*, 598, 126247. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126247>
- Schmidt, A., Stringer, C. E., Haferkorn, U., & Schubert, M. (2008). Quantification of groundwater discharge into lakes using radon-222 as naturally occurring tracer. *Environmental Geology*

2008 56:5, 56(5), 855–863. <https://doi.org/10.1007/S00254-008-1186-3>

Sechu, G. L., Nilsson, B., Iversen, B. V., Møller, A. B., Greve, M. B., Troldborg, L., & Greve, M. H. (2022). Mapping groundwater-surface water interactions on a national scale for the stream network in Denmark. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 40, 101015. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2022.101015>

Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., & Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 31(1), 35. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>

Stieglitz, T. C., van Beek, P., Souhaut, M., & Cook, P. G. (2013). Karstic groundwater discharge and seawater recirculation through sediments in shallow coastal Mediterranean lagoons, determined from water, salt and radon budgets. *Marine Chemistry*, 156, 73–84. <https://doi.org/10.1016/J.MARCHEM.2013.05.005>

Subba Rao, N., & Chaudhary, M. (2019). Hydrogeochemical processes regulating the spatial distribution of groundwater contamination, using pollution index of groundwater (PIG) and hierarchical cluster analysis (HCA): A case study. *Groundwater for Sustainable Development*, 9(June), 100238. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100238>

Varni, M., Rivas, R., & Entraigas, I. (2003). Interacción de un Cuerpo de Agua Superficial con el Agua Subterránea en la Llanura Pampeana Argentina. *Informacion Tecnologica*, 14(6), 97–104.

Vélez, M. V., & Vásquez, L. M. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. *Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología*, 20.

- Webb, J. R., Santos, I. R., Robson, B., Macdonald, B., Jeffrey, L., & Maher, D. T. (2017). Constraining the annual groundwater contribution to the water balance of an agricultural floodplain using radon: The importance of floods. *Water Resources Research*, 53(1), 544–562. <https://doi.org/10.1002/2016WR019735>
- Winter, T., Harvey, J., & Alley, W. (1999). *Ground Water and Surface Water A Single Resource* (primera). U.S. Geological Survey.
- Xu, W., Su, X., Dai, Z., Yang, F., Zhu, P., & Huang, Y. (2017). Multi-tracer investigation of river and groundwater interactions: a case study in Nalenggele River basin, northwest China. *Hydrogeology Journal*, 25(7), 2015–2029. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10040-017-1606-0>
- Zavaleta, M. C. (2016). *Modelamiento en la gestion del Agua subterránea*.

## Anexos

### Anexo 1

*Datos recolectados de los sensores de temperatura y conductividad eléctrica semana 1.*

TIEMPO horas	Conductividad SUPERFICIAL	CONDUCTIVIDAD MEDIA	Conductividad Profunda	Temperatura Superficial	Temperatura Media	Temperatura Profunda	Temperatura del lecho 1	Temperatura del lecho 2	Temperatura del lecho 3
h	CS	CM	CP	Ts	Tm	Tp	TL1	TL2	TL3
6	589,19	614,97	697,3083333	18,61286111	20,29	18,51	19,31	19,25	19,12
12	412,72	525,82	590,8472222	18,61566667	19,70	18,79	19,28	19,21	19,11
18	507,68	639,31	691,925	18,67966667	20,30	18,55	19,32	19,26	19,12
24	482,57	614,37	695,3472222	18,62047222	20,28	18,55	19,33	19,29	19,12
30	417,25	518,59	595,0527778	18,75066667	20,29	18,53	19,32	19,28	19,11
36	381,31	464,15	572,7722222	18,70397222	20,31	18,49	19,32	19,30	19,12
42	349,86	410,48	526,1666667	18,67033333	20,32	18,53	19,34	19,29	19,14
48	377,80	472,58	593,3222222	18,66744444	20,33	18,52	19,33	19,28	19,15
MOD 2									
TIEMPO horas	Conductividad SUPERFICIAL	CONDUCTIVIDAD MEDIA	Conductividad Profunda	Temperatura Superficial	Temperatura Media	Temperatura Profunda	Temperatura del lecho 1	Temperatura del lecho 2	Temperatura del lecho 3
h	CS	CM	CP	Ts	Tm	Tp	TL1	TL2	TL3
6	199,76	291,78	298,40	19,45	17,88	19,31	18,80	18,91	18,95
12	203,69	344,75	335,02	19,45	17,85	19,29	18,80	18,87	18,90
18	213,22	296,79	273,03	19,48	17,81	19,32	18,86	18,90	18,94
24	225,79	322,22	312,81	19,51	17,81	19,33	18,80	18,87	18,90
30	213,52	357,50	319,08	19,58	17,78	19,32	18,79	18,88	18,94
36	218,68	363,35	338,49	19,59	17,72	19,32	18,78	18,90	18,90
42	186,30	379,02	336,53	19,59	17,64	19,34	18,77	18,88	18,89
48	142,32	208,71	307,41	19,61	17,61	19,33	18,77	18,87	18,87
MORAD 3									
TIEMPO horas	Conductividad SUPERFICIAL	CONDUCTIVIDAD MEDIA	Conductividad Profunda	Temperatura Superficial	Temperatura Media	Temperatura Profunda	Temperatura del lecho 1	Temperatura del lecho 2	Temperatura del lecho 3
h	CS	CM	CP	Ts	Tm	Tp	TL1	TL2	TL3
6	329,34	646,40	570,54	20,08	18,90	19,01	17,70	17,94	19,10
12	181,84	627,74	511,21	20,12	18,92	19,03	17,70	17,95	19,12
18	122,97	679,85	749,17	20,10	18,93	19,04	17,70	17,94	19,14
24	269,04	702,03	600,41	20,06	18,88	18,99	17,75	17,94	19,10
30	249,55	691,01	584,12	20,08	18,87	19,00	17,76	17,96	19,10
36	212,75	663,02	742,29	20,08	18,90	19,03	17,95	17,96	19,13
42	184,03	667,15	714,76	20,08	18,91	19,03	18,00	17,97	19,15
48	197,24	727,45	716,96	20,06	18,87	19,02	17,79	17,97	19,10
MORAD 4									
TIEMPO horas	Conductividad SUPERFICIAL	CONDUCTIVIDAD MEDIA	Conductividad Profunda	Temperatura Superficial	Temperatura Media	Temperatura Profunda	Temperatura del lecho 1	Temperatura del lecho 2	Temperatura del lecho 3
h	CS	CM	CP	Ts	Tm	Tp	TL1	TL2	TL3
6	188,43	209,086	342,51	19,31	18,73	18,74	18,77	18,50	18,52
12	159,28	201,694	334,38	19,31	18,73	18,74	18,79	18,55	18,43
18	168,71	190,708	328,22	19,32	18,73	18,74	18,78	18,54	18,41
24	178,30	200,701	326,22	19,31	18,73	18,74	18,80	18,50	18,51
30	178,25	219,339	286,21	19,43	18,73	18,73	18,78	18,50	18,52
36	166,66	191,408	289,91	19,42	18,74	18,74	18,77	18,56	18,53
42	170,07	213,133	306,19	19,44	18,73	18,73	18,78	18,52	18,56
48	157,33	191,078	320,13	19,46	18,71	18,74	18,77	18,51	18,50
MORAD 5									
TIEMPO horas	Conductividad SUPERFICIAL	CONDUCTIVIDAD MEDIA	Conductividad Profunda	Temperatura Superficial	Temperatura Media	Temperatura Profunda	Temperatura del lecho 1	Temperatura del lecho 2	Temperatura del lecho 3
h	CS	CM	CP	Ts	Tm	Tp	TL1	TL2	TL3
6	130,01	191,65	244,78	19,01	19,07	18,66	18,70	18,60	18,79
12	141,04	191,18	251,26	19,00	19,07	18,67	18,73	18,59	18,66
18	130,78	191,32	252,31	19,00	19,06	18,66	18,75	18,59	18,59
24	139,44	191,55	250,72	19,04	19,06	18,64	18,73	18,63	18,75
30	140,13	192,74	245,44	19,10	19,05	18,64	18,73	18,65	18,74
36	120,73	193,47	245,48	19,09	19,06	18,64	18,71	18,65	18,62
42	129,32	193,14	246,03	19,07	19,05	18,64	18,74	18,64	18,58
48	138,30	192,97	242,08	19,16	19,05	18,67	18,76	18,61	18,74











## Anexo 7

### Datos recolectados de los sensores de temperatura y conductividad eléctrica semana 4.

TIEMPO horas	Conductividad SUPERFICIAL	CONDUCTIVIDAD MEDIA	Conductividad Profunda	Temperatura Superficial	Temperatura Media	Temperatura Profunda	Temperatura del lecho 1	Temperatura del lecho 2	Temperatura del lecho 3
h	CS	CM	CP	Ts	Tm	Tp	TL1	TL2	TL3
6	385,55	446,78	566,76	19,05	20,38	18,50	19,27	19,27	19,13
12	277,53	283,13	370,88	19,06	20,38	18,54	19,26	19,28	19,12
18	412,94	421,74	557,21	19,01	20,37	18,54	19,26	19,27	19,13
24	540,66	598,18	756,64	19,05	20,37	18,58	19,30	19,28	19,11
30	584,57	656,44	831,27	19,06	20,39	18,55	19,30	19,28	19,12
36	571,01	660,99	826,86	19,01	20,41	18,61	19,31	19,29	19,12
42	508,94	591,38	755,60	19,05	20,43	18,55	19,32	19,29	19,15
48	501,38	625,93	777,87	19,08	20,44	18,60	19,32	19,29	19,14
MODULO 2									
TIEMPO horas	Conductividad SUPERFICIAL	CONDUCTIVIDAD MEDIA	Conductividad Profunda	Temperatura Superficial	Temperatura Media	Temperatura Profunda	Temperatura del lecho 1	Temperatura del lecho 2	Temperatura del lecho 3
h	CS	CM	CP	Ts	Tm	Tp	TL1	TL2	TL3
6	104,43	189,03	262,71	19,83	18,97	18,79	18,97	18,84	18,89
12	108,79	177,09	288,55	19,85	18,98	18,78	18,98	18,84	18,91
18	101,57	173,32	292,81	19,73	18,98	18,80	18,98	18,86	18,92
24	115,14	150,99	276,89	19,89	18,97	18,82	18,97	18,84	18,86
30	120,99	166,95	302,68	19,91	18,98	18,79	18,98	18,83	18,84
36	127,11	161,22	306,75	19,56	18,98	18,84	18,98	18,83	18,86
42	124,98	177,22	310,56	19,38	18,98	18,79	18,98	18,86	18,86
48	120,95	160,16	287,49	19,67	18,98	18,79	18,98	18,88	18,85
MODULO 3									
TIEMPO horas	Conductividad SUPERFICIAL	CONDUCTIVIDAD MEDIA	Conductividad Profunda	Temperatura Superficial	Temperatura Media	Temperatura Profunda	Temperatura del lecho 1	Temperatura del lecho 2	Temperatura del lecho 3
h	CS	CM	CP	Ts	Tm	Tp	TL1	TL2	TL3
6	204,25	370,20	282,08	20,26	18,89	19,02	18,84	19,01	19,18
12	284,58	528,88	378,52	20,27	18,89	19,03	18,87	19,05	19,19
18	197,49	297,56	292,43	20,24	18,84	19,03	18,91	19,05	19,15
24	197,96	313,46	299,25	20,24	18,84	19,03	18,86	19,04	19,16
30	213,08	374,64	283,10	20,25	18,88	19,05	18,83	19,02	19,19
36	197,23	382,55	292,91	20,27	18,89	19,04	18,88	19,04	19,20
42	289,93	526,89	387,16	20,11	18,84	19,05	18,87	19,04	19,14
48	413,46	698,03	557,13	20,15	18,83	19,05	18,82	19,03	19,14
MODULO 4									
TIEMPO horas	Conductividad SUPERFICIAL	CONDUCTIVIDAD MEDIA	Conductividad Profunda	Temperatura Superficial	Temperatura Media	Temperatura Profunda	Temperatura del lecho 1	Temperatura del lecho 2	Temperatura del lecho 3
h	CS	CM	CP	Ts	Tm	Tp	TL1	TL2	TL3
6	148,44	189,01	227,59	19,37	18,85	18,78	18,80	18,46	18,49
12	159,27	191,69	231,48	19,35	18,87	18,75	18,82	18,49	18,59
18	158,73	190,70	232,26	19,37	18,86	18,76	18,80	18,51	18,49
24	147,61	186,90	230,67	19,37	18,82	18,77	18,82	18,41	18,49
30	158,26	191,35	239,43	19,42	18,81	18,80	18,82	18,48	18,50
36	156,67	191,38	242,48	19,40	18,81	18,82	18,82	18,52	18,47
42	150,12	183,19	241,38	19,37	18,79	18,81	18,81	18,52	18,49
48	157,63	171,28	246,54	19,40	18,79	18,79	18,80	18,44	18,48
MODULO 5									
TIEMPO horas	Conductividad SUPERFICIAL	CONDUCTIVIDAD MEDIA	Conductividad Profunda	Temperatura Superficial	Temperatura Media	Temperatura Profunda	Temperatura del lecho 1	Temperatura del lecho 2	Temperatura del lecho 3
h	CS	CM	CP	Ts	Tm	Tp	TL1	TL2	TL3
6	448,31	453,52	1025,20	19,15	19,04	18,64	18,61	18,51	19,02
12	544,36	611,44	1098,62	19,15	19,05	18,66	18,60	18,47	18,84
18	700,24	838,38	1198,38	19,17	19,00	18,61	18,59	18,42	18,64
24	746,28	888,87	1195,91	19,25	19,02	18,62	18,61	18,41	18,68
30	798,72	844,74	1185,93	19,24	19,05	18,66	18,60	18,41	18,59
36	706,81	773,30	1184,36	19,15	19,04	18,68	18,61	18,44	18,60
42	900,98	997,50	1203,78	18,96	18,99	18,61	18,62	18,44	18,62
48	971,40	1017,08	1202,00	19,04	18,98	18,60	18,60	18,46	18,71

