

**Evolución geoquímica de las aguas termales de Paipa e Iza, Boyacá y evaluación de su potencial económico en sales de Litio y Sodio**

Laura María Contreras Labarces

Sindy Tatiana Vera Vera

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

Mario García González. Geólogo Ph. D.

Codirectores

Luz Yolanda Vargas Fiallo. Química M. Sc

Jaiber Leonardo Villamizar Cáceres. Geólogo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

### **Dedicatoria**

*A mis papás Verence y Oscar, por hacerme sentir la hija más amada en todo momento.  
Gracias por todo su apoyo, esto más que para mí, es para ustedes. Los amo con todo  
mi corazón.*

*A mi abuela Magalis, que me cuidó desde que era una bebé y aún de grande lo sigue  
haciendo, por creer en mí y motivarme cada día a seguir luchando por esta meta,  
ojalá fueras eterna.*

*A mi hermano Cristian, por enseñarme la virtud de la paciencia y verme como alguien que  
sabe lo que hace (no siempre es así).*

*A Sindy Tatis, mi compañerita de tesis y de otras cosas más agradables. Gracias por tu  
valiosa amistad, fue un placer hacer este proyecto a tu lado y quejarnos de nunca  
terminarlo, al fin lo logramos.*

*A BLAT, por estar a lo largo de todo este camino. Gracias por compartir risas, tristezas y  
momentos inolvidables.*

*A mis amigos Pau, Jose, Andrés, David y Valentina, los quiero muchísimo, gracias por hacer  
de estos los mejores años.*

*Por último, pero no menos importante, a mí, por todo el esfuerzo y la paciencia que implica  
hacer un trabajo de investigación.*

**Laura Contreras**

*A Dios, que nunca me ha dejado sola, me ha llenado de fortaleza y sabiduría para  
llegar donde estoy ahora.*

*A mí, por nunca rendirme, por la valentía, quiero decirle a la niña que fui, que  
seguimos aquí gracias a su fuerza y que seremos felices y con sueños cumplidos.*

*A mi mamá por su apoyo incondicional, por creer en mí y ser la mujer más fuerte,  
gracias por sacarnos adelante y enseñarme a sobreponerme ante cualquier situación.*

*A mi nona, por su apoyo, su sabiduría, por ser un ejemplo y pilar para la familia y a  
mi tío por su apoyo.*

*A mi hermanito, mi Jossi, que me llena de motivación y amor puro, que con sus  
ocurrencias me alegra la vida, quiero ser un ejemplo para ti.*

*A mi hermano Steven, el compañero que me dio la vida, que a pesar de todo hemos  
sabido salir adelante, gracias por el apoyo y confió en ti.*

*A mi hermanita, que desde el cielo siempre me acompaña y me llena de fuerzas para  
seguir.*

*A Diego, mi amor, quien me enseñó que el amor de pareja es real y puro, por su  
apoyo, su incondicionalidad y por los sueños que nos faltan juntos!*

*A Laura, por ser esa gran amiga y compañera de aventuras, gracias por tu apoyo y  
tu amistad valiosa, por un futuro brillante juntas, lo logramos!*

*A Britney y Andrea, colegas y amigas, con las que he compartido tanto, que me han  
brindado su preciada amistad y apoyo sincero e incondicional desde el inicio, muchos éxitos.*

*A Kelly, Kevin y Karoll, mis amigos, que me han apoyado en este proceso, y en la vida,  
éxitos.*

**Sindy Tatiana Vera**

### **Agradecimientos**

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander, que se convirtió en un segundo hogar para nosotras y nos brindó las oportunidades de conocimiento y superación que hoy en día nos permiten estar aquí como profesionales. También, por brindarnos los recursos materiales necesarios para llevar a cabo esta investigación.

Al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación por la financiación parcial del proyecto titulado: Evolución geoquímica de las aguas termales de Paipa e Iza, Boyacá y evaluación de su potencial en sales de Litio y Sodio, Fase 1: época seca, identificado con código: 110293194611, que fue presentado en la Convocatoria 931-2022 “Convocatoria Fortalecimiento Actores Industria Hidrocarburos”. La financiación parcial se obtuvo de recursos provenientes del Convenio 751-2021, suscrito entre la Agencia Nacional de Hidrocarburos, el MINISTERIO y el Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación Fondo Francisco José de Caldas.

A la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, por el apoyo en el proceso de formación. Al personal administrativo quien siempre se mostró dispuesto a resolver nuestras dudas y facilitar el acceso a la información.

Al Laboratorio de Geoquímica del Petróleo de la sede de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander, por el préstamo del equipo portátil de medición compacto y de alta precisión Multi 340i con el cual se realizaron las mediciones de este trabajo.

Al Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la oportunidad de llevar a cabo este estudio en sus instalaciones. El apoyo y los recursos proporcionados por el laboratorio fueron fundamentales para el desarrollo exitoso de esta investigación.

A Natalia Gallo, profesional de calidad del Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander por su colaboración, disposición y motivación durante cada etapa de este proyecto y por ser un apoyo.

Queremos dar las gracias a nuestros profesores, por su dedicación y enseñanzas a lo largo de nuestra formación académica. Sus conocimientos y experiencias nos han inspirado y motivado a superarnos.

Al profesor Mario García González, director de este proyecto por sugerirnos la zona de estudio, por sus conocimientos de gran importancia para este proyecto y sus recomendaciones durante todo el proceso de investigación.

A la profesora Yolanda Vargas Fiallo, directora del laboratorio y codirectora de este proyecto, por su liderazgo y por brindarnos su experiencia, conocimientos y colaboración con los análisis base para este trabajo.

Al profesor Jaiber Leonardo Villamizar por aportar su conocimiento y correcciones en esta investigación.

A la profesora Karime Vargas, por su ayuda en la corrección y escritura del presente documento y por la motivación que nos daba en el transcurso de este proceso.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	16
1. Justificación y planteamiento del problema .....	17
2. Objetivos.....	19
2.1 Objetivo General .....	19
2.2 Objetivos Específicos .....	19
3. Marco Referencial.....	20
3.2 Marco Conceptual .....	20
3.2.1 Alcalinidad.....	20
3.2.2 Producto de solubilidad y saturación.....	20
3.2.3 Actividad de las especies iónicas .....	20
3.1 Estado del arte.....	22
4.2. Geología.....	27
4.2.1 Marco Geológico.....	27
5. Metodología.....	31
5.1 Fase 1: Identificación de los manantiales de agua hidrotermal de interés en la zona de Paipa e Iza en Boyacá.....	31
5.2 Fase 2: Análisis de las propiedades químicas de las aguas con influencia hidrotermal de Paipa e Iza en Boyacá.....	34
5.3 Fase 3: Determinar la evolución geoquímica de las aguas termales de Paipa e Iza en términos de una sucesión de divisiones químicas que experimentan las aguas por el modelo de evolución de aguas por evaporación.....	38

5.4 Fase 4: Análisis de prefactibilidad económica para evaluar el potencial de las sales de litio y sodio en las aguas termales de Paipa en Boyacá. ....	40
6. Resultados y Análisis .....	41
6.1 Identificación de los manantiales de agua hidrotermal de interés en la zona de Paipa e Iza en Boyacá.....	41
6.2 Análisis de las propiedades químicas.....	57
6.2.1 Saturación .....	69
6.3 Evolución geoquímica de las aguas termales de Paipa e Iza en términos de una sucesión de divisiones químicas que experimentan las aguas por el modelo de evolución por evaporación. ..	73
6.4 Análisis de prefactibilidad económica .....	75
6.4.1 Comparación con el Salar de Atacama en Chile.....	84
7. Conclusiones.....	87
8. Recomendaciones.....	89
Referencias Bibliográficas.....	90

### Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Trabajos anteriores realizados en la zona de Paipa e Iza, Boyacá. ....	22
Tabla 2 Manantiales propuestos asociados a los sistemas geotérmicos de Paipa e Iza. ....	32
Tabla 3 Datos de los muestreos de manantiales asociados a los sistemas geotérmicos de Paipa e Iza en la época lluviosa. ....	42
Tabla 4 Datos de los muestreos de manantiales asociados a los sistemas geotérmicos de Paipa e Iza en la época seca. ....	42
Tabla 5 Temperatura de los manantiales de Paipa e Iza muestreados en época lluviosa y época seca. ....	54
Tabla 6 Conductividad de los manantiales de Paipa e Iza muestreados en época lluviosa y época seca. ....	55
Tabla 7 pH de los manantiales de Paipa e Iza muestreados en época lluviosa y época seca. ....	56
Tabla 8 Análisis de composición química de las muestras de agua de la época lluviosa. Concentraciones en mg/l. ....	59
Tabla 9 Análisis de composición química de las muestras de agua de la época seca. Concentraciones en mg/l. ....	65
Tabla 10 Datos termodinámicos de estado estándar (Energía Libre de Gibbs). ....	70
Tabla 11 Valores de Kps determinados para cada mineral. ....	70
Tabla 12 Valores de coeficiente de actividad ( $\gamma$ ) e IAP de los minerales de interés. ....	71
Tabla 13 Valores de saturación de los minerales de interés. ....	71
Tabla 14 Datos de caudales de la zona de estudio. ....	76

Tabla 15 Resultados de producción de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ con el caudal y la concentración media, valores de venta y años de recuperación del capital. ....	80
Tabla 16 Resultados de producción de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ con el caudal y la concentración máxima, valores de venta y años de recuperación del capital. ....	80
Tabla 17 Resultados de producción de $\text{Na}_3(\text{HCO}_3)(\text{CO}_3)*2\text{H}_2\text{O}$ con el caudal y la concentración máxima, valores de venta y años de recuperación del capital. ....	81
Tabla 18 Resultados de producción de $\text{Na}_3(\text{HCO}_3)(\text{CO}_3)*2\text{H}_2\text{O}$ con el caudal y la concentración máxima, valores de venta y años de recuperación del capital. ....	82
Tabla 19 Resultados de producción de $\text{NaHCO}_3$ con el caudal y la concentración media, valores de venta y años de recuperación del capital. ....	82
Tabla 20 Resultados de producción de $\text{NaHCO}_3$ con el caudal y la concentración máxima, valores de venta y años de recuperación del capital. ....	83

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 A. Esquema del Sistema Geotérmico de Paipa. B1. Esquema del emplazamiento del cuerpo volcánico de Iza. B2. Perfil esquemático del cuerpo volcánico de Iza al presente, después de la erosión de las unidades sedimentarias. ....	26
Figura 2 Localización geográfica del área de estudio.....	29
Figura 3 La imagen A corresponde a la zona de estudio en Paipa y la imagen B a la zona de estudio en Iza, con la ubicación de los sitios muestreados en la presente investigación. ....	30
Figura 4 Formato utilizado para la toma de datos de cada manantial en el trabajo de campo. ....	33
Figura 5 La imagen A son las muestras recogidas en la época seca y la imagen B son las muestras de época seca. ....	33
Figura 6 Instrumento portátil de medición compacto y de alta precisión Multi 340i. Sonda de medidor de electrodos simple para pH SenTix41 (imagen inferior derecha), célula de medición TetraCon325 (imagen inferior izquierda).....	34
Figura 7 Algunos de los posibles caminos para el modelo de evolución por evaporación de aguas naturales de Hardie y Eugster (1970), modificado por Drever (1988). ....	38
Figura 8 Localización de los manantiales muestreados en Paipa, Boyacá sobre el mapa topográfico de la zona. ....	44
Figura 9 Localización de los manantiales muestreados en Iza, Boyacá sobre el mapa topográfico de la zona. ....	45
Figura 10 Manantiales muestreados en la época lluviosa: A: Pozo principal Salpa, B: Pozo Salpa 2, C: Pozo Azul, D: Vía Mina de Carbón, E: El Hervidero, F: Piscina Olitas G: Pozo Hotel Lanceros, H: Pozo Hotel Lanceros 2, I: Balneario público. ....	48

Figura 11 Manantiales muestreados en la época seca: A: Pozo Hotel Lanceros 2, B: Pozo Hotel Lanceros, C: Ojo del diablo, D: Lago Sochagota, E: Pozo Azul, F: Pozo Principal Salpa, G: Salpa 2 H: Salpa 3, I: Vía Mina de Carbón, J: El Batán-La Playa, K: El Hervidero, L: Sauzalito.....	49
Figura 12 Mapa geológico de la zona de estudio en el municipio de Paipa, Boyacá .....	51
Figura 13 Mapa geológico de la zona de estudio en el municipio de Iza, Boyacá. ....	53
Figura 14 Diagrama de Piper de las muestras de la época lluviosa .....	60
Figura 15 Diagrama de Stiff de las muestras de la época lluviosa .....	61
Figura 16 Diagrama de Stiff de las muestras El Hervidero y Olitas de la época lluviosa. ....	62
Figura 17 Diagrama de Schoeller-Berkaloff de las muestras de la época lluviosa.....	63
Figura 18 Diagrama de Piper de las muestras de la época seca.....	66
Figura 19 Diagrama de Stiff de las muestras de la época seca. ....	67
Figura 20 Diagrama de Stiff de las muestras Lago Sochagota, El Hervidero y Sauzalito de la época seca. ....	68
Figura 21 Diagrama de Schoeller-Berkaloff de las muestras de la época seca. ....	69
Figura 22 Resultado de la comparación en Excel de los valores de IAP y Kps.....	72
Figura 23 Algunos de los posibles caminos para el modelo de evaporación de aguas naturales de Hardie y Eugster (1970), modificado por Drever (1988).....	75
Figura 24 Agrupación de los manantiales por sectores para el análisis de la prefactibilidad económica.....	76

### **Lista de Apéndices**

**Los apéndices están adjuntos y pueden ser visualizados en la base de datos de la Biblioteca**

#### **UIS**

Apéndice A. Imagen de las formas típicas del diagrama de Stiff. Tomado de Paris de Ferrer (2001).

Apéndice B. Imagen de los Métodos utilizados por el Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la UIS, para el análisis de las muestras de agua de la época lluviosa.

Apéndice C. Imagen de los Métodos utilizados por el Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la UIS, para el análisis de las muestras de agua de la época seca.

Apéndice D. Documento de Excel con los Cálculos de saturación y prefactibilidad económica.

Apéndice E. Documento Excel con los valores usados para determinar la evolución geoquímica.

Apéndice F. Documento Excel con los diagramas de barras de los resultados de los análisis químicos para ambas épocas.

Apéndice G. Documento en PDF con los resultados de los análisis químicos de la época lluviosa entregados por el Laboratorio de Consultas Industriales de la UIS

Apéndice H. Documento en PDF con los resultados de los análisis químicos de la época seca entregados por el Laboratorio de Consultas Industriales de la UIS

## Glosario

**Conductividad eléctrica:** es un parámetro utilizado para estimar el nivel de sales disueltas en el agua y el suelo. En el agua es su capacidad para conducir una corriente eléctrica, cuanto mayor es la concentración de sales disueltas, mayor es la conductividad eléctrica (Sela, 2019). La presencia de sales y minerales en el agua forma los iones electrolíticos que permiten el paso de la corriente eléctrica (Hanna Instruments, 2023).

**pH:** medida del grado de acidez o alcalinidad de una sustancia o una solución. Se mide en una escala de 0 a 14. En esta escala, un valor pH de 7 es neutro. Un valor pH de menos de 7 significa que es más ácida, y un valor pH de más de 7 significa que es más alcalina (Diccionario de Cáncer Del NCI, 2023). Es una propiedad importante de las soluciones acuosas porque afecta las propiedades químicas y bioquímicas, como las reacciones químicas, las condiciones de equilibrio y la toxicidad biológica (Marion et al., 2011).

## Resumen

**Título:** Evolución geoquímica de las aguas termales de Paipa e Iza, Boyacá y evaluación de su potencial económico en sales de Litio y Sodio \*

**Autor:** Sindy Tatiana Vera Vera y Laura María Contreras Labarces\*\*

**Palabras Clave:** Sales de Litio, Sales de Sodio, Aguas Termales, Evolución Geoquímica

**Descripción:** Los sistemas geotérmicos de Paipa e Iza son uno de los más destacados en Boyacá, por esta razón se realizó el estudio geoquímico de estas aguas termales y se evaluó su potencial económico en sales de litio y sodio, las cuales son indispensables en diversas industrias del mercado actual. Para llevar a cabo este proyecto se realizó un análisis de composición química en el Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la UIS. Durante la época lluviosa se muestrearon nueve sitios y durante la época seca siete de ellos para realizar la comparativa y cinco adicionales que no fue posible muestrear en la época anterior. El muestreo se realizó siguiendo la metodología del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y las mediciones de los parámetros físicos como temperatura, conductividad y pH fueron tomadas con el instrumento portátil de medición compacto y de alta precisión Multi 340i. Los manantiales muestreados en este proyecto fueron Hotel Lanceros, Hotel Lanceros 2, Ojo del Diablo, Salpa principal, Salpa 2, Salpa 3, Pozo Azul, Vía Mina de Carbón, El Hervidero, Olitas, Lago Sochagota, El Batán-La Playa, ubicados en Paipa y Balneario público Erika y Sauzalito, ubicados en Iza. Los análisis químicos de estos permitieron realizar una interpretación de su composición, la cual arrojó que estas aguas son ricas principalmente en cloro, sulfato, sodio, potasio y calcio, siendo así clasificada como aguas cloruradas de sodio y potasio o sulfatadas de sodio. Comparando el índice de actividad iónica y el producto de solubilidad del mineral se determina que en todos los escenarios la solución está subsaturada, pero en cuanto a la prefactibilidad económica se pondera bajo el principio de un caudal promedio y de un caudal máximo con la finalidad de proponer un escenario financiero preliminar y se concluye un escenario favorable para las sales de Sodio y el Carbonato de Litio.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Mario García González. Geólogo, Ph.D. Codirectores: Jaiber Leonardo Villamizar. Geólogo. Luz Yolanda Vargas Fiallo. Química M.Sc

### Abstract

**Title:** Geochemical evolution of the thermal waters in Paipa and Iza, Boyacá, and evaluation of their economic potential in lithium and sodium salts \*

**Author(s):** Sindy Tatiana Vera Vera y Laura María Contreras Labarces \*\*

**Key Words:** Lithium Salts, Sodium Salts, Hot Springs, Geochemical Evolution

**Description** The geothermal systems of Paipa and Iza are among the most prominent in Boyacá. Therefore, a geochemical characteristics. of these thermal waters was conducted to evaluate their economic potential in lithium and sodium salts, which are essential in various industries of the current market. The chemical composition analysis was performed at the Industrial Consulting Chemical Laboratory of UIS. Nine sites were sampled during the rainy season, and seven of them were sampled during the dry season for comparison, along with an additional five sites that were not sampled previously. The sampling followed the methodology of the Institute of Hydrology, Meteorology, and Environmental Studies, and physical parameters such as temperature, conductivity, and pH were measured using the compact and highly precise Multi 340i portable measuring instrument. The sampled springs in this project included Hotel Lanceros, Hotel Lanceros 2, Ojo del Diablo, Salpa principal, Salpa 2, Salpa 3, Pozo Azul, Vía Mina de Carbón, El Hervidero, Olitas, Lago Sochagota, El Batán-La Playa, located in Paipa, and Balneario público Erika and Sauzalito, located in Iza. The chemical analyses allowed for the interpretation of their composition, revealing that these waters are primarily rich in chlorine, sulfate, sodium, potassium, and calcium, classified as sodium and potassium chloride waters or sodium sulfate waters. Comparing the ionic activity index and the mineral solubility product, it was determined that the solution is undersaturated in all scenarios. However, considering economic feasibility, a preliminary financial scenario is proposed based on average and maximum flow rates. The conclusion is a favorable scenario for sodium salts and lithium carbonate.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicochemistry. School of Geology. Director: Mario Garcia González. Geologist, Ph. D. Co-directors: Jaiber Leonardo Villamizar. Geologist. Luz Yolanda Vargas Fiallo. Chemistry M.Sc

## Introducción

El potencial en sales de litio y sodio de las aguas termales de la región de Paipa e Iza en Boyacá se justifica evaluarlo dada la alta demanda de las sales de estos elementos en la industria del vidrio, alimentos, farmacéutica, química y energética actual (Dirección General de Desarrollo Minero, 2018). Esta evaluación requiere entender primero el análisis químico de las aguas termales que se establece mediante el modelo de evolución de aguas por evaporación en términos de una sucesión de divisiones químicas y así realizar una evaluación de viabilidad económica para una posible explotación de sales de litio y sodio mediante el proceso de la evaporación natural y/o artificial.

El departamento de Boyacá cuenta con diferentes sistemas termales, entre los cuales se destacan los de Paipa e Iza, que son los involucrados en esta investigación e igualmente han sido un atractivo turístico muy beneficioso para la región durante muchos años (Alcaldía de Paipa, 2015). El sistema geotérmico de Paipa se ubica en el altiplano de la Cordillera Oriental de los Andes, al sur de la localidad del mismo nombre y desde el río Chicamocha al oeste del Anticlinal Tibasosa-Toledo (Alfaro, et al., 2020). Estas fuentes de agua además de ser termales tienen una composición muy diversa en elementos como sodio, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, potasio, calcio, magnesio, litio, hierro, nitratos y fosfatos como se presenta en esta investigación.

Las aguas termales de Paipa han sido utilizadas como fuente de sales de sulfato de sodio por la empresa Salpa S.A, que obtenía sales de sodio en su forma mineral Mirabilita, la cual se comercializaba en diversas industrias destacándose las de vidrio, papel, alimentos, entre otras. Por este motivo, despertaron interés para ser analizadas y conocer más a fondo su composición.

El Grupo de Investigación y Exploración de Recursos Geotérmicos del Servicio Geológico Colombiano reportó por primera vez la presencia de litio en las aguas termales de la región de

Paipa y adicionalmente este grupo ha realizado diversos estudios del sistema geotérmico, incluyendo geología, geoquímica, geofísica y modelos geotérmicos (Alfaro, 2002).

El presente proyecto se llevó a cabo a través de la recolección de muestras en época seca (verano) y época lluviosa (invierno). Durante la época lluviosa se muestrearon nueve sitios y durante la época seca siete de ellos para realizar la comparativa y cinco adicionales que no fue posible muestrear en la época anterior, con el fin de comparar la composición y concentración de los iones y elementos presentes en las aguas termales del sistema geotérmico hidrotermal de Paipa e Iza, por medio del análisis de composición de aguas realizado en el Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Todo esto con el fin de evaluar el potencial de sales de sodio y litio presente, y así determinar la posible existencia de un depósito que sea explotable, económicamente rentable y ambientalmente sostenible.

### **1. Justificación y planteamiento del problema**

Estudios preliminares realizados por Alfaro y otros del Servicio Geológico Colombiano (2002, 2005, 2012, 2020) han reportado la presencia de sales de sulfato de sodio formadas por evaporación de las aguas termales de Paipa. Así mismo informaron anomalías de litio hasta de 20 ppm en varias fuentes termales de la región reportadas en Alfaro 2002.

La presente propuesta de investigación busca entender la evolución geoquímica de las aguas termales en los principales manantiales del sistema termal dependiendo de su evaporación. Es de interés para la industria la investigación sobre las sales de sodio en sus formas de carbonatos, bicarbonatos y sulfatos, ya que son empleadas en la elaboración de vidrio, jabones, materiales cerámicos, en la industria farmacéutica, entre otras. Además, junto al litio, son considerados minerales estratégicos de alta demanda y precio en el mercado mundial (Atalayar, 2023).

El litio es un componente clave para las baterías de los vehículos eléctricos cuya extracción y tratamiento está en alta demanda a nivel mundial debido al auge que han tenido en los últimos años. En 2022, mantuvo su papel principal en el mercado y en la cadena de suministro de las nuevas energías esto con el objetivo de poder satisfacer su enorme demanda dentro de una transición hacia la economía verde (García, 2022).

El comercio de sales de litio y sodio es una parte esencial de la economía de muchos países productores de estos recursos naturales (CEPAL, 2023). Un mayor conocimiento de estas aguas termales y análisis de estas sales pueden ayudar a mejorar la posible extracción, lo que puede tener un impacto positivo no solo en la economía local de la zona de estudio sino a nivel nacional.

De acuerdo con lo anterior, esta investigación se orienta alrededor de la siguiente pregunta: ¿Las sales de litio y sodio asociadas a las fuentes termales de Paipa e Iza, Boyacá tienen el potencial de convertirse en un posible depósito sostenible?

Es de gran importancia realizar una investigación sobre este tema debido a la alta demanda de las sales de litio y sodio, y así evaluar del potencial de un posible depósito de estas sales por evaporación de las aguas termales. De esta manera, se hace necesario realizar una revisión de la prefactibilidad económica del posible depósito, planteando un escenario de producción, precios y retorno de la inversión.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

-Determinar la evolución geoquímica y evaluar el potencial económico de las sales de Litio y Sodio asociadas a las fuentes termales de Paipa e Iza, en el departamento de Boyacá.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Identificar los manantiales de agua hidrotermal de interés en la zona de Paipa e Iza en Boyacá.
- Analizar las propiedades químicas de los manantiales con influencia hidrotermal de Paipa e Iza en Boyacá.
- Determinar la evolución geoquímica de las aguas termales de Paipa e Iza en términos de una sucesión de divisiones químicas que experimentan las aguas por el modelo de evolución de aguas por evaporación.
- Evaluar el potencial económico de las sales de litio y sodio en las aguas termales de Paipa e Iza en Boyacá mediante un análisis de prefactibilidad.

### 3. Marco Referencial

#### 3.2 Marco Conceptual

##### 3.2.1 Alcalinidad

Capacidad ácido neutralizante de los solutos en una muestra de agua. Consiste en la suma de especies químicas de carbonato y no carbonado titulables en una muestra (Lurry, 2023). Se define como  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + (\text{OH}^-)$  y suele ser el resultado de la meteorización de rocas carbonatadas y la disolución de dióxido de carbono atmosférico. Una vez que se agrega ácido al agua que contiene alcalinidad, los iones de hidrógeno del ácido reaccionan principalmente con las especies de carbonato; los carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) existen en el agua a un pH superior a 8,3 pero un pH de 4,3 la alcalinidad total es igual a cero. Todos los bicarbonatos se convierten en ácido carbónico y el agua ya no tiene capacidad amortiguadora (Sela, 2020).

##### 3.2.2 Producto de solubilidad y saturación

El producto de solubilidad ( $K_{ps}$ ) es la constante de equilibrio para el proceso de disociación de un sólido insoluble que se disocia en iones. A partir de él, se conoce si se formará o no precipitado cuando se disponga de ambos iones en disolución (Drever, 1988). La expresión familiar para la constante de equilibrio se puede derivar fácilmente de las expresiones para el potencial químico y la energía libre de Gibbs. La constante de equilibrio está relacionada con la energía libre estándar ( $\Delta G$ ) de reacción mediante la ecuación:

$$\ln K_{eq} = \frac{-\Delta G^\circ}{RT} \quad (1)$$

Donde  $R$  es la constante de los gases ( $8,3143 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$  o  $1,98717 \text{ cal} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), y  $T$  es la temperatura.

##### 3.2.3 Actividad de las especies iónicas

Para convertir las concentraciones que da el laboratorio en actividades, se debe calcular el coeficiente de actividad de cada ion para esa muestra. El coeficiente de actividad depende del radio

y la carga del ion (Sánchez, 2017). La fuerza iónica se define entonces de la siguiente manera según la ecuación:

$$I = \frac{1}{2} \sum m_i z_i^2 \quad (2)$$

*Donde  $m_i$  es la concentración en mEq y  $z_i$  es la carga del ion.*

Según Drever (1988) la Teoría de Debye-Hückel es un modelo que permite coeficientes de actividad para iones individuales que se calcularán sobre la base del efecto que deben tener las interacciones iónicas sobre la energía libre. Si se supone que los iones son cargas puntuales, las interacciones son completamente electrostáticas y los iones alrededor de cualquier ion en particular siguen una distribución de Boltzmann y es posible derivar la ecuación:

$$\log \gamma_i = - \frac{Az_i^2 \sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} \quad (3)$$

*Donde  $A$  es una constante que depende solo de presión y temperatura,  $z_i$  es la carga del ion particular,  $m_i$  es la concentración molar unitaria e  $I$  es la fuerza iónica de la solución.*

Y así el Producto de la Actividad Iónica (IAP) se define como:

$$m_i \gamma_i * m_b \gamma_b * m_n \gamma_n = IAP \quad (4)$$

*Donde  $m$ , es la concentración molar de cada componente del mineral y  $\gamma$ , es el coeficiente de actividad y se halla con la fórmula 3 que implica la actividad de las especies iónicas.*

Según Drever (1988), se puede saber si una disolución está saturada o no conociendo el valor del cociente de reacción entre el producto de la Actividad Iónica (IAP) frente al  $K_{ps}$  que indica la solubilidad de un compuesto iónico, es decir:

$$\text{Saturación} = IAP/K_{PS} \quad (5)$$

### 3.1 Estado del arte

**Tabla 1**

*Trabajos anteriores realizados en la zona de Paipa e Iza, Boyacá.*

<b>Título</b>	<b>Año</b>	<b>Autor / Entidad</b>	<b>Aporte</b>
<b>Viajes científicos a los Andes ecuatoriales</b>	1829	Boussingault	Describió el gran contenido mineral las aguas termales de Paipa. El autor concluyó que existen diferencias composicionales. Además, relacionó la temperatura de las aguas con su altura sobre el nivel del mar.
<b>Análisis químico de las aguas termales de Paipa</b>	1929	Navia y Barriga	El estudio estuvo enfocado en el aprovechamiento industrial de estas aguas. También hicieron una descripción geológica del área, con la existencia de bancos salinos y la caracterización fisicoquímica y radiactiva de algunos manantiales.
<b>Estudio de reconocimiento de los recursos geotérmicos de la República de Colombia</b>	1982	Organización Latinoamericana de Energía (OLADE)	Paipa fue seleccionada como área de gran interés geotérmico por la presencia de vulcanismo, alteración hidrotermal, abundancia y temperatura de descarga de sus manantiales termales y la cobertera sedimentaria que propicia la permeabilidad.
<b>Feasibility study report of Geothermal Power Plant for Instituto Colombiano de Energía Electrica (Electrificadora de Boyacá).</b>	1983	Japan Consulting Institute (JCI) / Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (ICEL),	Realizó un estudio de factibilidad para la construcción de una planta geotérmica de 15 MWe en Boyacá, concluyeron que es posible encontrar un reservorio geotérmico promisorio para la explotación geotérmica en Paipa.
<b>Evaluación Geotérmica en el Área de Paipa, Basada en Técnicas Isotópicas, Geoquímica y Aspectos Estructurales</b>	1988	Ferreira y Hernández	Postularon un sistema geotérmico para Paipa con fuente de calor, reservorio, capa sello, zona de recarga, zona de descarga y temperatura *(1).
<b>Características petrográficas y geoquímicas de las rocas volcánicas de Iza (Departamento de Boyacá, Colombia)</b>	1990	Rincón y Romero	Propusieron para el sistema geotérmico de Iza: fuente de calor, reservorio, capa sello, zona de recarga, zona de descarga y temperatura **(2).
<b>Estudios geotérmicos con técnicas isotópicas y geoquímicas en América Latina</b>	1992	Bertrami et al.	Plantearon un sistema de alta temperatura para Paipa. Con los datos geoquímicos e isotópicos obtenidos se realizó un modelo geotérmico de la zona y se concluyó que al menos la parte sur posee un prometedor potencial geotérmico.
<b>Exploración y caracterización de los recursos de aguas termominerales en el municipio de Paipa</b>	1998	Rodríguez	Este trabajo fue orientado a determinar la demanda anual y la disponibilidad de agua termal, que fueron estimadas en 350.000 m <sup>3</sup> y 480.000 m <sup>3</sup> , respectivamente.

<b>Geoquímica del sistema geotérmico de Paipa</b>	2002	Alfaro / INGEOMINAS	Concluyó que, en el sistema de Paipa, la concentración de las especies acuosas sigue dos patrones principales de distribución, que permiten postular dos fuentes a la composición final de los manantiales. Una de ellas es el banco salino, la otra fuente es el fluido geotérmico.
<b>Cartografía geológica y estructural sector sur del municipio de Paipa</b>	2003	Velandia	Describió las principales unidades y estructuras geológicas que afloran en la zona, así como su distribución, generación y relación con las fuentes termales, también determinó zonas promisorias para exploración.
<b>The paipa volcano, Eastern cordillera of Colombia, South America : volcanic stratigraphy</b>	2005	Pardo, Cepeda y Jaramillo	Establecieron la estratigrafía del volcán de Paipa, además el análisis geológico, el mapa de trazado estratigráfico y la petrografía de campo para definir unidades eruptivas y procesos piroclásticos del transporte y de la deposición para reconstruir historia volcánica de la actividad.
<b>Modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico de Paipa</b>	2005 y 2010	Alfaro et al. / SGC	Enunciaron las características del sistema geotérmico de Paipa, a partir de criterios geológicos, estructurales, geofísicos, geoquímicos, isotópicos y vulcanológicos. Además, propusieron un sistema geotérmico ubicado en una pequeña caldera formada por el volcán Paipa, una fuente de calor magmática.
<b>Contribuciones al modelo conceptual sistema geotérmico de Paipa</b>	2012	Alfaro et al. / SGC	Algunos de los aportes más relevantes fueron relacionados con la recarga regional al sistema geotérmico, la fuente de calor, la alteración hidrotermal y la fuente salina superficial.
<b>Paipa Geothermal System, Boyacá: Review of exploration studies and conceptual model. The Geology of Colombia.</b>	2020	Alfaro et al. / SGC	Posiblemente, es el artículo más completo realizado sobre la zona. Algunos de sus principales aportes fueron: la producción de calor radiogénico, geoquímica de fluidos, temperatura superficial, sondeos eléctricos verticales (SEV), datos gravimétricos y magnéticos, modelo geológico 3D limitado por la geofísica de campos potenciales y modelo magnetotélúrico e interpretación geológica.

Para la realización de este proyecto se tuvieron en cuenta las publicaciones referentes al sistema geotérmico de Paipa e Iza, el vulcanismo de la zona, su análisis estructural, cartografía y su geoquímica. La cronología de los trabajos realizados sobre este sistema geotérmico se muestra en la tabla anterior.

En este trabajo de investigación están involucrados dos sistemas geotérmicos de interés en el país, el de Paipa y el de Iza ambos en Boyacá, y el estudio se basa en los análisis fisicoquímicos de la fase acuosa de los manantiales de cada uno de ellos y que se eligieron como de interés para este trabajo de investigación.

A continuación, se amplía la información sobre el estudio de Ferreira y Hernández (1988) que postularon un sistema geotérmico para Paipa con fuente de calor, reservorio, capa sello, zona de recarga, zona de descarga y temperatura:

\*(1) En 1988, Ferreira y Hernández, realizaron una evaluación geotérmica en el área de Paipa basada en técnicas isotópicas, geoquímica y aspectos estructurales, con base en esta postularon un sistema con las siguientes características: 1) Fuente de calor: posible existencia de una intrusión magmática dentro de la secuencia sedimentaria, inferida de la presencia de varios cuerpos volcánicos en la superficie (Olitas y Pan de Azúcar). 2) Reservorio: se propone la Formación Une, su secuencia predominantemente arenosa (areniscas blancas) y permeable favorece la existencia de reservorios. Además, los estratos de la Formación Labor y Tierna forman acuíferos someros mediante su permeabilidad secundaria por fracturación. 3) Capa sello: secuencia arcillosa a partir del Grupo Churuvita. 4) Zona de recarga: la Formación Une, debido a su posición estructural y topográfica. 5) Zona de descarga: alimentada por fluidos profundos conducidos por fallamiento profundo de tipo normal con dirección NE-SW que proporciona los canales de escape para los fluidos. 6) Temperatura geoquímica del reservorio mayor a 200°C, calculada a partir de geotermómetros acuosos alcalinos. La Figura 1A, representa un esquema de la información anterior pero propuesta por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá en 2021 para esquematizar el sistema geotérmico de Paipa. Donde (1) área de recarga, (2) reservorio, (3) fuente de calor, (4) sello, (5) tránsito, (6) fuente de las sales y (8) zona de descarga.

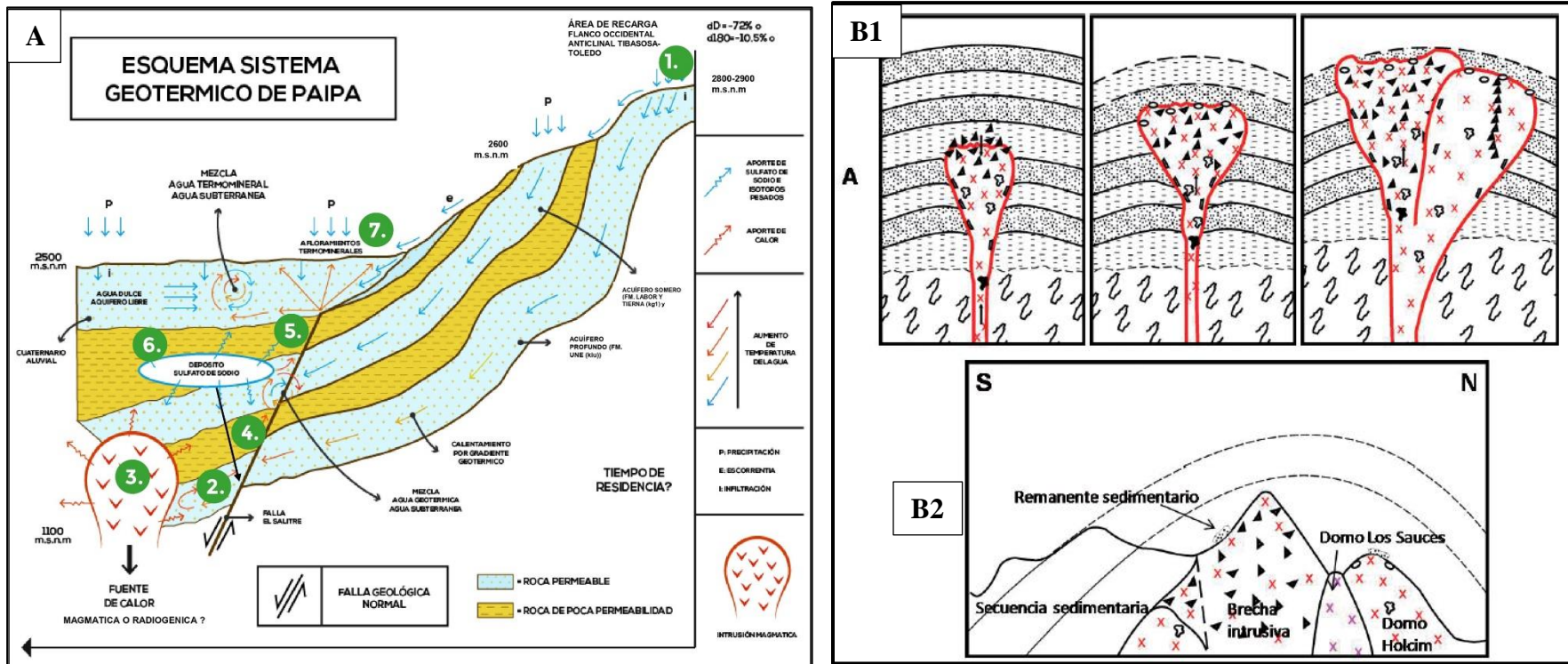
También se amplía la información de Rincón y Romero (1990) que propusieron para el sistema geotérmico de Iza: fuente de calor, reservorio, capa sello, zona de recarga, zona de descarga y temperatura:

\*\* (2) Por su parte, en 1990, Rincón y Romero, estudio referido en Alfaro (2002), proponen para el sistema geotérmico de Iza lo siguiente: 1) Fuente de calor: Magmática, responsable por la anomalía térmica regional. 2) Reservorio: arenitas de la Formación Tierna, con permeabilidad primaria. Existe la posibilidad de un reservorio alternativo conformado por las tobas del domo, con permeabilidad secundaria. 3) Capa Sello: Lodolitas con intercalaciones de arenitas cuarzosas de la Formación Guadalupe. 4) Zona de recarga: partes altas de la zona, fuertemente fracturadas con litologías que permiten la infiltración del agua. 5) Zona de descarga: manantiales asociados a zonas de debilidad, producidas por el cruce entre fallas. 6) Temperatura: a partir de la identificación de minerales de alteración de alta temperatura en el cuerpo dómico (biotita y epidota), se propone un sistema de temperatura alta, mayor a 250°C.

En la Figura 1 B1, se representa un esquema de la génesis del cuerpo volcánico de Iza, propuesto por Monsalve et al. (2011) en el que se muestra el ascenso de un primer pulso de magma, disrupción, formación de la brecha intrusiva y posterior ascenso de pulsos de magmas que dan lugar a la formación de domos, mientras que la figura B2 muestra un perfil esquemático del cuerpo volcánico de Iza al presente, después de la erosión de las unidades sedimentarias.

Figura 1

A. Esquema del Sistema Geotérmico de Paipa. B1. Esquema del emplazamiento del cuerpo volcánico de Iza. B2. Perfil esquemático del cuerpo volcánico de Iza al presente, después de la erosión de las unidades sedimentarias.



Nota. Figura A. Tomado de: Informe de Gestión de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (2021). Figura B. Tomada de: Monsalve et al. (2011).

## **4.2. Geología**

### ***4.2.1 Marco Geológico***

El municipio de Paipa se localiza en la parte axial de la Cordillera Oriental de Colombia, en una región cuyo basamento lo componen rocas metamórficas y sedimentarias del Paleozoico, así como intrusivas y extrusivas del Jurásico que afloran en el Macizo de Floresta, hacia el NE de Paipa. En la zona afloran rocas sedimentarias jurásicas en estructuras regionales como el Anticlinal de Arcabuco. Sobre el basamento ocurre la secuencia cretácica sedimentaria con diferencias en facies y espesores, por el control tectónico de fallas como Boyacá y Soapaga. Se presentan igualmente rocas del Paleógeno y depósitos no consolidados del Neógeno y Cuaternario que cubren parte del área (Velandia, 2003).

Según la compilación de Jaramillo (2001) en Alfaro (2002), las estructuras más importantes a nivel regional son el Sinclinal de Tunja, en cuya sección norte del flanco oriental, se localiza la zona de estudio, y las fallas Boyacá y Soapaga. Estas fallas son inversas y tienen la dirección NE-SW que corresponde a la directriz tectónica de la Cordillera Oriental. La primera de ellas está ubicada al norte y la segunda en la región central de la zona de estudio. Se observan otras estructuras importantes como el Anticlinorio de Arcabuco, el Bajo estructural de Chicamocha, la Falla El Salitre con orientación NNE-SSW y considerada como normal, la Falla Sochagota con la misma orientación que la anterior y de carácter normal hacia el sur de Paipa e inversa al oriente del lago del mismo nombre.

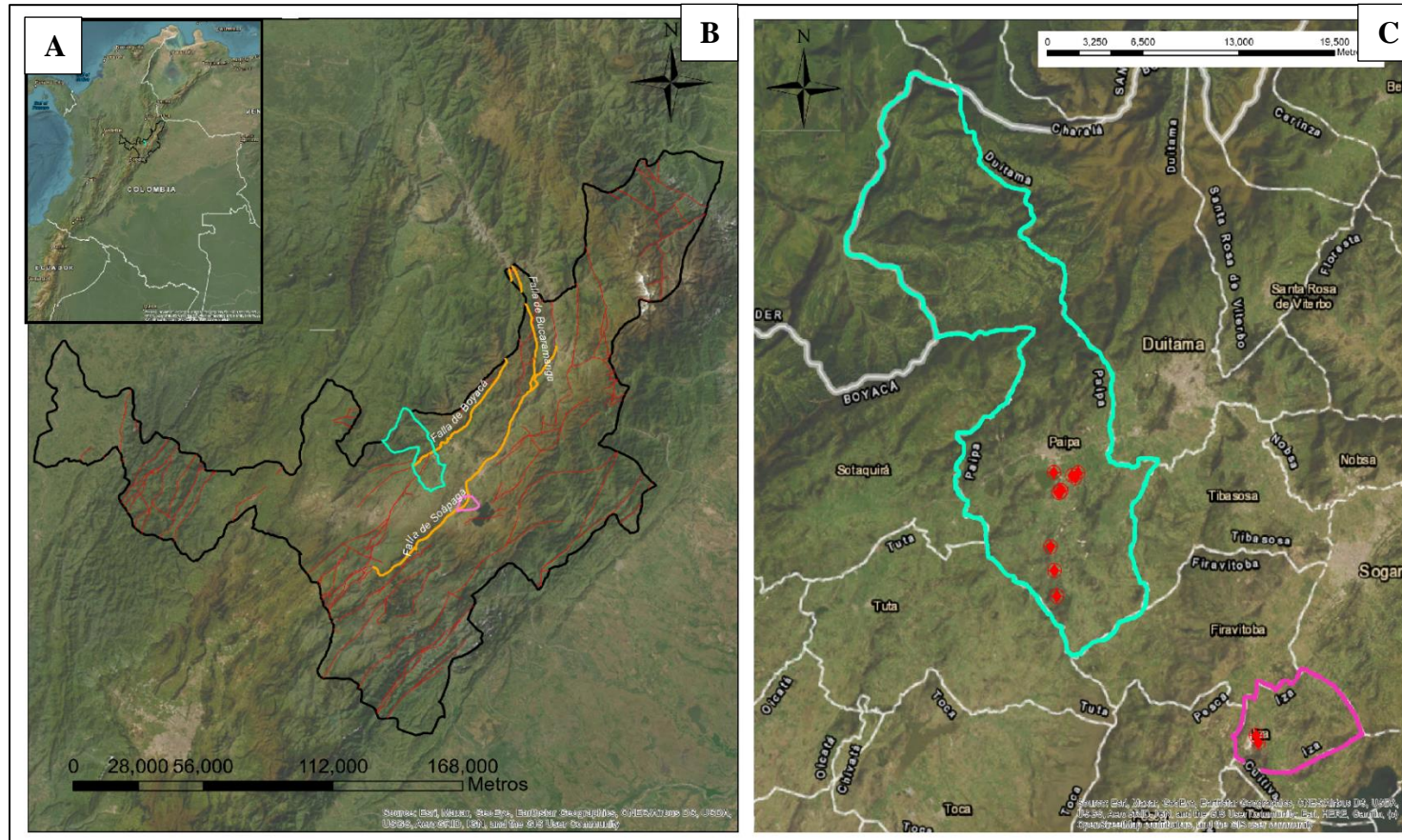
Según Jaramillo (2001) en Alfaro (2002), en los estudios reportados, el Cuaternario está conformado por depósitos aluviales, coluviales y glaciares. Los depósitos aluviales que forman los Valles de Paipa e Iza, se originan en los ríos Salitre y Tota y están constituidos por arcillas gravas y arenas. Los depósitos coluviales se encuentran en la margen izquierda del Río Tota y están

asociados a un cuerpo intrusivo registrado en Iza. Los depósitos glaciares, localizados en la margen izquierda de la Laguna de Tota y cerca de los municipios de Cuítiva y Tota están constituidos por bloques de arenisca. El Terciario constituido por sedimentos arcillosos, depositados en condiciones continentales, a este pertenecen las formaciones, Bogotá, Socha Inferior, Socha Superior, Concentración, Andesitas y Tilatá. El Cretácico Inferior y Medio, de origen marino, constituido por las formaciones, Ritoque, Los Medios, Une, Churuvita, Conejo, Ermitaño, Plaeners, Labor y Tierna y Guaduas. El Mesozoico, está representado en la formación Arcabuco (Alfaro, 2002).

El tipo de rocas que domina el área son sedimentarias (formadas por acumulación de sedimentos o fragmentos) con capas permeables (o penetrables) por el agua, como son las areniscas y de edad Cretácica. En la zona se encuentra un antiguo domo de lava también llamado complejo volcánico de Paipa-Iza que, aunque hoy está inactivo, probablemente tiene rocas calientes bajo la superficie que sirven como fuente de calor del sistema geotérmico, lo cual está relacionado directamente con la presencia de aguas termales en el área (Alfaro, Rueda & Matiz, 2019).

**Figura 2**

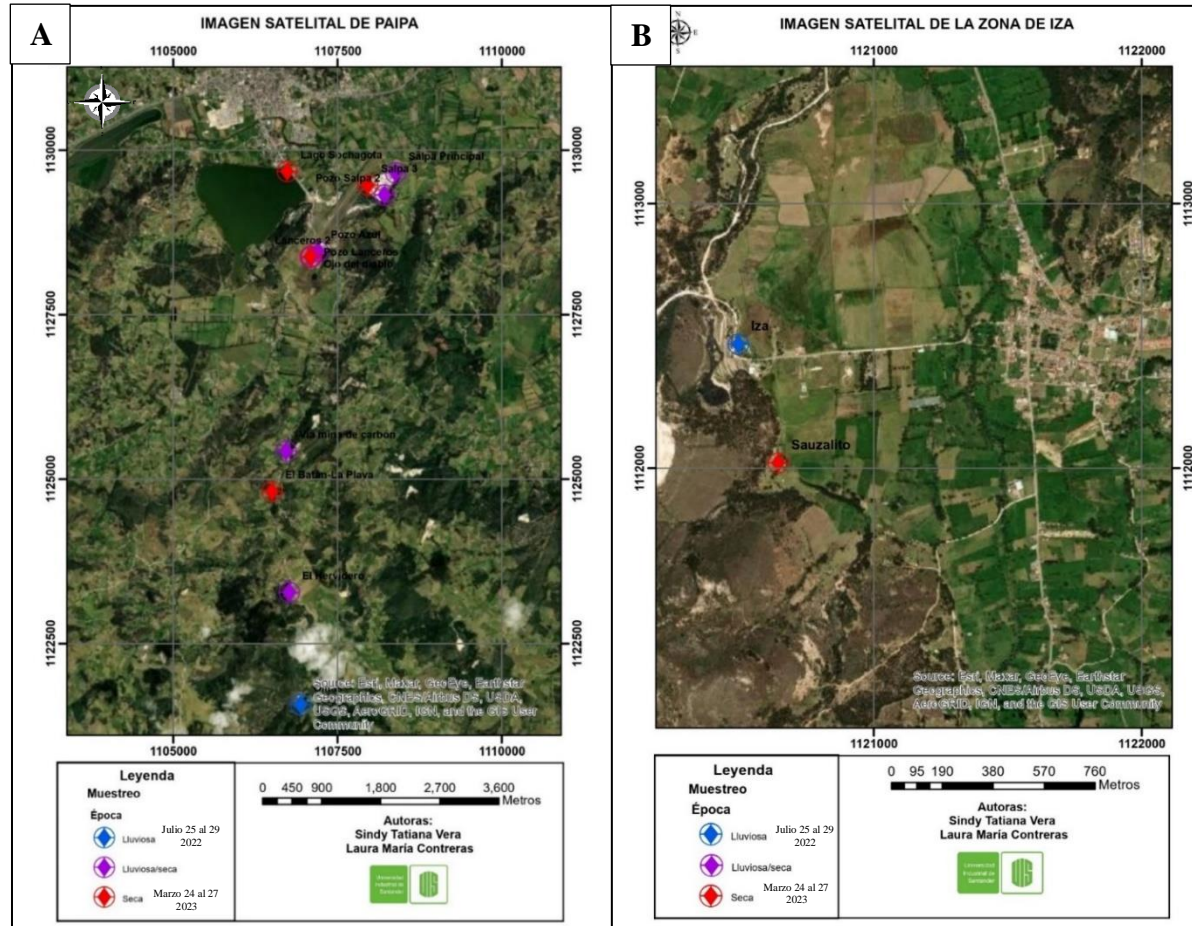
*Localización geográfica del área de estudio.*



*Nota.* Mapa base tomado de Google Earth Pro y editado por las autoras. A) Localización regional: Colombia, B) Limitado en negro el Departamento de Boyacá con las principales fallas en color naranja (Falla Boyacá, Falla Bucaramanga, Falla Soapaga), C) Zona de estudio en el municipio de Paipa, polígono de color verde y zona de estudio en el municipio Iza polígono color rosado. Los puntos rojos representan los manantiales muestreados.

**Figura 3**

La imagen A corresponde a la zona de estudio en Paipa y la imagen B a la zona de estudio en Iza, con la ubicación de los sitios muestreados en la presente investigación.



Nota. Mapa base tomado de Google Earth Pro y editado por las autoras.

## 5. Metodología

El proyecto de investigación se desarrolla en varios escenarios de trabajo, cada uno de ellos de vital importancia en el éxito del proyecto. Se plantearon principalmente cuatro fases de trabajo, cada una dividida en actividades para dar cumplimiento a los objetivos específicos. A continuación, se describen cada una de las fases de trabajo:

### **5.1 Fase 1: Identificación de los manantiales de agua hidrotermal de interés en la zona de Paipa e Iza en Boyacá.**

Lo primero que se definió fue la organización del trabajo de campo, mediante la planeación de las salidas en cada época y los sitios de muestreo de campo. Esto con el fin de tener una mayor estructuración del trabajo y lograr el muestreo de los manantiales en su totalidad. Los manantiales propuestos están asociados a los sistemas geotérmicos de Paipa e Iza y se obtuvieron de la publicación de Alfaro (2002), anteriormente citada, y del visor del Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales del Servicio Geológico Colombiano. Igualmente, se tuvo en cuenta que fueran muestras representativas del sistema geotérmico del área de trabajo, que estuvieran accesibles para la realización del muestreo y que tuvieran la menor contaminación posible.

Para lo anterior, se realizó el inventario de los manantiales, se georreferenciaron con las coordenadas dadas en Alfaro (2002) en la plancha topográfica hoja N° 171-IVD (Tibasosa) del departamento de Boyacá, esto para el sistema de Paipa; y la plancha topográfica hoja N° 192-IA (Iza) del mismo departamento para Iza, con ayuda del programa de Avenza para llegar al lugar donde se ubicó el punto de muestreo. En el lugar de ocurrencia, se registró la información y se organizó en un formato (Figura 4) para mejorar la eficacia del muestreo. Los datos definidos para tomar en el muestreo fueron: coordenadas del punto de muestreo, altura del lugar, temperatura del manantial, conductividad eléctrica del agua y pH.

El muestreo se llevó a cabo en dos épocas diferentes del año, una denominada *época lluviosa* en la fecha del 25 al 29 de julio del 2022 cuya temperatura ambiente fue de 13°C y la otra *época seca* en la fecha del 24 al 27 de marzo del 2023 cuya temperatura ambiente fue de 18°C.

Durante la época lluviosa se muestrearon nueve sitios, y durante la época seca siete de los nueve para realizar la comparativa, exceptuando dos por los bajos valores de las concentraciones de los iones de interés para este estudio y cinco adicionales que no fue posible muestrear en la época anterior debido a las condiciones climáticas. La metodología usada para el muestreo de agua fue tomada del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2018) de Colombia.

El muestreo de los manantiales en *época lluviosa* y en *época seca* se llevó a cabo de acuerdo con la metodología definida anteriormente. En ella se incluye el recorrido, los implementos necesarios para la toma de datos y demás insumos para el transporte de las muestras. En cada punto se recolectó una muestra en frascos de vidrio ámbar de 500 ml, equipados con tapa de seguridad. Se registraron los datos y la información relevante de la muestra en cada uno de los puntos de muestreo.

## Tabla 2

*Manantiales propuestos asociados a los sistemas geotérmicos de Paipa e Iza.*

<b>Manantial</b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>
Pozo principal Salpa	1129659	1108430
Vía Mina de Carbón	1125321	1107168
Pozo Blanco	1128385	1107051
Pozo Azul	1128438	1107282
Pozo Hotel Lanceros	1128311	1107100
Ojo del Diablo	1128391	1107122
El Batán – La Playa	1124826	1106534
Piscina Olitas	1121616	1106979
El Hervidero	1123278	1106807
Lago Sochagota	1105250	1127800
Iza – Erika	1112384	1120513
Iza – Batán	1109660	1121122

*Nota.* Fuente: Alfaro (2002); Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales del Servicio Geológico Colombiano.

**Figura 4**

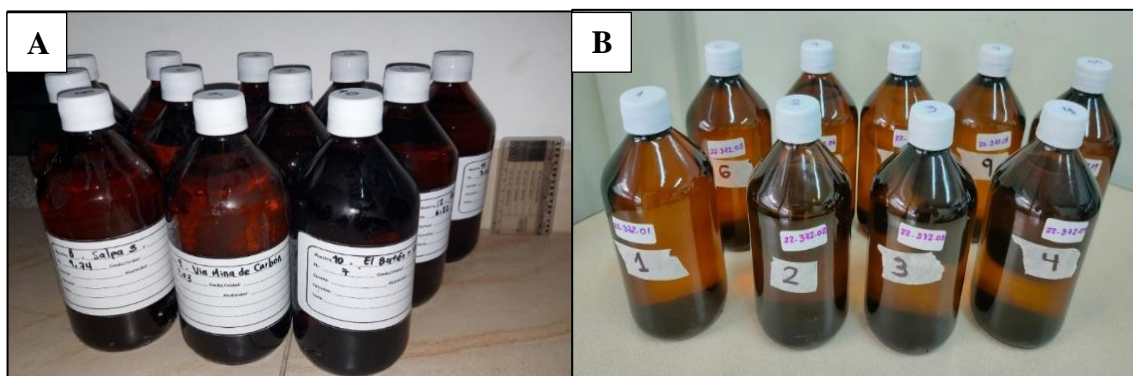
*Formato utilizado para la toma de datos de cada manantial en el trabajo de campo.*

N° muestra	Fecha de recolección	Manantial	Latitud	Longitud	Altura (msnm)	T°	pH	Conductividad	Obs.

*Nota.* Datos que se tomados durante el muestreo en cada manantial.

**Figura 5**

*La imagen A son las muestras recogidas en la época seca y la imagen B son las muestras de época seca.*



Las propiedades físicas se obtuvieron en la fase de campo del muestreo. Estas fueron tomadas por el instrumento portátil de medición compacto y de alta precisión Multi 340i que tiene una longitud en mm de 172, una anchura en mm de 80, una altura en mm de 37 y un peso de aproximadamente 0.3 kg. Este puede efectuar mediciones del pH, del oxígeno y de la conductibilidad, de manera rápida y con alta fiabilidad. En esta investigación se usó para medir la temperatura del manantial y el pH con la sonda de medidor de electrodos simple para pH SenTix41, con la que se pueden efectuar mediciones del valor pH con y sin sensor térmico. El instrumento

reconoce el tipo del sensor empleado y conecta automáticamente al modo correcto para la medición de temperatura. Las mediciones de la conductibilidad fueron efectuadas con el Multi 340i, pero únicamente con la célula de medición TetraCon325.

### Figura 6

*Instrumento portátil de medición compacto y de alta precisión Multi 340i. Sonda de medidor de electrodos simple para pH SenTix41 (imagen inferior derecha), célula de medición TetraCon325 (imagen inferior izquierda).*



## 5.2 Fase 2: Análisis de las propiedades químicas de las aguas con influencia hidrotermal de Paipa e Iza en Boyacá.

Para las propiedades químicas de las muestras de agua de cada muestreo, se determinaron los iones y parámetros que se solicitaron al Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la UIS para obtener los análisis químicos de cada una, y con estos resultados dar cumplimiento con los objetivos del trabajo de investigación.

Los iones y metales solicitados al laboratorio para el primer muestreo (época lluviosa) fueron: alcalinidad total de  $\text{CaCO}_3$ , Na, K, Ca, Mg, Li, Sr, B, Fe, Mn,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4$ , F, Si y  $\text{SiO}_2$  y los iones y metales solicitados al laboratorio para el segundo muestreo (época seca) fueron: alcalinidad,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ , Na, K, Ca, Mg, Li, Fe, Mn,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{PO}_4$  y  $\text{NO}_3$ . En el apéndice B y C se puede apreciar la norma o método utilizado para la determinación de cada ion o metal.

En esta investigación, se empleó una metodología que involucró el uso de dos análisis, uno en época lluviosa y el otro en época seca. Los segundos análisis debido a su mayor exactitud fueron

los datos usados para concluir los resultados de este trabajo. Este enfoque se basó en la premisa de que los segundos análisis son más precisos, confiables y proporcionan resultados más completos en comparación con los análisis iniciales, debido a la menor cantidad de precipitación de la segunda época.

Inicialmente, se llevó a cabo un análisis con las muestras de época lluviosa. Sin embargo, se identificó la necesidad de complementar la información con un segundo muestreo. Aunque los primeros análisis nos permitieron comparar y definir que el escenario de la época seca era el más favorable para concluir los resultados de interés de saturación y prefactibilidad económica debido a que en la época seca se incluía una alcalinidad más específica y el valor de nitratos y fosfatos para evaluar el grado de contaminación de la muestra.

Por lo anterior se definió que para los resultados de la fase 3 y 4 de la metodología, los resultados presentados son con los valores de concentraciones de la época seca, porque en casos como el de la alcalinidad para la fase 3 y las mayores concentraciones de sodio, litio y sulfato usadas en la fase 4 permiten analizar el mejor escenario de interés en el área de estudio. Es importante destacar que el uso de segundos análisis no solo mejoró la calidad de los resultados, sino que también aumentó la validez y confiabilidad de las conclusiones obtenidas.

También se eligieron los segundos resultados porque el balance iónico de las muestras acuosas de la época seca dio valores más aceptables según Hem (1985) quien estableció que errores excediendo el 5% son inevitables algunas veces cuando el total de cationes y aniones es menor que 5 mEq/L. El balance depende de los compuestos disueltos y sus reacciones de disociación y al obtenerse un valor aceptable los resultados son más confiables y aunque es posible que en una solución acuosa haya otros compuestos iónicos disueltos, que afecten el balance iónico, cada

compuesto disuelto contribuirá con sus propios iones y se mantendrá un equilibrio global en la solución.

La interpretación geoquímica se basó en métodos gráficos y relaciones en diagramas de composiciones químicas como el diagrama de Piper, el diagrama de Stiff y el diagrama de Schoeller-Berkaloff, con el fin de representar gráficamente los resultados de la composición fisicoquímica de las aguas y analizar sus tendencias y clasificaciones.

El diagrama de Piper es una representación gráfica de la composición química de las aguas. En él se exhiben la sumatoria de los cationes y aniones mayoritarios en mEq/l mediante el uso de dos triángulos, y permite clasificar geoquímicamente la naturaleza de las aguas (sulfatada, bicarbonatada, clorurada) en el rombo central.

El diagrama de Stiff permite visualizar diferentes tipos de agua y, en forma simultánea, permite dar idea del grado de mineralización que está dado por el ancho de la gráfica (Custodio & Llamas, 2001).

El diagrama de Schoeller-Berkaloff usa una escala semilogarítmica para representar las características fisicoquímicas de las aguas y las concentraciones de iones, permite identificar el tipo o facie hidroquímica al que pertenece cada agua en función del anión y catión que posee mayor concentración. Este diagrama es apropiado para estudiar la evolución temporal de las aguas en un mismo sitio y su variación composicional en diferentes localidades (Lillo, 2007).

Para obtener cada uno de estos diagramas, se utilizó el programa *Diagrammes*, el cual es un *software* de uso libre, creado por la Universidad de Avignon, Francia. Lo primero que se realizó fue cargar los resultados de concentraciones del laboratorio en Excel. Para esto, se utilizó la plantilla que viene con el programa y se descargó en el mismo aplicativo. A continuación, se ingresaron algunos campos como: nombre de la muestra, grupo (si las muestras deben agruparse

en aguas similares), medidas tomadas en campo (temperatura en °C y pH) y concentraciones en mg/l, tomadas en el laboratorio que son los iones del análisis fisicoquímico realizado. Posteriormente, se importaron estos datos en la plantilla de Excel, teniendo en cuenta que al subirlos en el *software* se escoge la opción de que estos se encuentran en unidades de mg/l.

Seguidamente el programa organiza los datos ingresados en una tabla dada dentro del aplicativo, donde los iones se agrupan en aniones y cationes, también realiza la operación del balance iónico de los datos para cada muestra y otros cálculos necesarios para los diagramas. Una vez los datos se cargaron y guardaron correctamente, se procedió a poner el nombre de cada manantial en un grupo diferente para que pudiera generarse una leyenda en las gráficas. Por último, se generaron los tres diagramas presionando el botón correspondiente a cada uno, el *software* los genera de forma automática y solo resta arreglar preferencias de diseño o de datos que quieran mostrarse o descartar en cada uno de los gráficos.

A partir de las concentraciones químicas, se determinó el grado de saturación de las muestras de agua con respecto a un mineral particular en este caso Mirabilita, Thenardita, Nahcolita y Trona. Se comparó la constante de equilibrio para la solubilidad del mineral (constante de producto de solubilidad), con el producto de las actividades reales de los iones presentes en la solución. De este modo, se estableció una relación llamada Índice de Saturación (SI). Donde IAP es el producto de actividad iónica y  $K_{ps}$  indica la solubilidad de un compuesto iónico, es decir, cuanto menor sea su valor menos soluble será el mineral. De la comparación del producto de actividad iónica con la constante de producto de solubilidad Drever (1988), se puede determinar:

\*  $IAP > K_{ps}$ . La solución está sobresaturada y se puede producir la cristalización

\*  $IAP = K_{ps}$ . La solución está saturada y en equilibrio.

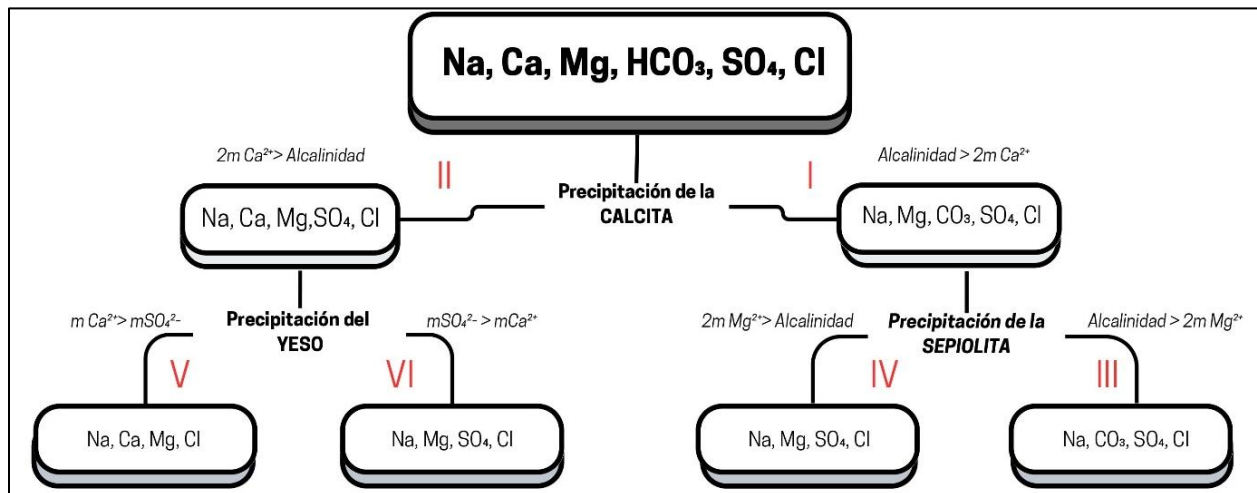
\*  $IAP < Kps$ . La solución está subsaturada y mayor cantidad de la fase sólida puede ser disuelta.  
El sistema no está en equilibrio y no puede estar presente ningún sólido.

**5.3 Fase 3: Determinar la evolución geoquímica de las aguas termales de Paipa e Iza en términos de una sucesión de divisiones químicas que experimentan las aguas por el modelo de evolución de aguas por evaporación.**

En la Figura 7 se observa el modelo de Hardie-Eugster que interpreta el modelo de evolución de la química de las aguas que experimentan evaporación en términos de una sucesión de divisiones químicas. El modelo presenta algunas trayectorias posibles para el modelo de evaporación de aguas naturales (modificado de Hardie y Eugster, 1970 por Drever, 1988).

**Figura 7**

*Algunos de los posibles caminos para el modelo de evolución por evaporación de aguas naturales de Hardie y Eugster (1970), modificado por Drever (1988).*



Se determinó la evolución geoquímica de cada muestra de agua mediante el modelo de evaporación de las aguas naturales modificado de Hardie y Eugster (1970), por Drever (1988). Con casi todas las aguas naturales, el primer mineral en precipitar, y por lo tanto en causar la primera división química, es la calcita. El camino seguido por la solución depende entonces de si la concentración de calcio (en equivalentes) es mayor o menor que la alcalinidad del carbonato (en

equivalentes), es decir, si  $2mCa^{2+}T$  es mayor o menor que  $mHCO_3^-T + 2mCO_3^{2-}T$ , donde T significa concentración analítica total. En un agua cuyos solutos se derivan completamente del  $CO_2$  atmosférico y disolución de calcita, la ecuación de balance de carga es

$$2mCa^{2+} + mH^+ = mHCO_3^- + 2mCO_3^{2-} + mOH^- \quad (5)$$

Si  $mH^+$  y  $mOH^-$  son despreciables,

$$2mCa^{2+} = mHCO_3^- + 2mCO_3^{2-} \quad (6)$$

Si la concentración de calcio es menor que la alcalinidad, esencialmente todo el calcio se eliminará de la solución durante la evaporación y la solución tenderá a convertirse en una salmuera de carbonato alcalino (ruta I). Por el contrario, si la concentración de calcio es mayor que la alcalinidad, esencialmente todas las especies de carbonato se eliminarán de la solución, y la solución tenderá hacia una salmuera de sulfato o cloruro casi neutra (ruta II). Siguiendo el camino I, la siguiente división química es causada por la precipitación de sepiolita. La precipitación de sepiolita, y por lo tanto la división química, involucra tres especies,  $Mg^{2+}$ ,  $HCO_3^-$  y  $H_4SiO_4$ . En la práctica, el criterio importante es si  $2mMg^{2+}T$  es mayor o menor que la alcalinidad del carbonato que queda después precipitación de la calcita. Si la concentración de magnesio (en equivalentes) es menor que la alcalinidad restante (ruta III), el agua se convertirá en una salmuera de carbonato alcalino. Si la concentración de magnesio es mayor que la alcalinidad restante (camino IV), la solución tenderá hacia una salmuera de sulfato o cloruro libre de carbonato (Drever, 1988).

En la vía II, el próximo mineral que probablemente precipitará es el yeso. Si la concentración de calcio que queda después de la precipitación de calcita es mayor que la concentración de sulfato (ruta V), la salmuera resultante tendrá cloruros de Na, Ca y Mg como solutos principales. Si la concentración de sulfato es mayor que la del calcio restante, la salmuera

resultante tendrá cloruro y sulfato como aniones principales y sodio y magnesio como cationes principales (Drever, 1988).

#### **5.4 Fase 4: Análisis de prefactibilidad económica para evaluar el potencial de las sales de litio y sodio en las aguas termales de Paipa en Boyacá.**

En esta fase se plantea un análisis de prefactibilidad económica de producción estimada en kilogramos por año de Thenardita, Nahcolita, Trona y Litio en la zona de estudio de Paipa e Iza. Estos minerales han sido definidos en este trabajo como minerales comerciales que se pueden precipitar en la zona de acuerdo con los resultados de concentración química obtenidos. De esta manera con el precio unitario de cada mineral se calculan las ventas preliminares y se evalúa el potencial económico y los años de recuperación de acuerdo con la inversión que se halla con el coeficiente de retorno (*Costo capital/Ventas anuales*).

Las variables usadas para este análisis fueron: las concentraciones químicas de los iones de interés obtenidas en la fase 2 de la época seca, que son los valores más favorables para plantear un escenario con viabilidad, debido a que se tienen las concentraciones más altas de los iones de interés, para Paipa se usan los caudales promedio y máximos de la publicación de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá en la cartilla “Sistema de aguas termominerales del municipio de Paipa” del 2021, y al no tener valores específicos de caudales para la zona de las piscinas de Iza, se usa los caudales publicados por la Alcaldía Municipal de Iza Boyacá (2000) en el esquema de ordenamiento territorial municipio de Iza y el precio unitario de los minerales a analizar, junto con un valor de inversión capital que se plantea recuperar.

El primer mineral por analizar es la Thenardita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), esto se concluye porque tiene mayor valor comercial que la Mirabilita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) que, aunque es muy similar a la Thenardita este está decahidratado. La Thenardita es un mineral que contiene sulfato de sodio y

se encuentra en depósitos de evaporitas. También la trona es un mineral de sodio que desempeña un papel importante en la producción de carbonato de sodio, control de la contaminación del aire, tratamiento de aguas residuales, producción de productos químicos y fabricación de fertilizantes (McLanahan, 2019) por lo que se analiza el posible escenario.

El mineral Nahcolita ( $\text{NaHCO}_3$ ), se podría obtener de la evaporación de las aguas termales de Paipa dadas las concentraciones encontradas de Na y  $\text{HCO}_3$ . Sin embargo, se debe considerar que dada su elevada solubilidad el mineral está más presente en yacimientos situados en zonas áridas; en donde la actividad hidrotermal actúa sobre plagioclasas, haciendo que el sodio se disuelva en los fluidos hidrotermales los cuales una vez alcanzan la superficie son precipitados como sales de sulfato de sodio.

El siguiente mineral es el Carbonato de Litio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) es el compuesto base más importante entre las sales de Li y su demanda representa el 60% de los productos. Su importancia principalmente radica en que es fácil de purificar y sirve para la conversión de otras sales de litio tales como, LiCl, LiBr y LiOH- $\text{H}_2\text{O}$  y otros compuestos (Millas, 2018).

## **6. Resultados y Análisis**

### **6.1 Identificación de los manantiales de agua hidrotermal de interés en la zona de Paipa e Iza en Boyacá.**

La Tabla 3 recopila los datos obtenidos en el muestreo de la época lluviosa y la Tabla 4 los datos obtenidos en el muestreo de la época seca, se presenta el nombre los manantiales, las coordenadas, altura, fecha de recolección, temperatura, pH y conductividad.

El área de estudio del municipio de Paipa se encuentra al sur de la cabecera municipal y el área de estudio de Iza se encuentra al Oeste de la cabecera municipal.

**Tabla 3**

*Datos de los muestreos de manantiales asociados a los sistemas geotérmicos de Paipa e Iza en la época lluviosa.*

No.	Manantial	Latitud	Longitud	Altura (msnm)	Fecha Recolección	T°	pH	Conductividad ( $\mu$ S/cm)
<b>SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA</b>								
SL1-01	Pozo principal Salpa	1129662	1108420	2464	26/07/22	20,3	6,5	45400
SL1-02	Pozo Salpa 2	1129328	1108248	2514	26/07/22	23,8	9,78	36400
SL1-03	Pozo Azul	1128472	1107236	2522	26/07/22	47,2	6,97	42900
SL1-04	Vía Mina de Carbón	1125321	1107168	2542	26/07/22	58,5	7,1	39900
SL1-05	El Hervidero	1123285	1106800	2527	27/07/22	19,3	4,17	190
SL1-06	Piscina Olitas	1121580	1106971	2591	27/07/22	24,4	6,12	170
SL1-07	Pozo Hotel Lancers	1128381	1107124	2480	27/07/22	56,9	6,98	41600
SL1-08	Pozo Hotel Lancers 2	1128384	1107136	2499	27/07/22	59,5	7,18	40700
<b>SISTEMA GEOTÉRMICO DE IZA</b>								
SL1-09	Balneario público Erika	1112468	1120503	2545	27/07/22	30,4	7,28	3040

**Tabla 4**

*Datos de los muestreos de manantiales asociados a los sistemas geotérmicos de Paipa e Iza en la época seca.*

No.	Manantial	Latitud	Longitud	Altura (msnm)	Fecha Recolección	T°	pH	Conductividad ( $\mu$ S/cm)
<b>SISTEMA GEOTÉRMICO DE PAIPA</b>								
SL2-01	Pozo Hotel Lancers 2	1128384	1107136	2499	25/03/23	57,6	6,97	43040
SL2-02	Pozo Hotel Lancers	1128381	1107124	2480	25/03/23	49,1	6,69	44420
SL2-03	Ojo del diablo	1107122	1128391	2480	25/03/23	45,6	6,86	43510
SL2-04	Lago Sochagota	1129683	1106770	2513	26/03/23	21,2	10,16	1776
SL2-05	Pozo Azul	1128472	1107236	2522	26/03/23	51,2	6,88	43550
SL2-06	Pozo Principal Salpa	1129662	1108420	2464	26/03/23	20,6	6,41	45750
SL2-07	Salpa 2	1129328	1108248	2514	26/03/23	27,1	9,66	56800
SL2-08	Salpa 3	1129475	1107997	2514	26/03/23	28,3	9,74	55630
SL2-09	Vía Mina de Carbón	1128482	1107244	2542	26/03/23	59,6	7,03	42010
SL2-10	El Batán-La Playa	1124820	1106538	2553	26/03/23	72,3	7	20580
SL2-11	El Hervidero	1123285	1106800	2527	26/03/23	25,1	3,66	268
<b>SISTEMA GEOTÉRMICO DE IZA</b>								
SL2-12	Sauzalito	1112019	1120653	2554	26/03/23	32,6	6,22	2498

El primer grupo de manantiales se caracteriza por tener un rango de temperatura de (20-29°C), este grupo está conformado por los pozos de Salpa (principal, 2 y 3), estos poseen los valores máximos de conductividad (45000 a 57000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y por ende de salinidad.

El segundo grupo está ubicado en el sector ITP-Hotel Lanceros, estos manantiales presentan una temperatura superior (45-59°C), son Pozo Azul, Ojo del Diablo y Pozo Hotel Lanceros 1 y 2, igualmente tienen valores de conductividad moderadamente altos (40000 a 44000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). También fue muestreado el lago Sochagota que está ubicado a unos 2 kilómetros al suroeste del centro de Paipa, presenta una temperatura de 21°C y posee el valor de pH más elevado (10,1).

Más al sur encontramos los manantiales Vía Mina de Carbón y el Batán – la Playa, este último posee la temperatura máxima registrada (72°C). Por último, en la zona se encuentran dos manantiales aislados, el Hervidero, el cual presenta el valor de pH más bajo (3,6) y Olitas, estos son los de menor temperatura (19-25°C), e igualmente poseen los valores más bajos de conductividad (170 a 190  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y por ende de salinidad.

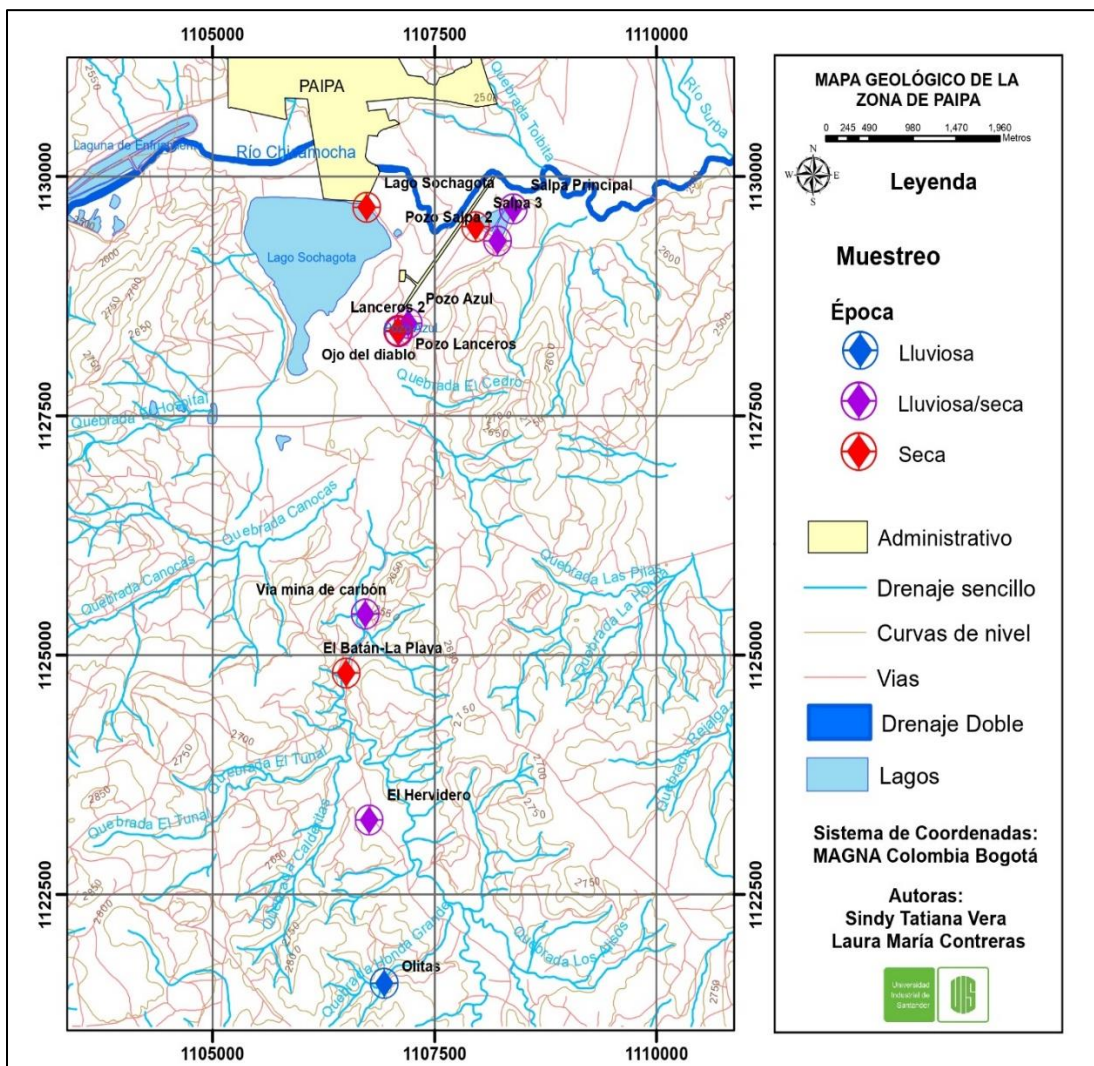
En la zona de Iza se encuentran dos manantiales, el Balneario público Erika y Sauzalito, los cuales tienen un rango de temperatura de (30-33°C), y sus valores de conductividad son bajos (2400 a 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) por ende su salinidad también.

En la Figuras 8 y 9, se presenta la localización de los manantiales muestreados en Paipa e Iza respectivamente, sobre el mapa topográfico del área de estudio que permite visualizar los principales drenajes y las vías de acceso. En total durante la época lluviosa se muestrearon nueve sitios, y durante la época seca siete de los nueve anteriores para realizar la comparativa, exceptuando dos (Olitas en Paipa y Balneario Público Erika en Iza) por los bajos valores de las concentraciones de los iones de interés para este estudio que se obtuvieron en el primer análisis y

que se decidieron descartar para muestrear cinco puntos adicionales de interés: Salpa 3, Lago Sochagota, Ojo del diablo, El Batán- La Playa, pertenecientes a Paipa y Sauzalito en Iza, que permiten ampliar la información anterior y conocer nuevos escenarios que aumenten el potencial económico y de saturación de las aguas termales.

**Figura 8**

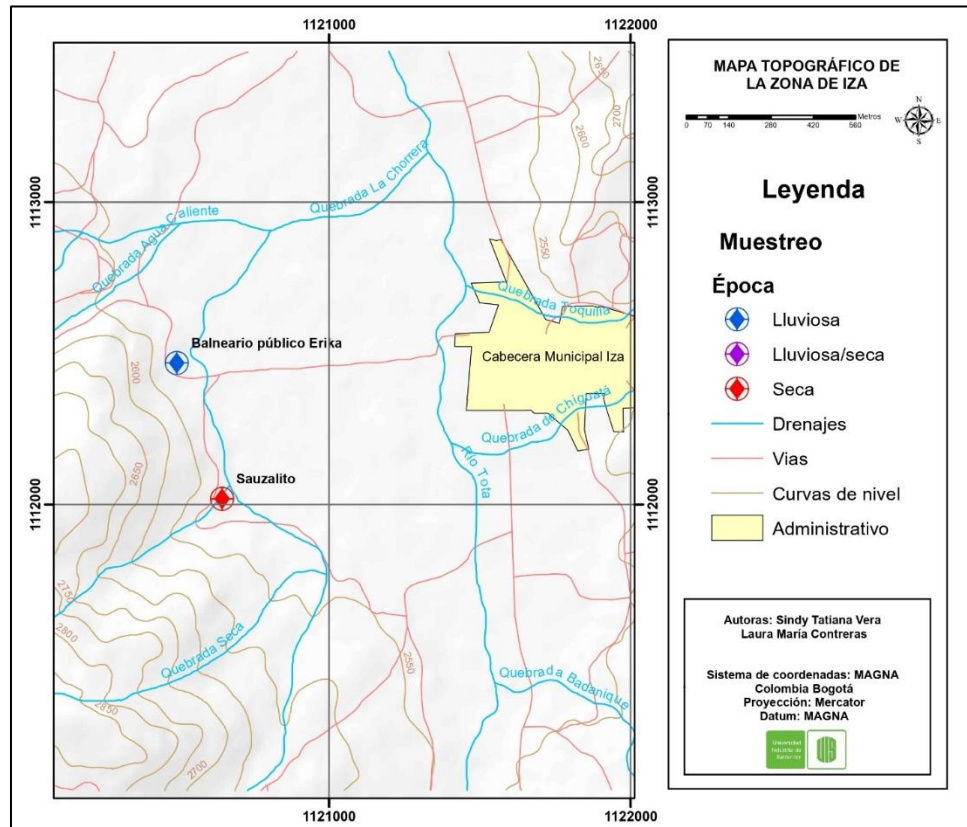
*Localización de los manantiales muestreados en Paipa, Boyacá sobre el mapa topográfico de la zona.*



*Nota.* Mapa editado por autoras; cartografía base tomada de la plancha 171VD1 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

**Figura 9**

*Localización de los manantiales muestreados en Iza, Boyacá sobre el mapa topográfico de la zona.*



*Nota.* Mapa editado por autoras; cartografía base tomada de la plancha 192IA del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

En las Figuras 10 y 11 se presentan las fotografías de cada manantial muestreado en ambas épocas. Las fotografías de los manantiales fueron tomadas con la aplicación Timestamp Camera Free, la cual en la esquina izquierda superior muestra una brújula de orientación, y en la esquina izquierda inferior un mapa de localización. Al tomar una foto los datos de la esquina derecha inferior se añaden automáticamente, siendo la fecha y la hora de la fotografía, la orientación, el municipio, el departamento, la altitud, velocidad en la cámara y el índice (valor designado por la aplicación de manera automática para indicar el filtro o fuente con el que se tomó).

**Pozo Salpa Principal (Figuras 10A y 11F).** Está localizado en la parte trasera de la antigua planta SALPA (Sales de Paipa). En los alrededores del lugar también se observa gran cantidad de sal precipitada. Se encuentra sobre la Fm. Tilatá (areniscas conglomeráticas, conglomerados de gravas a cantos bien redondeados, arcillas rojas y capas de turba).

**Pozo Salpa 2 (Figuras 10B y 11G).** Está localizado al costado de la antigua planta SALPA (Sales de Paipa). En el manantial se puede observar la cantidad de sal precipitada en los bordes del manantial. Se encuentra sobre la Fm. Tilatá (areniscas conglomeráticas, conglomerados de gravas a cantos bien redondeados, arcillas rojas y capas de turba).

**Salpa 3 (Figura 11H).** Está localizado a un costado de la antigua planta SALPA (Sales de Paipa). Se encuentra sobre depósitos aluviales compuestos por gravas y arcilla limosa lacustre.

**Pozo Azul (Figuras 10C y 11E).** Está localizado en el ITP (Instituto Termal de Paipa). Es una piscina natural de aproximadamente 750m<sup>2</sup>, la cual tiene salida y entrada continua de fluido que se da mediante celdas de convección. El color azulado del agua se debe a la presencia de algas. Se encuentra sobre depósitos aluviales compuestos por gravas y arcilla limosa lacustre.

**Olitas (Figura 10F).** Está localizado unos metros arriba de la antigua piscina Olitas. Este manantial está localizado en la margen derecha de la vía La Playa – Tuta. El manantial alimenta la piscina y la quebrada El Salitre (Jaramillo, 2001). Se encuentra sobre un cuerpo intrusivo (andesitas).

**Ojo del Diablo (Figura 11C).** Está localizado al lado del hotel Lanceros, en un pozo circular en medio del manantial Pozo Hotel Lanceros. Se encuentra sobre depósitos aluviales compuestos por gravas y arcilla limosa lacustre.

**Vía Mina De Carbón (Figuras 10D y 11I).** Está localizado al margen derecho de la carretera, es una piscina natural de forma alargada. Se encuentra sobre depósitos aluviales compuestos por gravas y arcilla limosa lacustre.

**El Hervidero (Figuras 10E y 11K).** Está localizado al margen derecho de la carretera. Se encuentra sobre la Fm. Tilatá (areniscas conglomeráticas, conglomerados de gravas a cantos bien redondeados, arcillas rojas y capas de turba).

**Pozo Hotel Lanceros (Figuras 10G y 11B).** Está localizado al lado del hotel lanceros, alrededor del pozo ojo de diablo. Se encuentra sobre depósitos aluviales compuestos por gravas y arcilla limosa lacustre.

**Pozo Hotel Lanceros 2 (Figuras 10H y 11A).** Está localizado al lado del hotel lanceros, al frente del pozo ojo de diablo. Se encuentra sobre depósitos aluviales compuestos por gravas y arcilla limosa lacustre.

**Balneario público Erika (Figura 10I).** Está localizado al margen derecho de la carretera, en el antiguo balneario Erika. Se encuentra sobre la Fm. Riolitas de Iza.

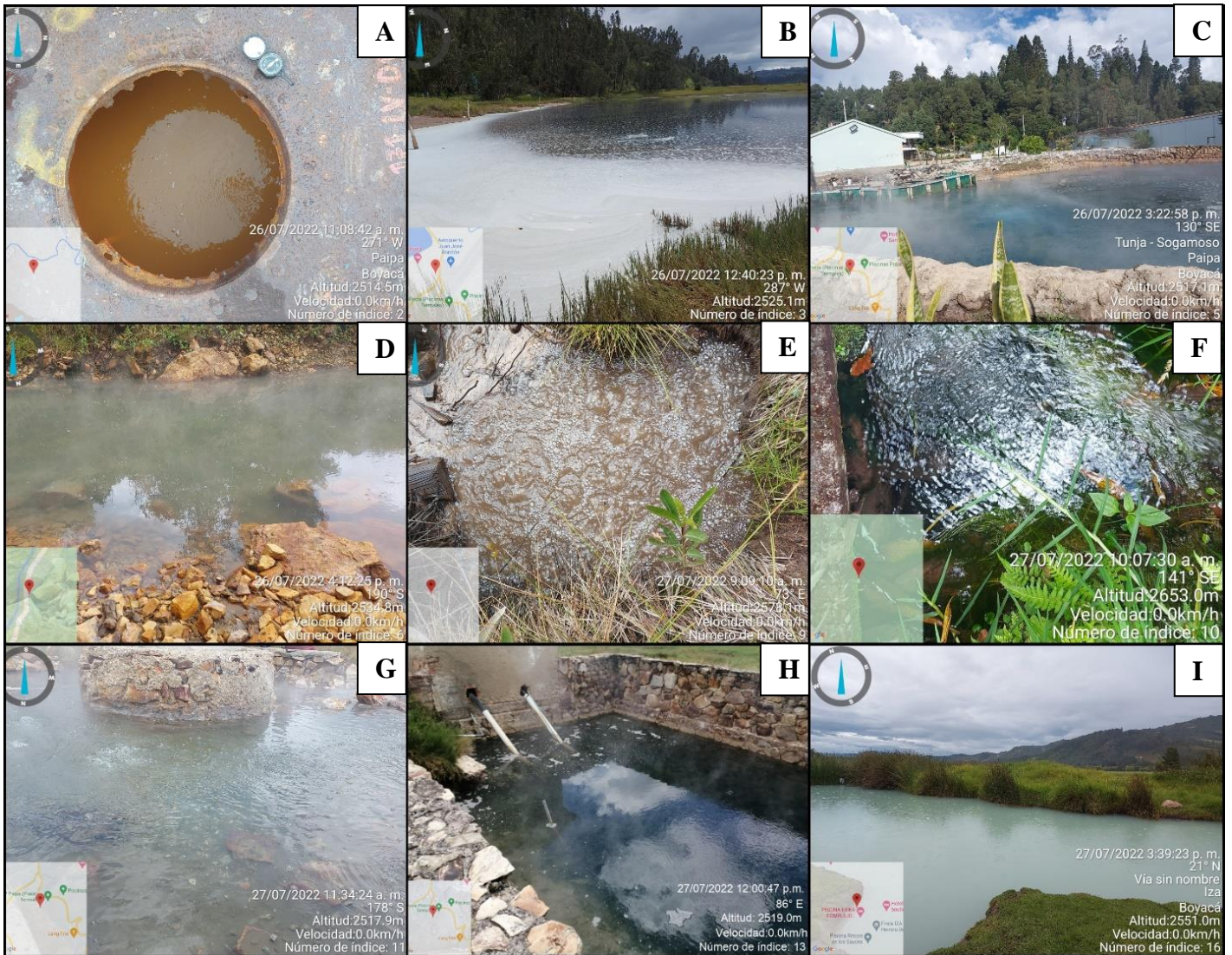
**Lago Sochagota (Figura 11D).** Está localizado al margen derecho de la carretera. Se encuentra sobre depósitos aluviales compuestos por gravas y arcilla limosa lacustre.

**El Batán - La Playa (Figura 11J).** Está localizado en un predio de la vereda La Playa, al margen derecho de la carretera vía La Playa - Tuta. Se encuentra sobre la Fm. Plaerners (porcelanitas, chert, shales, arcillas caoliníticas, areniscas cuarzosas, fosforita en proporciones variables).

**Sauzalito (Figura 11L).** Está localizado en el municipio de Iza. Se encuentra sobre el intrusivo de la Fm. Riolitas de Iza.

**Figura 10**

*Manantiales muestreados en la época lluviosa: A: Pozo principal Salpa, B: Pozo Salpa 2, C: Pozo Azul, D: Vía Mina de Carbón, E: El Hervidero, F: Piscina Olitas G: Pozo Hotel Lanceros, H: Pozo Hotel Lanceros 2, I: Balneario público.*



*Nota. Los manantiales de la letra A a la H pertenecen al municipio de Paipa y la letra I al municipio de Iza.*

**Figura 11**

*Manantiales muestreados en la época seca: A: Pozo Hotel Lanceros 2, B: Pozo Hotel Lanceros, C: Ojo del diablo, D: Lago Sochagota, E: Pozo Azul, F: Pozo Principal Salpa, G: Salpa 2 H: Salpa 3, I: Vía Mina de Carbón, J: El Batán-La Playa, K: El Hervidero, L: Sauzalito.*



*Nota.* Los manantiales de la letra A a la K pertenecen al municipio de Paipa y la letra L al municipio de Iza.

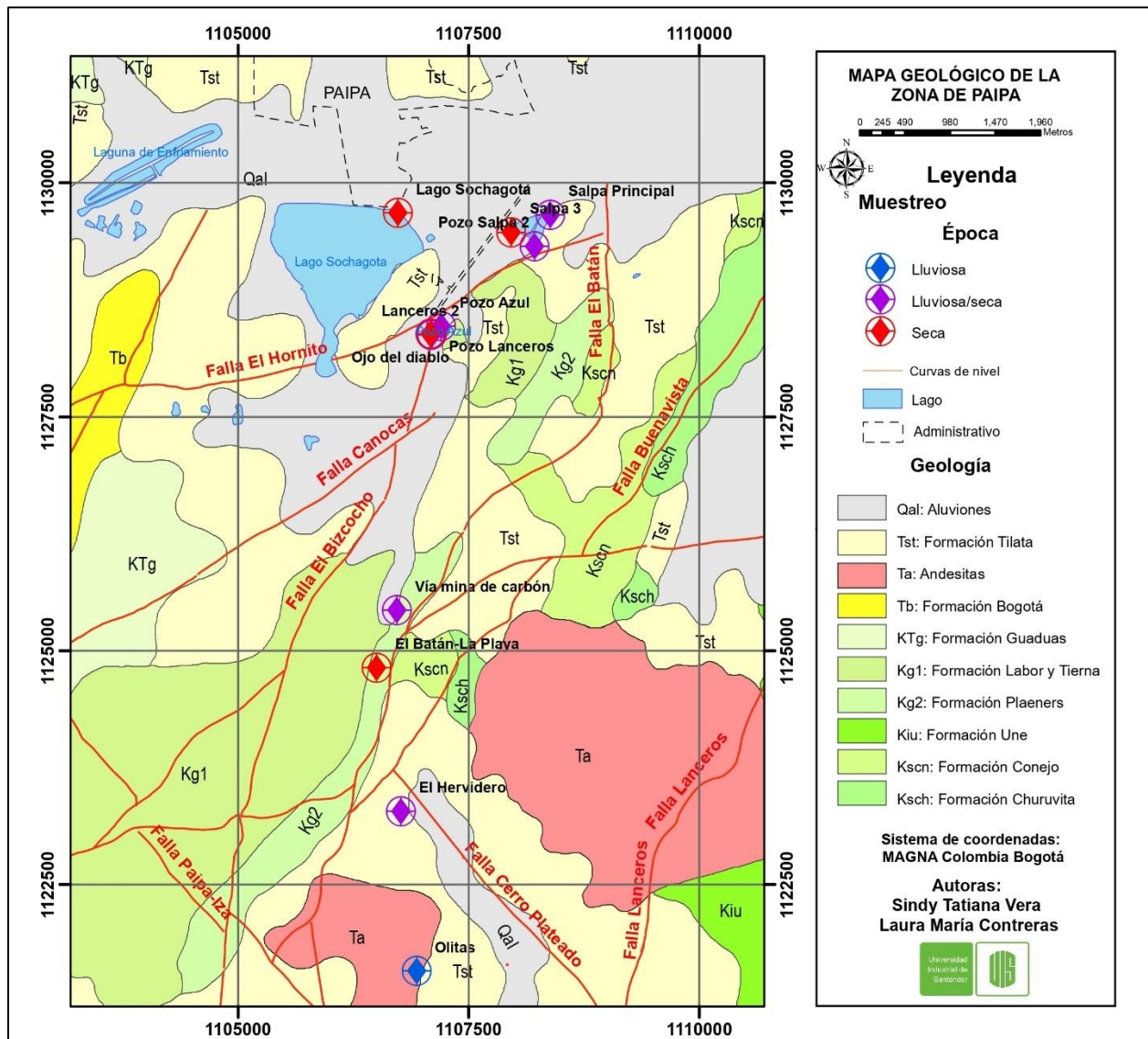
En la Figura 12, se observa el mapa geológico de la zona de estudio en el municipio de Paipa, Boyacá. Se puede decir que el pozo Salpa principal, Salpa 2 y el Hervidero se encuentran sobre la Formación Tilatá, en la región de Paipa, presenta amplios afloramientos constituidos por capas de gravas, arcillas, arenas, conglomerados con fragmentos de areniscas, arcillolitas, mal calibrados, en una matriz areno-arcillosa. Su espesor calculado en el área de Paipa es de 150m (Jaramillo, 2001). En cuanto a Salpa 3 y el lago Sochagota, se encuentran sobre depósitos aluviales, así como también la zona de ITP-Hotel Lanceros, que abarca los manantiales Pozo Hotel Lanceros, Pozo Hotel lanceros 2, Pozo Azul y Ojo del Diablo. Igualmente, el manantial Vía Mina de Carbón que se encuentra más hacia el sur. Los depósitos aluviales que forman los valles de Paipa e Iza, se originan en los ríos Salitre y Tota y están constituidos por arcillas gravas y arenas (Alfaro, 2002).

El manantial el Batán-la Playa se encuentra sobre la Formación Plaerners, en el sector de Paipa, sobre la carretera que conduce a Olitas. Está compuesta por liditas, limolitas y arcillolitas grises, con intercalaciones de areniscas amarillentas (Jaramillo, 2001). La piscina Olitas se encuentra sobre rocas ígneas andesitas, cuellos volcánicos de composición andesítica para unos autores y riolítica, para otros, que cruzan las formaciones Cretácicas, en el sector denominado Olitas en Paipa y rocas ígneas de composición riolítica a riodacítica, en Iza (Alfaro, 2002).

En la Figura 12 también se observa un cruce entre la Falla el Bizcocho y la Falla El Hornito, justo en esa zona se encuentran los manantiales Hotel Lanceros, Hotel Lanceros 2, Pozo Azul y Ojo del Diablo. Estas fallas pueden estar asociadas al ascenso de fluidos que contribuyen al sistema geotérmico. Igualmente, en cercanías a los manantiales Vía Mina del Carbón y el Batán-la Playa se encuentran las fallas El Batán y Rancho Grande, dos estructuras importantes que atraviesan casi toda la zona de trabajo. En el manantial El Hervidero se hallan las fallas Cerro Plateado y Buenavista.

**Figura 12**

*Mapa geológico de la zona de estudio en el municipio de Paipa, Boyacá.*



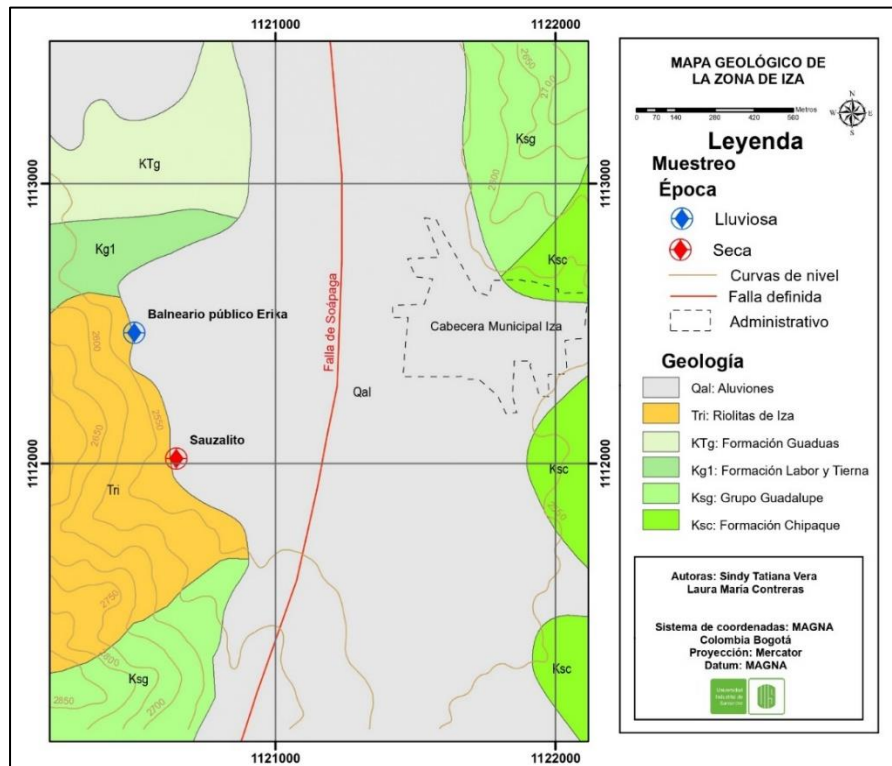
*Nota.* Geología base tomada de los nativos de la plancha geológica 171 (Versión 1983), presente en el Geoportal del Servicio Geológico Colombiano (SGC); y cartografía base tomada de la plancha 171VD1 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi y editada por autoras.

En la Figura 13 se observa el mapa geológico de la zona de estudio en Iza, Boyacá. Se puede decir que los manantiales Balneario público y Sauzalito se encuentran sobre la Formación Riolitas de Iza, mencionada en el párrafo anterior. Rincón y Romero (1990) en Jaramillo (2001), describen las rocas ígneas de Iza como masas lávicas que se encuentran generando un cuerpo dómico, desarrollado por la expansión de la lava en el núcleo de una masa magmática que estruyó lentamente a través de una fisura. Las rocas volcánicas asociadas a este cuerpo son de tipo riolítico o riolítico asociadas a una masa ígnea profunda que ascendió a la superficie aprovechando fisuras o zonas de debilitamiento estructural (Jaramillo, 2001).

Las fallas presentes en la zona se pueden observar en la Figura 13. Según Jaramillo (2001) en Alfaro (2002), las fallas El Salitre y Sochagota podrían corresponder a la misma estructura, citada por diferentes autores. Como podría sugerir la ubicación de los manantiales; esta estructura es muy importante como conducto del agua subterránea hacia la superficie, en el sistema geotérmico de Paipa. Según Rincón y Romero (1990), en Iza la ocurrencia tanto rocas ígneas como de manantiales termales está asociada a fallas: las rocas ígneas probablemente llegaron a la superficie a través de fisuras generadas en la falla Soapaga y los manantiales por cruce de fallas producto de actividad distensiva.

**Figura 13**

*Mapa geológico de la zona de estudio en el municipio de Iza, Boyacá.*



*Nota.* Geología base tomada de los nativos de la plancha geológica 192 (Versión 2001), presente en el Geoportal del SGC; y cartografía base tomada de la plancha 192IA del Instituto Geográfico Agustín Codazzi y editada por autor.

Las propiedades físicas de los manantiales muestreados en el sistema geotérmico de Paipa y en el sistema geotérmico de Iza nos permiten establecer una relación entre la zona de estudio y los sectores con valores similares de temperatura, conductividad y pH. Esto nos ayuda a establecer que manantiales pueden estar asociados a un mismo sistema hidrotermal o tienen relación por su cercanía en el área de estudio.

Los manantiales Olitas en Paipa y Balneario Público Erika en Iza fueron muestreados solo en época lluviosa. El primero de ellos presenta muy bajos valores de sodio y litio, por lo que se

decidió descartar en el segundo análisis para poder muestrear otro sitio de interés, atendiendo esto debido al presupuesto del proyecto, para el caso del Balneario Público de Erika en Iza el muestreo no fue posible ya que, al ser una zona recreativa, en los días de muestreo se encontraba ocupado por varios visitantes que estaban en la piscina por lo que se debió descartar dicho punto.

Los manantiales Salpa 3, El Batán- La Playa, Ojo del diablo, Lago Sochagota y Sauzalito fueron muestreados sólo en época seca. En el caso de Salpa 3 era una zona que en la época lluviosa se encontraba inundada y debido al cese de las lluvias, se evaporó y fue posible realizar el muestreo. Igualmente, para el manantial Ojo del diablo, ya que se encuentra en medio del manantial Hotel Lanceros y el nivel del agua no permitía el paso. Para los manantiales El Batán- La Playa, Lago Sochagota y Sauzalito se tuvieron en cuenta debido a un mayor presupuesto en este segundo muestreo.

Para los manantiales de Salpa Principal, Salpa 2, Pozo Azul, Vía Mina de Carbón, El Hervidero, Pozo Hotel Lanceros y Pozo Hotel Lanceros 2, se realizó el muestreo en ambas épocas y se pudo realizar una mejor comparativa.

En la Tabla 5 se presentan los valores de la temperatura de los manantiales muestreados tanto en la época lluviosa como en la época seca. Se puede observar que la temperatura en la época seca tiende a ser superior que en la época lluviosa, exceptuando dos manantiales (Pozo Hotel Lanceros y Pozo Hotel Lanceros 2).

**Tabla 5**

*Temperatura de los manantiales de Paipa e Iza muestreados en época lluviosa y época seca.*

Manantial	T° en época lluviosa	T° en época seca
<b>Sistema Geotérmico de Paipa</b>		
<b>Salpa principal</b>	20,30	20,6
<b>Salpa 2</b>	23,80	27,1
<b>Salpa 3</b>	--	28,3
<b>Pozo Azul</b>	47,20	51,2

<b>El Batán- La Playa</b>	--	72,3
<b>Vía Mina de Carbón</b>	58,50	59,6
<b>El Hervidero</b>	19,30	25,1
<b>Piscina Olitas</b>	24,40	--
<b>Pozo Hotel Lanceros</b>	56,90	49,1
<b>Pozo Hotel Lanceros 2</b>	59,50	57,6
<b>Ojo del Diablo</b>	--	45,6
<b>Lago Sochagota</b>	--	21,2
<b>Sistema Geotérmico de Iza</b>		
<b>Balneario público Erika</b>	30,4	--
<b>Sauzalito</b>	--	32,6

En la Tabla 6 se presenta la conductividad de los manantiales muestreados tanto en la época lluviosa como en la época seca. Se puede observar que la conductividad en la época seca es superior a la época lluviosa en la totalidad de los manantiales. Esto puede deberse a la concentración de sal y demás elementos debido a la disminución de las lluvias, por ende, la conductividad aumenta.

**Tabla 6**

*Conductividad de los manantiales de Paipa e Iza muestreados en época lluviosa y época seca.*

<b>Manantial</b>	<b>Conductividad Época lluviosa (<math>\mu</math>S/cm)</b>	<b>Conductividad Época seca (<math>\mu</math>S/cm)</b>
<b>Sistema Geotérmico de Paipa</b>		
<b>Salpa principal</b>	45400	45750
<b>Salpa 2</b>	36400	56800
<b>Salpa 3</b>	--	55630
<b>Pozo Azul</b>	42900	43550
<b>El Batán- La Playa</b>	--	20580
<b>Vía Mina de Carbón</b>	39900	42010
<b>El Hervidero</b>	190	268
<b>Piscina Olitas</b>	170	--
<b>Pozo Hotel Lanceros</b>	41600	44420
<b>Pozo Hotel Lanceros 2</b>	40700	43040
<b>Ojo del Diablo</b>	--	43510
<b>Lago Sochagota</b>	--	1776
<b>Sistema Geotérmico de Iza</b>		
<b>Balneario público Erika</b>	3040	--
<b>Sauzalito</b>	--	2498

En la Tabla 7 se observan los pH de los manantiales muestreados tanto en la época lluviosa como en la época seca. Se puede decir que el pH en la época lluviosa es superior a la medida de

pH de la época seca en la totalidad de los manantiales, esto puede considerarse particular debido a que la lluvia limpia normal tiene un valor de pH de entre 5.0 y 5.5, nivel levemente ácido (EPA, 2023), siendo este un pH más ácido que el de casi todos los manantiales (exceptuando el Hervidero), por lo tanto, se esperaría un pH menor en la época lluviosa, ya que la lluvia podría acidificar el pH de los manantiales. Sin embargo, la lluvia arrastra y diluye los componentes de los manantiales, haciendo que las sales se solubilizan más, y es a estas sales que se les mide el pH.

Es importante destacar que la capacidad de la lluvia para arrastrar y diluir componentes depende de varios factores, como la intensidad de la lluvia, la duración de la precipitación, la composición química del agua y la interacción con el entorno. Además, ciertos componentes pueden ser más susceptibles de ser arrastrados por la lluvia que otros (Elosegui, 2009).

**Tabla 7**

*pH de los manantiales de Paipa e Iza muestreados en época lluviosa y época seca.*

Manantial	pH en época lluviosa	pH en época seca
<b>Sistema Geotérmico de Paipa</b>		
Salpa principal	6,50	6,41
Salpa 2	9,78	9,66
Salpa 3	--	9,74
Pozo Azul	6,97	6,88
El Batán- La Playa	--	7,0
Vía Mina de Carbón	7,10	7,03
El Hervidero	4,17	3,66
Piscina Olitas	6,12	--
Pozo Hotel Lanceros	6,98	6,69
Pozo Hotel Lanceros 2	7,18	6,97
Ojo del Diablo	--	6,86
Lago Sochagota	--	10,16
<b>Sistema Geotérmico de Iza</b>		
Balneario público Erika	7,28	--
Sauzalito	--	6,22

## 6.2 Análisis de las propiedades químicas

La Tabla 8 incluye los análisis de composición química de las muestras de agua en la época lluviosa. Los valores de concentraciones están dados en mg/l. Una de las especies dominantes en estas aguas es el sodio que supera los 3000 mg/l en la totalidad de las muestras, exceptuando Olitas y el Hervidero que presentan niveles de <0,100 mg/l y el bicarbonato cuyas concentraciones van de 2500 a 3000 mg/l, exceptuando los dos mencionados anteriormente.

La concentración de cloruros, una de las especies conservativas de mayor relevancia en la evaluación de las características geoquímicas del fluido geotérmico en la mayoría de los sistemas hidrotermales, muestra un patrón de distribución en el cual las mayores concentraciones de Cl<sup>-</sup> están en el sector de Salpa con valores de hasta 1170 mg/l, junto a Vía mina de Carbón. El siguiente sector en orden de concentración es ITP- Hotel Lanceros con valores de 630 a 670 mg/l y la concentración mínima es en Olitas con 12 mg/l, seguida por el Hervidero e Iza que alcanza los 197 mg/l.

El sulfato presenta los valores más altos en Salpa 2, Pozo Azul y Vía Mina de Carbón con 1142.98 mg/l y valores mínimos para Salpa Principal y Olitas con un valor de 42 mg/l. El potasio presenta valores variables entre 565 a 3,5 mg/l, estando la concentración máxima en el Pozo Hotel Lanceros 2 y en el Pozo Salpa Principal, y las menores concentraciones en Olitas, el Hervidero e Iza. Cabe resaltar que el sector de Lanceros presenta mayores concentraciones que el sector de Salpa, (564-184 mg/l) y (555-160 mg/l) respectivamente.

El valor más alto de calcio se encuentra en Iza en el sector del Balneario Público de Erika (94,3mg/l), luego le sigue Salpa Principal con 72mg/l y Hotel Lanceros con 66mg/l, para los valores más bajos se tienen en la Piscina Olitas, Salpa 2 y el Hervidero (2 a 5 mg/l).

Los valores de magnesio son de 17 mg/l para Salpa Principal y para Lanceros 1 y 2 siendo el valor más alto y el valor mínimo es 0.1 mg/l para la muestra de Olitas. En cuanto al boro y el estroncio no se presentan valores mínimos para ninguna de las muestras.

El mayor valor de Litio es 1.54 mg/l en el pozo de Salpa Principal, seguidos por los valores del Hotel Lanceros con 1.27 mg/l, en la muestra de vía de carbón se obtuvo un valor de 0.86 mg/l, en Iza, el Hervidero y Olitas no se reportan valores mínimos.

Los valores de flúor para la totalidad de las muestras son de 2 mg/l exceptuando el Hervidero con 0.34 mg/l. Los valores para el manganeso varían entre 0,7 mg/l para la muestra de Iza y 1,68 mg/l para Salpa principal.

El hierro presenta valores bajos, siendo el valor mínimo 0,2 mg/l para las muestras de Salpa 2, Pozo Azul, Vía Mina de Carbón, Pozo Hotel Lanceros 2, Iza (Balneario público), en Pozo Hotel de Lanceros y Olitas no se reportan valores mínimos, y el valor máximo es para el Hervidero con 0.88 mg/l.

El silicio presenta valores de 0,1 mg/l para todas las muestras exceptuando Salpa 2 y el  $\text{SiO}_2$  presenta valores de 0,2 para la totalidad de las muestras y un valor máximo de 10,45mg/l en la muestra de Salpa 2.

**Tabla 8**

*Análisis de composición química de las muestras de agua de la época lluviosa. Concentraciones en mg/l.*

No.	Manantial	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Li <sup>+</sup>	Sr	B	Fe	Mn	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	Si	SiO <sub>2</sub>	Alcalinidad
SL1-01	Salpa principal	3028.42	555.28	72.41	17.19	1.54	< 0.200	< 0.100	0.34	1.68	830.36	42.07	3049.13	2.70	0.10	0.20	2499.25
SL1-02	Salpa 2	2874.79	160.98	3.28	1.42	1.09	< 0.200	< 0.100	0.20	< 0.200	1170.05	1029.62	2585.66	2.27	4.88	10.45	2119.36
SL1-03	Pozo Azul	3245.31	184.01	52.04	13.21	1.13	< 0.200	< 0.100	0.20	1.23	775.71	1142.98	2853.98	2.95	0.13	0.27	2339.30
SL1-04	Vía Mina de Carbón	3239.22	22.46	9.84	9.71	0.86	< 0.200	< 0.100	0.21	1.23	1168.05	1142.98	2878.37	2.47	0.10	0.21	2359.30
SL1-05	El Hervidero	< 0.100	8.06	2.61	0.80	< 0.100	< 0.200	< 0.100	0.88	< 0.200	78.36	58.75	146.36	0.34	0.10	0.22	119.96
SL1-06	Piscina Olitas	< 0.100	8.94	5.43	0.10	< 0.100	< 0.200	< 0.100	< 0.200	< 0.200	12.22	42.44	146.36	2.60	0.10	0.21	119.96
SL1-07	Pozo Hotel Lanceros	3302.14	234.99	66.19	17.29	1.12	< 0.200	< 0.100	< 0.200	1.26	630.75	296.08	3293.06	2.79	0.10	0.20	2699.19
SL1-08	Pozo Hotel Lanceros 2	3341.45	564.62	50.62	17.03	1.27	< 0.200	< 0.100	0.22	1.54	670.28	98.43	3146.70	2.92	0.09	0.20	2579.23
SL1-09	Balneario público Erika	425.690	3.560	94.323	9.048	< 0.100	< 0.200	< 0.100	0.221	0.773	197.670	102.360	804.970	2.140	0.095	2.140	659.80

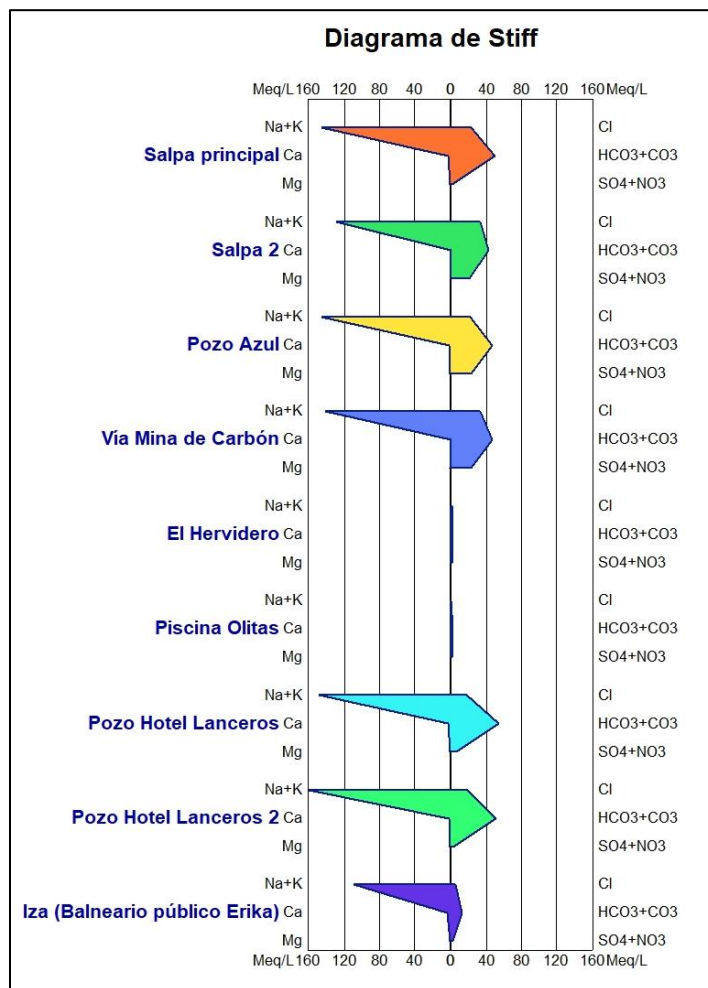
\*En el apéndice D se puede apreciar mejor el comportamiento de las tendencias que presentan las concentraciones de cada muestra.

\*En el apéndice F se pueden observar los diagramas de barras que representan los valores de concentraciones para cada elemento mostrado en la tabla anterior y así realizar una mejor comparación.



**Figura 15**

*Diagrama de Stiff de las muestras de la época lluviosa.*



*Nota.* Los colores de los manantiales son asignados por el software Diagrammes y se utilizan para diferenciarlos.

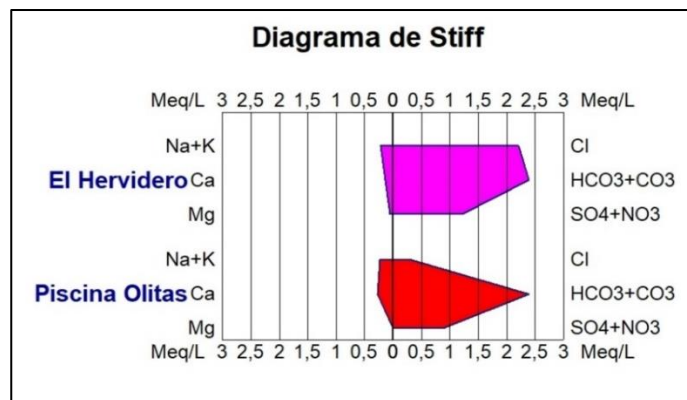
De acuerdo con la figura anterior, se muestra que la mayoría de los manantiales siguen una tendencia o patrón debido a que exhiben un comportamiento dominante en los cationes  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  y menor cantidad de  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , por esto se ubican más hacia la parte izquierda del diagrama, también se evidencian los bajos valores de  $\text{Mg}^+$ . Los manantiales El Hervidero y Olitas no se aprecian en el diagrama debido a que presentan bajas concentraciones en todos los iones, por

lo que la escala no permite observar su forma. Por lo tanto, se elaboró otro diagrama para estos, que puede verse a continuación.

Como se observa en la Figura 16, los manantiales El Hervidero y Olitas tienen una composición de aniones más dominante que de cationes. Por esto, las figuras parten casi desde el cero, y se ubican en la parte derecha del diagrama; también, se puede apreciar que tienen una composición muy similar, difiriendo notoriamente solo en el contenido de Cl<sup>-</sup>.

### Figura 16

*Diagrama de Stiff de las muestras El Hervidero y Olitas de la época lluviosa.*

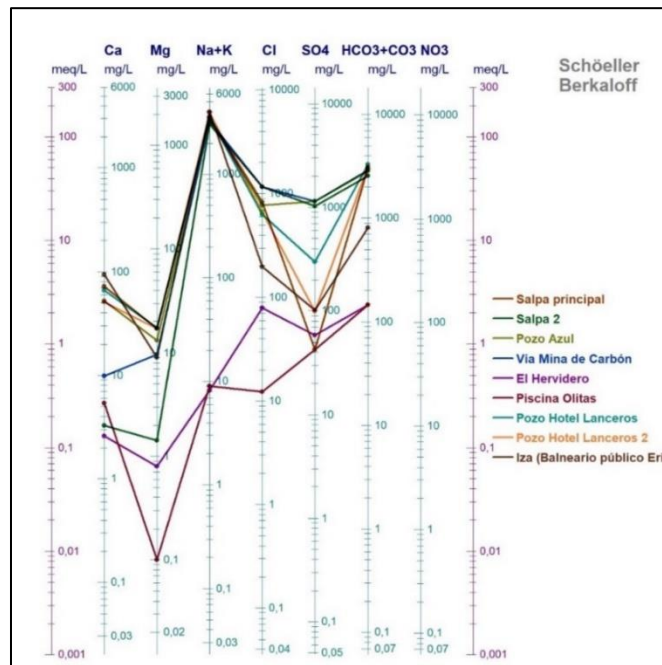


En la Figura 17 se observa el diagrama de Schoeller-Berkaloff de las nueve muestras recolectadas, basado en los aniones y cationes dominantes de las aguas de los manantiales en la época lluviosa.

El gráfico muestra nuevamente que existe un patrón dominante en la mayoría de los manantiales. En este diagrama se puede observar con mayor claridad que los manantiales El Hervidero y Olitas difieren no solo composicionalmente, sino que, además, la concentración de los iones es notoriamente más baja que en el resto de los manantiales.

**Figura 17**

*Diagrama de Schoeller-Berkaloff de las muestras de la época lluviosa.*



La Tabla 9 incluye los análisis de composición química de las muestras de agua en la época seca, los valores de concentraciones están dados en mg/l. Las especies dominantes en estas aguas son los cloruros, en el cual las mayores concentraciones están en el sector de Salpa con valores de hasta 6600 mg/l, junto a Ojo del Diablo. El siguiente sector en orden de concentración es ITP-Hotel Lanceros con valores de 5600 a 5900 mg/l y la concentración mínima es en el lago Sochagota con 161 mg/l, seguida por el Hervidero que alcanza los 242 mg/l.

Los sulfatos presentan el valor más alto en el Hotel Lanceros con 6700 mg/l seguido por el lago Sochagota con 6000 mg/l y por Salpa Principal y Vía Mina de Carbón con 5400 mg/l y el menor valor en el Sauzalito en Iza con 408,5 mg/l.

Otro ion dominante es el sodio, que va de 4500 a 5800 mg/l en casi la totalidad de las muestras, exceptuando el lago Sochagota, el Hervidero y Sauzalito que presentan niveles entre 229 y 444 mg/l.

El calcio se encuentra con valores máximos de 2100 mg/l en el sector Hotel Lanceros y mínimos de 46 mg/l en el lago Sochagota. Igualmente, el potasio presenta valores variables entre 2560 y 33 mg/l, estando la concentración máxima en el Pozo Hotel Lanceros 2 y la menor concentración en el lago Sochagota.

El magnesio tiene los valores más altos en Hotel Lanceros 1 y 2 con valores de 428mg/l y valores de 40mg/l en Ojo del Diablo y Salpa 2 y 3, el valor mínimo es en el Batán-La Playa con 9,75 mg/l. El valor del manganeso está en el rango de 0,008 a 1,696 mg/l.

Los valores de litio son muy interesantes en este análisis debido a que los valores reportados son mucho mayores que en el análisis anterior, el valor máximo es para la zona del Hotel Lanceros con 8,5 mg/l en Ojo del Diablo y valores muy cercanos en Lanceros 1 y 2. En Salpa 2, 3, Pozo Azul y Vía mina de carbón con valores de 7,5 mg/l. El Hervidero, Sauzalito y el Lago Sochagota presentan los valores más bajos de 0,017 a 0,105 mg/l.

En esta oportunidad fueron analizados los nitratos y fosfatos presentes en los manantiales, cuyos valores son relativamente bajos, es importante tenerlos en cuenta como una fuente secundaria en la composición de las aguas y de su contaminación. Los valores de nitratos van desde 1.3 a 126 mg/l, mientras que los fosfatos son menores, van desde 0.2 a 1.4 mg/l.

También en esta ocasión se analizó el  $\text{CO}_3$  y se obtuvo valores en tres sectores en Salpa 2 y 3, con 573,75 y 398,25mg/l respectivamente y en el Lago Sochagota de 53 mg/l. El hierro presenta el valor más alto en el Hervidero 5mg/l y para las demás muestras de 0,1 a 0,9mg/l. El mayor valor de  $\text{CaCO}_3$  es 6345mg/l en Hotel Lanceros 2, seguidos por Salpa 2, vía Mina de Carbón y Ojo del Diablo con valores de 1700mg/l. El mayor valor de Bicarbonato es en el Hotel Lanceros 2 con 7740mg/l y Pozo Azul con 2292mg/l, seguido por Ojo del Diablo y Vía Mina de Carbón con 2100mg/l, el menor valor es en el Lago Sochagota con 68,7 mg/l.

**Tabla 9**

*Análisis de composición química de las muestras de agua de la época seca. Concentraciones en mg/l.*

No.	Manantial	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Li <sup>+</sup>	Fe	Mn	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	CaCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	Alcalinidad	Balance Iónico %
SL2-01	Pozo Hotel Lanceros 2	4740,25	2560,5	2183,4	428,55	8,115	0,426	1,696	5673,985 2	2684,5	7740,9	1,45	0,25	6345	-	7740,9	9.63
SL2-02	Pozo Hotel Lanceros	4676,25	529,35	2086,625	410,35	8,395	0,652	1,281	5981,124	6732,5	2745	3,275	0,2	2250	-	2745	0.14
SL2-03	Ojo del Diablo	5643,75	984,95	1239,675	45,25	8,485	0,598	1,468	6692,392 8	6014,5	2272,86	2,25	0,275	1856,25	-	2272,86	2.18
SL2-04	Lago Sochagota	275	33,8	46,275	17,8	0,105	0,942	0,085	161,6843 3	464,5	68,625	10,6	0,575	157,5	54	176,625	3.89
SL2-05	Pozo Azul	5597,5	539,85	915,75	16,9	7,23	0,817	1,813	5940,711	5550,5	2292,075	2	0,45	1878,75	-	2292,075	2.61
SL2-06	Salpa principal	5523,75	823,95	933,975	38,1	5,025	5,697	1,426	6466,08	5146,5	2333,25	2,975	0,375	1912,5	-	2333,25	2.61
SL2-07	Salpa 2	5832,5	578,7	714,175	41,125	7,355	1,424	0,106	5779,059	5440,5	1111,725	126,5	1,05	2823,75	573,75	2259,225	2.16
SL2-08	Salpa 3	5885	596,4	824,775	43,75	7,665	0,847	0,024	6668,145	5469	466,65	56	1,4	1046,25	398,25	1263,15	1.02
SL2-09	Vía Mina de carbón	5523,75	560,55	773,2	10,275	7,16	0,623	0,17	5415,342	5199	2127,375	2,025	0,425	1743,75	-	2127,375	0.31
SL2-10	El Batán-La Playa	2780	463,9	184,2	9,75	3,68	0,195	0,125	2141,889	3610	1111,725	2,225	0,3	911,25	-	1111,725	3.71
SL2-11	El Hervidero	229	302,25	55,325	17,2	0,017	5,186	0,008	242,478	722,5	123,525	4,475	0,35	101,25	-	123,525	4.45
SL2-12	Sauzalito	443,75	107,25	158,35	8,075	0,455	0,104	0,986	585,9885	408,5	425,475	1,3	0,475	348,75	-	425,475	2.23

*Nota.* El guion (-) significa que el valor del ion es 0 o no fue detectado.

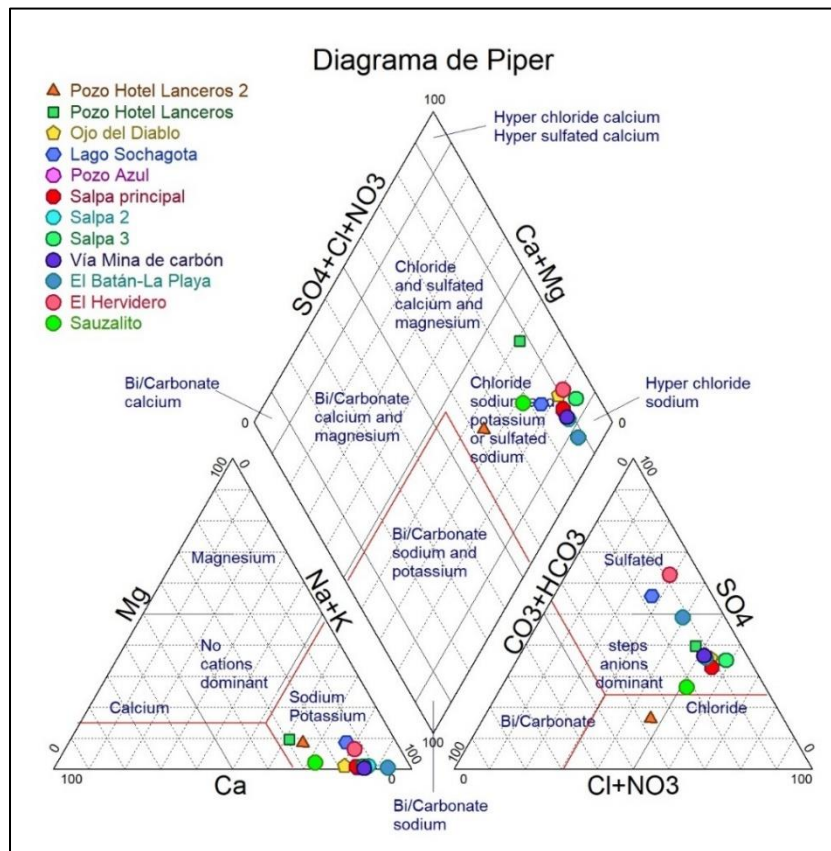
\*En el apéndice D se puede apreciar mejor el comportamiento de las tendencias que presentan las concentraciones de cada muestra.

\*En el apéndice F se pueden observar los diagramas de barras que representan los valores de concentraciones para cada elemento mostrado en la tabla anterior y así realizar una mejor comparación.

En cuanto a la clasificación química de las aguas de los manantiales en la época seca, en la Figura 18 se observa el diagrama de Piper de las doce muestras recolectadas. El gráfico nos muestra que la totalidad de los manantiales son del tipo agua clorurada de sodio y potasio o sulfatada de sodio. En el triángulo que representa los cationes predominan el sodio y el potasio, mientras que en el de los aniones lo hacen el cloro y el sulfato.

**Figura 18**

*Diagrama de Piper de las muestras de la época seca.*

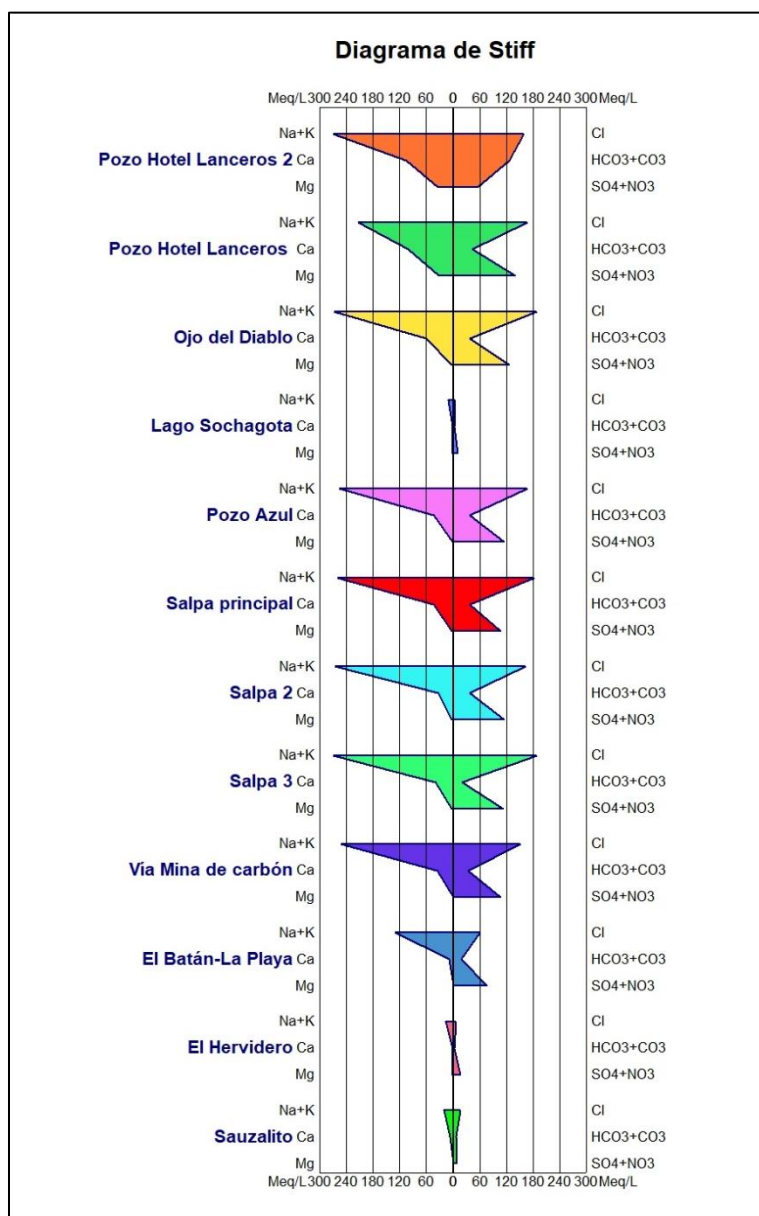


Siguiendo con la clasificación química de las aguas de los manantiales en la época seca, en la Figura 19 se observa el diagrama de Stiff de las doce muestras recolectadas. El gráfico muestra que la mayoría de los manantiales siguen una tendencia o patrón típico de composición de agua de salmuera, en forma de T (ver Apéndice A), además, exhiben un comportamiento dominante en los

cationes  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  y en los aniones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Los manantiales lago Sochagota, El Hervidero y Sauzalito no se aprecian en el diagrama debido a la diferencia de escala necesaria para observar su forma. Por lo tanto, se elaboró otro diagrama para estos, que puede verse en la Figura 20.

**Figura 19**

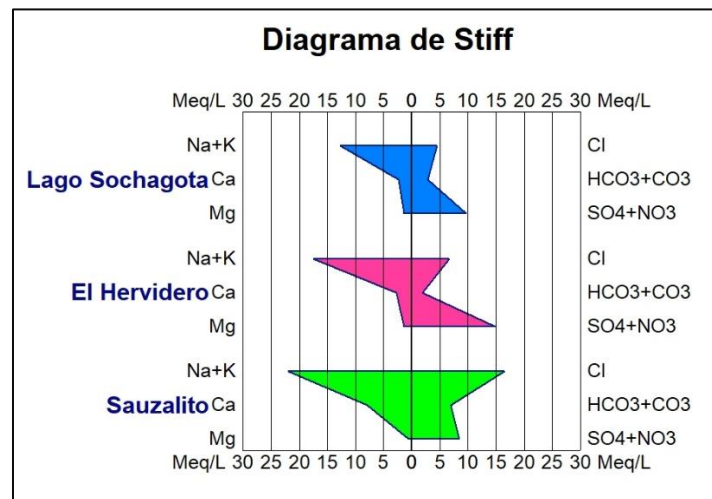
*Diagrama de Stiff de las muestras de la época seca.*



Como se observa en la Figura 20, los manantiales lago Sochagota, el Hervidero y Sauzalito tienen una composición bastante pareja tanto de aniones como de cationes. En cuanto al patrón exhibido, el lago Sochagota y el hervidero muestran una forma distinta a las anteriores, sin embargo, aún dominan los cationes  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  y el anión  $\text{SO}_4^{2-}$ . Mientras que Sauzalito sigue la tendencia de composición de agua de salmuera (forma de T), donde predomina más el  $\text{Cl}^-$ .

### Figura 20

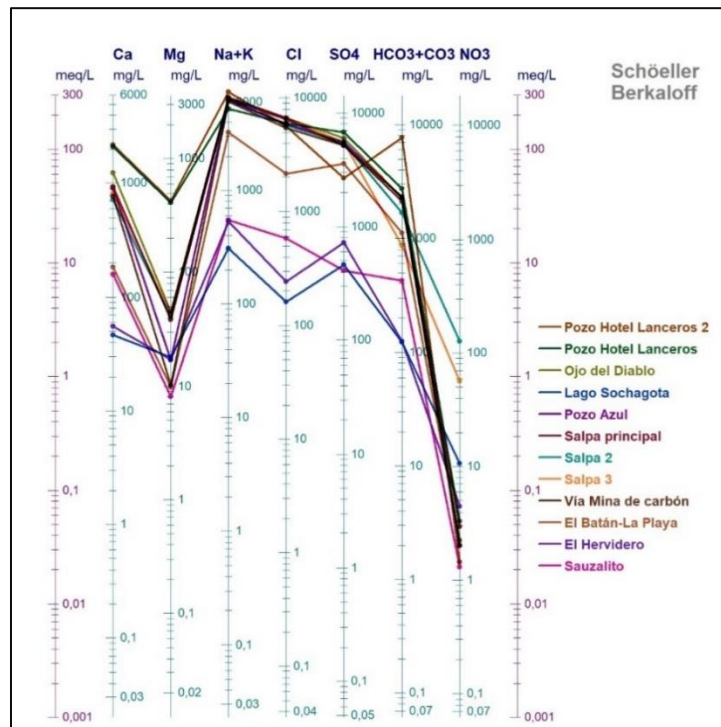
*Diagrama de Stiff de las muestras Lago Sochagota, El Hervidero y Sauzalito de la época seca.*



En la Figura 21 se observa el diagrama de Schoeller-Berkaloff de las doce muestras recolectadas, basado en los aniones y cationes dominantes de las aguas de los manantiales en la época seca. El gráfico muestra nuevamente que existe un patrón dominante en la mayoría de los manantiales y se puede observar con mayor claridad que los manantiales lago Sochagota, el Hervidero y Sauzalito difieren tanto composicionalmente como en la concentración de los iones, que es notoriamente más baja que en el resto de los manantiales.

**Figura 21**

*Diagrama de Schoeller-Berkaloff de las muestras de la época seca.*



### 6.2.1 Saturación

Otro parámetro importante para tener en cuenta es la saturación, el cálculo de la saturación del mineral implica varios factores que serán mencionados y calculados a continuación.

La saturación depende de dos valores el IAP (Producto de la Actividad Iónica) y el  $K_{ps}$  (producto de solubilidad) por lo que se deben hallar por separado y se analizó su cociente.

Para calcular el  $K_{ps}$  se debe conocer la energía libre de Gibbs, que son las unidades utilizadas para calcular la energía estándar de Gibbs y se basan en la unidad de Julios (Joules) y en un estado estándar de 100 kPa (0,9869 atm) y 298,15 K (25°C).

**Tabla 10**

*Datos termodinámicos de estado estándar (Energía Libre de Gibbs).*

Delta energía de Gibbs		
<b>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O</b>	Mirabilita	-3646.4
<b>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Thenardita	-1269.8
<b>NaHCO<sub>3</sub></b>	Nahcolita	-851.9
<b>NaHCO<sub>3</sub>*Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>*2H<sub>2</sub>O</b>	Trona	-2386.6
<b>Na</b>	Sodio	-261.92
<b>SO<sub>4</sub></b>	Sulfato	-744.53
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Agua	-237.13
<b>HCO<sub>3</sub></b>	Bicarbonato	-586.77
<b>CO<sub>3</sub></b>	Carbonato	-527.81

*Nota.* Tomado de Drever 1988. Los datos originales en unidades basadas en calorías se convirtieron a unidades basadas en julios multiplicándolos por 4,1840.

La energía libre de Gibbs por mol de reacción ( $\Delta G_R$ ) es la diferencia entre la energía libre de Gibbs de los productos y la de los reactivos ( $\Delta G$  productos -  $\Delta G$  reactivos), con los datos de la tabla presentada anteriormente y esta es dividida por la constante de los gases que se expresa en KJ/mol por la temperatura 25°C. El  $K_{ps}$  así se obtiene de la potencia del valor obtenido de  $\Delta G/RT$  como se expresa en la ecuación (1).

**Tabla 11**

*Valores de  $K_{ps}$  determinados para cada mineral*

Nombre	$\Delta G$	$\Delta G/RT$	$K_{ps}$
<b>Mirabilita</b>	6.73	-1.17904695	0.066214492
<b>Thenardita</b>	1.43	-0.25052558	0.561661198
<b>Nahcolita</b>	3.21	-0.56236861	0.273924826
<b>Trona</b>	12	-2.10231254	0.007901098

El IAP, es el siguiente valor por calcular y se determina con base en los valores de  $\gamma$  y  $m$  de los iones que componen el mineral como se expresa en la ecuación (4). El valor de  $m$  es la concentración en  $mEq$  y  $\gamma$ , coeficiente de actividad que se determina de acuerdo con la ecuación (3) que depende del factor I representado en la ecuación (2) que se establece como  $\frac{1}{2}$  de la

sumatoria de la masa por el doble de la carga iónica de todas las especies de la solución expresada en la ecuación y de acuerdo con lo anterior se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla 12**

Valores de coeficiente de actividad ( $\gamma$ ) e IAP de los minerales de interés.

Lugar	$\gamma_{Na}$	$\gamma_{SO4}$	$\gamma_{HCO3}$	$\gamma_{CO3}$	IAP $Na_2SO_4$	IAP $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	IAP $NaHCO_3$	IAP $Na_3HCO_3 \cdot Na_2CO_3 \cdot 2H_2O$
Pozo Hotel Lancersos 2	0.121005491	1.5754420	0.0744528	-	0.00045299	0.000235665	0.000235665	-
Pozo Hotel Lancersos	0.117728549	3.8966879	0.02603827	-	0.00266052	2.80511E-05	2.80511E-05	-
Ojo del Diablo	0.146299517	3.5843454	0.02219901	-	0.00395735	2.96983E-05	2.96983E-05	-
Lago Sochagota	0.00983887	0.3820616	0.00092508	0.04441621	5.2017E-09	1.22449E-10	1.22449E-10	1.97173E-24
Pozo Azul	0.14765653	3.3660910	0.02278102	-	0.00340499	3.07655E-05	3.07655E-05	-
Salpa principal	0.145772931	3.1224108	0.0232001	-	0.00281555	3.10726E-05	3.10726E-05	-
Salpa 2	0.153212643	3.2855938	0.0110033	0.34649562	0.00367007	7.79265E-06	7.79265E-06	3.27717E-11
Salpa 3	0.154584769	3.3026561	0.00461846	0.24049786	0.00380932	1.39771E-06	1.39771E-06	2.96153E-12
Vía Mina de carbón	0.147267139	3.1865948	0.02136986	-	0.0029325	2.63634E-05	2.63634E-05	-
El Batán-La Playa	0.080780295	2.4115876	0.01217149	-	0.0002141	2.16624E-06	2.16624E-06	-
El Hervidero	0.008019626	0.5816901	0.00162989	-	6.9626E-09	2.63584E-10	2.63584E-10	-
Sauzalito	0.015379703	0.3254894	0.00555609	-	1.5862E-08	1.15013E-08	1.15013E-08	-

Nota. El guion (-) significa que el valor no se puede calcular en dicho lugar debido a la falta del compuesto  $CO_3$ .

En el caso de los minerales hidratados como la Trona y la Mirabilita que en su composición tienen la molécula de agua y el valor de  $\gamma^*m$  se asume como 1 porque depende del coeficiente de actividad del agua en función de la salinidad (Drever 1988). Por lo anterior el valor de IAP de la Mirabilita y la Thenardita es el mismo.

La ecuación (5) representa la relación para la saturación y el resultado se presenta a continuación:

**Tabla 13**

Valores de saturación de los minerales de interés.

Lugar	SAT $Na_2SO_4$ Thenardita	SAT $NaHCO_3$ Nahcolita	SAT $Na_3(HCO_3)(CO_3) \cdot 2H_2O$ Trona	SAT $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ Mirabilita
Pozo Hotel Lancersos 2	0.000806522	0.000860326	-	0.003559108
Pozo Hotel Lancersos	0.004736874	0.000102404	-	0.000423639
Ojo del Diablo	0.007045802	0.000108418	-	0.000448517
Lago Sochagota	9.26131E-09	4.47018E-10	2.49551E-22	1.84928E-09

Pozo Azul	0.006062356	0.000112314	-	0.000464634
Salpa principal	0.005012906	0.000113435	-	0.000469272
Salpa 2	0.006534305	2.84481E-05	4.14774E-09	0.000117688
Salpa 3	0.006782246	5.10253E-06	3.74826E-10	2.11088E-05
Vía Mina de carbón	0.005221114	9.62431E-05	-	0.000398151
El Batán-La Playa	0.000381196	7.90816E-06	-	3.27155E-05
El Hervidero	1.23964E-08	9.6225E-10	-	3.98076E-09
Sauzalito	2.824205E-08	4.19869E-08	-	1.73697E-07

*Nota.* El guion (-) significa que el valor no se puede calcular en dicho lugar debido a la falta de alguno de los compuestos que forman el mineral.

En el Apéndice D se presentan todos los cálculos para obtener los resultados mostrados anteriormente.

Comparando el índice de actividad iónica (IAP) y el producto de solubilidad (Kps) del mineral se puede concluir que en todos los escenarios se obtiene que  $IAP < Kps$ , es decir que la solución está subsaturada y mayor cantidad de la fase sólida puede ser disuelta. El sistema no está en equilibrio y no puede estar presente ningún sólido aún, hasta que alcance la relación  $IAP = Kps$ . Para hacer la comparación de manera más exacta se usó el programa de Excel y se obtuvo el siguiente resultado: si el valor de la columna (<) es 0 significa que  $IAP < Kps$  y si el valor da 1 significa que  $IAP \geq Kps$  y se puede observar que el resultado que concluyo Excel evidencia el valor 0 para todos los puntos, es decir que la solución está subsaturada, que admite más sustancia disuelta y aun no hay precipitado de los minerales analizados. En todas las zonas se encuentra subsaturados todos los minerales analizados.

## Figura 22

*Resultado de la comparación en Excel de los valores de IAP y Kps.*

Lugar	IAP Na2SO4	KPS Na2SO4	<	IAP NaHCO3	KPS NaHCO3	<	IAP Na3HCO3.Na2CO3*2H2O	KPS Na3HCO3.Na2CO3*2H2O	<	IAP Na2SO4*10H2O	KPS Na2SO4*10H2O	<
Pozo Hotel Lanceros 2	0.000452992	0.561661198	0	0.0002356645	0.273924826	0	-	-	-	0.000452992	0.066214492	0
Pozo Hotel Lanceros	0.002660518	0.561661198	0	0.0000280511	0.273924826	0	-	-	-	0.002660518	0.066214492	0
Ojo del Diablo	0.003957353	0.561661198	0	0.0000296983	0.273924826	0	-	-	-	0.003957353	0.066214492	0
Lago Sochagota	0.000000005	0.561661198	0	0.0000000001	0.273924826	0	1.97173E-24	0.007901098	0	0.000000005	0.066214492	0
Pozo Azul	0.003404990	0.561661198	0	0.0000307655	0.273924826	0	-	-	-	0.003404990	0.066214492	0
Salpa principal	0.002815555	0.561661198	0	0.0000310726	0.273924826	0	-	-	-	0.002815555	0.066214492	0
Salpa 2	0.003670065	0.561661198	0	0.0000077926	0.273924826	0	3.277172E-11	0.007901098	0	0.003670065	0.066214492	0
Salpa 3	0.003809324	0.561661198	0	0.0000013977	0.273924826	0	2.961534E-12	0.007901098	0	0.003809324	0.066214492	0
Via Mina de carbón	0.002932497	0.561661198	0	0.0000263634	0.273924826	0	-	-	-	0.002932497	0.066214492	0
El Batán-La Playa	0.000214103	0.561661198	0	0.0000021662	0.273924826	0	-	-	-	0.000214103	0.066214492	0
El Hervidero	0.000000007	0.561661198	0	0.0000000003	0.273924826	0	-	-	-	0.000000007	0.066214492	0
Sauzalito	0.000000016	0.561661198	0	0.0000000115	0.273924826	0	-	-	-	0.000000016	0.066214492	0

*Nota.* Este resultado se puede observar en el Apéndice A.

En zonas donde el valor del producto de actividad y el producto de saturación tienden a ser iguales como el caso de la Mirabilita, en épocas secas extensas se puede alcanzar la saturación y precipitación del mineral.

### **6.3 Evolución geoquímica de las aguas termales de Paipa e Iza en términos de una sucesión de divisiones químicas que experimentan las aguas por el modelo de evolución por evaporación.**

La evolución geoquímica de las aguas termales se realiza mediante el modelo de evaporación de aguas naturales de Hardie y Eugster (1970), modificado por Drever (1988) que se explica de mejor manera en la fase 4 de la metodología, se trata de la evaporación que experimentan las aguas en términos de una sucesión de divisiones químicas.

Los resultados de la evolución geoquímica expuestos a continuación se basaron en los datos de la Tabla 9, que corresponden a los análisis químicos de las muestras de agua de la época seca. En la fase 2 de la metodología se presentan los argumentos por los cuales fueron usados estos resultados, uno de ellos es que el valor calculado de la alcalinidad fue más específico con respecto al análisis de la época lluviosa, ya que en estos resultados de época seca se obtienen los valores de  $\text{CO}_3$  y  $\text{CaCO}_3$  mientras que en los de época lluviosa no.

Para el diagrama de Hardie y Eugster (1970), la alcalinidad del carbonato se toma como la suma de la concentración de bicarbonatos y el doble de la concentración de carbonatos, de esta manera:  $\text{mHCO}_3^- + 2\text{mCO}_3^{2-}$  (Drever, 1988).

Con casi todas las aguas naturales, el primer mineral en precipitar, y por lo tanto en causar la primera división química, es la calcita. El camino seguido por la solución (I o II) depende

entonces de si la concentración de calcio (en equivalentes) es mayor o menor que la alcalinidad del carbonato (en equivalentes).

En el presente caso, las aguas termales de Paipa analizadas (muestras SL2-01 a SL2-12) tienen  $2mCa^{2+} > \text{Alcalinidad}$ . El promedio total de  $2mCa^{2+}$  de las aguas es de 84,134 mEq/L, mientras que el promedio total de la alcalinidad es de 34,015 mEq/L (calculado a partir de los datos del Apéndice E). Esta composición inicial durante la evaporación hace que las aguas sigan el camino II. A lo largo del camino II, el siguiente mineral en precipitar es el yeso, la segunda división química. Una mayor evaporación forzará a las aguas a moverse a lo largo de la ruta V o la ruta VI dependiendo de si la concentración de  $mCa^{2+}$  es mayor o menor que la concentración de  $mSO_4^{2-}$ .

Para esta segunda división se tiene que las aguas termales analizadas se bifurcan, la muestra SL2-01 tiene  $mCa^{2+} > mSO_4^{2-}$ , por ende, seguirá el camino V; mientras que las muestras SL2-02 a SL2-12 tienen  $mSO_4^{2-} > mCa^{2+}$ , por lo que seguirán el camino VI. El promedio total de  $mSO_4^{2-}$  de las aguas es de 82,314 mEq/L, mientras que el promedio total de  $mCa^{2+}$  es de 42,067 mEq/L (calculado a partir de los datos del Apéndice E).

La muestra SL2-01 exhibe un comportamiento aislado, donde la precipitación del yeso producirá  $mCa^{2+} \gg \gg mSO_4^{2-}$  debido al exceso inicial de  $mCa^{2+}$  sobre  $mSO_4^{2-}$  en las aguas, esto significa que a medida que avanza la precipitación, se eliminará el  $mSO_4^{2-}$  mientras que el  $mCa^{2+}$  se acumulará en la solución hasta que el agua alcance la composición final "Na, Ca, Mg, Cl" (Figura 23).

Por otro lado, en las muestras SL2-02 a SL2-12 la precipitación del yeso producirá  $mSO_4^{2-} \gg \gg mCa^{2+}$  debido al exceso inicial de  $mSO_4^{2-}$  sobre  $mCa^{2+}$  en las aguas. La precipitación potencial



la zona de Iza, se analizará el sector del Balneario Público de Erika y Sauzalito como un sector, y se usaron los caudales expuestos en el esquema de ordenamiento territorial del municipio de Iza, de la Alcaldía Municipal de Iza (2000).

La agrupación de los manantiales por sectores se muestra a continuación:

**Figura 24**

*Agrupación de los manantiales por sectores para el análisis de la prefactibilidad económica.*

Sector	Manantial
Lanceros	Pozo Hotel Lanceros 2 Pozo Hotel Lanceros Ojo del Diablo Pozo Azul
Salpa	Salpa principal Salpa 2 Salpa 3
La Playa	Vía Mina de carbón El Batán-La Playa
Iza	Sauzalito Balneario Público Iza

Los datos de caudales para cada sector se presentan en la Tabla 14. Cabe resaltar que para el sector de la antigua fábrica de sulfato (Salpa), se consideró el caudal del sector ITP por su cercanía con la zona y tomando en cuenta que no se tienen datos específicos de caudales para dicho sector y que era de interés.

**Tabla 14**

*Datos de caudales de la zona de estudio*

Caudal (l/s) LA PLAYA	Caudal (l/s) ITP LANCEROS	Caudal (l/s) IZA
1.50	2.80	0.68
2.76	6.10	1
0.13	0.34	1.72
1.41	4.59	
0.85	0.04	
0.05	0.08	
0.95		

Nota. Tomados de Corpoboyacá 2021 para el municipio de Paipa y de la Alcaldía de Iza (2000).

El resultado de multiplicar la concentración por el caudal es la cantidad de masa que se transporta por unidad de tiempo. Esta cantidad de masa puede representar la cantidad de sustancia que se está disolviendo, transfiriendo o transportando en el fluido.

Para los precios unitarios del mineral en el mercado y al encontrarse en dólares estadounidenses se usa la conversión: 1 dólar estadounidense (USD) equivale a 4168.00 pesos colombianos (COP), Google Finance, julio 01 de 2023

El análisis de prefactibilidad económica planeado en este trabajo de investigación necesita el valor de una inversión capital como base al proyecto, este valor es un supuesto de un posible escenario para ver la recuperación de la inversión que se pueda dar de acuerdo con la producción y a las ventas.

En este caso se trabajó con un escenario para las sales de sodio: Thenardita, Nahcolita y Trona. En la industria mundial de químicos, la mayor parte del sulfato de sodio es obtenido por la extracción minera de materiales ricos en sodio y sulfato como las sales naturales anteriormente mencionadas (Garrett, 2001). Los materiales son extraídos por remoción directa o por disolución en caliente y posterior extracción mecánica. Después de un pretratamiento, las fuentes de sodio se purifican con ayuda de separaciones por gravedad, lavados continuos, evaporaciones y disoluciones-cristalizaciones. En algunos casos, para la extracción de estas sales minerales se necesitan solventes agresivos, los cuales son dañinos para el medio ambiente (Garrett, 2001) pero de acuerdo con una publicación de la Universidad Nacional de Colombia, el uso de una técnica conocida como salting-out o precipitación con antisolvente, tiene un costo capital de 9790 millones de pesos, valor usado como base capital para analizar este escenario.

El nuevo proceso de extracción analizado por Ojeda Toro (2014) permite la producción sintética de esta sustancia con un bajo consumo energético y menor impacto ambiental, incluye la adición de un agente antisolvente a una solución acuosa de cloruro de sodio mezclado con ácido sulfúrico. La técnica fue propuesta por el Grupo de Investigación en Procesos Reactivos Intensificados con Separación y Materiales Avanzados (Prisma) de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) Sede Manizales. “Con el proceso salting out, también conocido como precipitación salina –usado para extraer proteínas– se modifica la solubilidad de una sal presente en solución con la inclusión de un agente antisolvente (agua y orgánicos) u otra sal, lo que permite separar más fácilmente la nueva sal (sulfato de sodio) de la mezcla”, explicó el profesor Miguel Ángel Gómez García, del Departamento de Ingeniería Química de la UNAL Sede Manizales.

Como parte de la investigación de la Nacional se estructuró la puesta en marcha de una planta de producción, en la cual se consideró el precio de las materias primas y productos incluido el transporte o flete y un seguro de mercancía. El costo capital total asciende a los 9.790 millones de pesos. Dentro de este se incluyen los costos del montaje, instalación, tuberías y accesorios, instrumentación y control, instalaciones eléctricas y construcciones civiles, por lo que es un buen valor capital de recuperación para analizar en este trabajo.

Para el escenario de la Thenardita que es la forma mineral del sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) se consideran las concentraciones de la Tabla 11 para los iones de Na y  $\text{SO}_4$  de cada muestra. En este sentido, se consideró la relación estequiométrica de la reacción que forma la Thenardita encontrando una relación 2:1 para el Na y 1:1 para el  $\text{SO}_4$  y después de esto se determinó el valor de concentración para dicho mineral en  $1\text{m}^3$  de agua de la siguiente manera:

Se realizará un ejemplo para el cálculo de la concentración que será la base para este y los demás escenarios, en este caso para la muestra de Hotel Lanceros 2:

Se convierte la concentración de sodio a moles por litro:

- Concentración de sodio (Na) = 4740.25 mg/L = 4.74025 g/L
- Cantidad de moles de Na por litro = (Concentración de sodio / Masa molar del sodio) =  
(4.74025 g/L / 22.99 g/mol)  $\approx$  0.2063 mol/L

Se repite el proceso anterior para el sulfato. Y para calcular la cantidad de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en un metro cúbico (m<sup>3</sup>) de agua:

$$\text{Cantidad de moles de Na}_2\text{SO}_4 \text{ en un m}^3 = (\text{Cantidad de moles de SO}_4 \text{ por litro} * 1000) / 2 = \\ (0.0279 \text{ mol/L} * 1000) / 2 = 13.95 \text{ mol}$$

Se divide la cantidad de moles de SO<sub>4</sub> por litro por 2 para obtener la cantidad de moles y se calcula entonces la masa de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en un m<sup>3</sup> de agua.

Por lo tanto, la cantidad aproximada de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en un metro cúbico de agua es de aproximadamente 1980.12 gramos. Y así este proceso se repite para cada muestra y para cada escenario.

Por ejemplo, en el caso de la Nacholita se deben convertir las concentraciones de sodio (Na) y bicarbonato (HCO<sub>3</sub>) a moles. Luego, multiplicar estas cantidades por 1000 para obtener los moles por metro cúbico. Finalmente, la cantidad de NaHCO<sub>3</sub> presente en un metro cúbico de agua es igual a la menor cantidad de moles entre el sodio y el bicarbonato. Esto se debe a que la relación estequiométrica de NaHCO<sub>3</sub> implica que se requiere 1 mol de sodio para reaccionar completamente con 1 mol de bicarbonato.

Se realizó la estimación preliminar de recursos, considerando el caudal medio natural con la concentración media y el caudal máximo por sector y la concentración máxima del Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Para el sector del Hervidero y Lago Sochagota, no se cuenta con la cantidad suficiente de sodio ni se cuenta con la información de caudal por lo que no se efectúa el análisis.

Con base en el precio unitario expuesto en Veritrade para el sulfato de sodio de 0.328 USD/kg que en Colombia equivale a 1367.63COP/kg, es decir, \$1.367.630 por tonelada. Se realizó una estimación de la producción anual que tendrían los tres sectores bajo el supuesto de dos escenarios. El primero considerando concentraciones y caudales promedio y el segundo concentraciones y caudales máximos. En las siguientes tablas se muestra la proyección de cuántos años serían necesarios para lograr el saldo total del costo capital para la técnica salting-out considerando que la totalidad de las ventas anuales puedan entrar como ganancia a capital. Este valor se obtiene al dividir el capital de dinero invertido, entre la ganancia de las ventas anuales así:  $(Costo\ capital/Ventas\ anuales)$  obteniendo los años de recuperación de acuerdo con la inversión que se halla con el coeficiente de retorno

**Tabla 15**

*Resultados de producción de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> con el caudal y la concentración media, valores de venta y años de recuperación del capital.*

CAUDAL MEDIO y CONCENTRACION MEDIA Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>							
PRODUCCIÓN	(mg/s)	(mg/día)	(kg/mes)	(kg/año)	Ventas anuales (USD)	Ventas anuales (COP)	Años de recuperación
Lanceros	9006.40	778153174.92	23344.59525	8520777.27	2794814.943	11653270611.44	0.84
Playa	4464.80	385758539.79	11572.75619	4224056.01	1385490.372	5776945721.98	1.69
Salpa	9498.64	820682383.68	24620.47151	8986472.10	2947562.849	12290168839.90	0.79
Iza	1.21839	105268.90	3.15806688	1152.69	378.0837669	1576459.46	6210.11

**Tabla 16**

*Resultados de producción de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> con el caudal y la concentración máxima, valores de venta y años de recuperación del capital.*

CAUDAL MAXIMO y CONCENTRACION MÁXIMA Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>							
PRODUCCIÓN	(mg/s)	(mg/día)	(kg/mes)	(kg/año)	Ventas anuales (USD)	Ventas anuales (COP)	Años de recuperación
Lanceros	30347.012	2621981837	78659.4551	28710701.11	9417109.965	39265616163.12	0.25
Playa	11291.33388	975571247.2	29267.13742	10682505.16	3503861.692	14609714528.13	0.67
Salpa	24955.4843	2156153844	64684.61531	23609884.59	7744042.144	32289586457.10	0.30
Iza	2.04938	177066.432	5.31199296	1938.87743	635.9517972	2651666.94	3692.01

Para el escenario del carbonato de sodio dihidratado  $\text{Na}_3(\text{HCO}_3)(\text{CO}_3) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Trona) se consideran las concentraciones de la Tabla 11 para los iones de Na,  $\text{HCO}_3$  y  $\text{CO}_3$  de cada lugar. En este sentido, se consideró la relación estequiométrica de la reacción que forma la Trona encontrando una relación de  $2\text{NaHCO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Na}_3(\text{HCO}_3)(\text{CO}_3) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

La relación estequiométrica entre el bicarbonato y el carbonato es 2:1, por lo que necesitamos el doble de moles de bicarbonato que de carbonato para reaccionar completamente.

La relación estequiométrica entre el carbonato y el hidróxido es 1:1, por lo que necesitamos la misma cantidad de moles de carbonato e hidróxido para reaccionar completamente.

Y la relación estequiométrica entre el bicarbonato y el hidróxido es 1:1, por lo que necesitamos la misma cantidad de moles de bicarbonato e hidróxido para reaccionar completamente.

Con base en el precio unitario expuesto en Ozdemir, Orhan & Jain, A & Gupta, V & Wang, Xuming & Miller, Jan. (2010) de 0.2629 USD/kg que en Colombia equivale a 1095.77COP/kg, es decir, \$ 1.095.770 por tonelada. En este caso solo se analizó la zona de Salpa que fue la única que conto con los valores de  $\text{CO}_3$  necesarios. Y los resultados se presentan a continuación:

**Tabla 17**

*Resultados de producción de  $\text{Na}_3(\text{HCO}_3)(\text{CO}_3) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  con el caudal y la concentración máxima, valores de venta y años de recuperación del capital.*

CAUDAL MAXIMO y CONCENTRACION MÁXIMA $\text{Na}_3(\text{HCO}_3)(\text{CO}_3) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$							
PRODUCCIÓN	(mg/s)	(mg/día)	(kg/mes)	(kg/año)	Ventas anuales (USD)	Ventas anuales (COP)	Años de recuperación
Salpa	17.87	1543536.00	46.30608	16901.72	4443.461978	18520396.85	528.60

**Tabla 18**

*Resultados de producción de  $\text{Na}_3(\text{HCO}_3)(\text{CO}_3) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  con el caudal y la concentración máxima, valores de venta y años de recuperación del capital.*

CAUDAL MÁXIMO y CONCENTRACION MÁXIMA $\text{Na}_3(\text{HCO}_3)(\text{CO}_3) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$							
PRODUCCIÓN	(mg/s)	(mg/día)	(kg/mes)	(kg/año)	Ventas anuales (USD)	Ventas anuales (COP)	Años de recuperación
Salpa	174.46	15073344	452.20032	165053.117	43392.4644	180860253.80	54.13

Para el escenario de la Nahcolita ( $\text{NaHCO}_3$ ) se consideran las concentraciones de la Tabla 11 para los iones de Na y  $\text{HCO}_3$  de cada lugar. En este sentido, se consideró la relación estequiométrica de la reacción que forma la Trona encontrando una relación 1:1 para el Na y 1:1 para  $\text{HCO}_3$ . Con base en el precio unitario expuesto en Ozdemir, Orhan & Jain, A & Gupta, V & Wang, Xuming & Miller, Jan. (2010) de 0.4724 USD/kg que en Colombia equivale a 1968.96COP/kg, es decir, \$ 1.968.960 por tonelada. Para el sector del Hervidero y Lago Sochagota, no se cuenta con la cantidad suficiente de sodio ni se cuenta con la información de caudal por lo que no se efectúa el análisis.

**Tabla 19**

*Resultados de producción de  $\text{NaHCO}_3$  con el caudal y la concentración media, valores de venta y años de recuperación del capital.*

CAUDAL MEDIO y CONCENTRACION MEDIA $\text{NaHCO}_3$							
PRODUCCIÓN	(mg/s)	(mg/día)	(kg/mes)	(kg/año)	Ventas anuales (USD)	Ventas anuales (COP)	Años de recuperación
Lanceros	7004.17	605160290.70	18154.80872	6626505.18	3130361.049	13047323645.44	0.75
Playa	862.47	74517338.57	2235.520157	815964.86	385461.7986	1606602165.54	6.09
Salpa	1834.86	158531985.00	4755.95955	1735925.24	820051.0814	3417967352.18	2.86
Iza	492.6826667	42567782.40	1277.033472	466117.22	220193.7734	917766156.14	10.67

**Tabla 20**

*Resultados de producción de NaHCO<sub>3</sub> con el caudal y la concentración máxima, valores de venta y años de recuperación del capital.*

CAUDAL MAXIMO y CONCENTRACION MÁXIMA NaHCO <sub>3</sub>							
PRODUCCIÓN	(mg/s)	(mg/día)	(kg/mes)	(kg/año)	Ventas anuales (USD)	Ventas anuales (COP)	Años de recuperación
<b>Lanceros</b>	28915.525	2498301360	74949.0408	27356399.89	12923163.31	53863657131.35	0.18
<b>Playa</b>	3068.361	265106390.4	7953.19171	2902914.975	1371337.034	5715723468.94	1.71
<b>Salpa</b>	6781.5225	585923544	17577.7063	6415862.807	3030853.59	12632577232.08	0.77
<b>Iza</b>	763.25	65944800	1978.344	722095.56	341117.9425	1421777273.82	6.88

Los resultados presentados anteriormente de prefactibilidad económica se presentan en el Apéndice A.

En conclusión, con los resultados de prefactibilidad económica y de acuerdo con las estimaciones obtenidas, para la Thenardita todos los escenarios son favorables en Paipa debido a sus ganancias y a que el dinero de la inversión se recupera en máximo un año con caudal y concentración máxima en los sectores de ITP-Lanceros, Salpa y La Playa. Con caudal y concentración media, en menos de un año en Salpa y Lanceros y en 1.7 años para el sector la Playa. Es importante recalcar que dichas proyecciones se realizaron bajo el supuesto de una ganancia del 100% sobre las ventas. En el sector de Iza, el escenario no es favorable ni factible, el retorno de la inversión supera los años para que el proyecto pueda ser viable.

El sector de interés para la Trona es el de la Antigua Fábrica de sulfato Salpa debido al reactivo límite del CO<sub>3</sub>, aunque al realizar el análisis se encuentra que ninguno de los escenarios es factible para la explotación económica de la Trona ya que en el caudal máximo supera los 50 años y en el caudal medio los 500 años del retorno de la inversión.

El escenario de la Nahcolita también se presenta como favorable en todas las zonas de Paipa, de acuerdo con las estimaciones de producción y ventas, teniendo como margen de retorno

para un caudal y una concentración media valores menores a 1 año en Lanceros, de 3 años en Salpa y de 6 años en La Playa; con el caudal y las concentraciones máximas el escenario es aún más favorable, ya que la recuperación sería 0.2, 1.7 o 0.8 años para Lanceros, La Playa y Salpa respectivamente. En el sector de Iza, el retorno de la inversión con caudal y concentración máxima es en 7 años y con caudal y concentración media es de 10 años por lo que el escenario es viable a mediano plazo.

Para las sales de Litio el escenario es diferente, debido a que los valores de litio son extremadamente bajos en las aguas termales de Paipa, por consiguiente, su explotación económica no es factible. La explotación comercial de litio en forma de carbonato, cloruro o sulfato no es factible ya que se tiene una cuenca abierta o exorreica en la zona de Paipa, un clima lluvioso con altas precipitaciones que impiden la concentración natural del litio. Si hay fuertes lluvias en la zona de extracción de litio, puede haber un exceso de agua que diluya las salmueras, lo que dificulta su posterior procesamiento y concentración. Además, el exceso de agua puede inundar las piscinas de evaporación y afectar el tiempo requerido para que el litio se concentre adecuadamente. Esto puede resultar en retrasos en la producción y una menor eficiencia en el proceso de extracción.

#### ***6.4.1 Comparación con el Salar de Atacama en Chile***

El norte de Chile posee al menos 59 salares (aproximadamente 5.211 km<sup>2</sup>), lagos salinos y lagunas (unos 222 km<sup>2</sup>) que se encuentran emplazados en cuencas cerradas, distribuidas dentro de un área de 53.000 km<sup>2</sup>. El salar de Atacama es el mayor yacimiento de salmuera de litio del mundo y de allí proviene la totalidad de la producción de litio de Chile. Tiene una concentración promedio de 0,14% (o 1.400 ppm) de litio equivalente, o alrededor de 1.680 mg/l. Las salmueras ricas en

litio se bombean desde el acuífero del salar, utilizando pozos de extracción, y desde la cabeza del pozo, se desvía a un sistema de estanques de evaporación (Cabello, 2022).

Geológicamente, la superficie del Salar de Atacama presenta dos componentes mayoritarios: depósitos aluviales y depósitos evaporíticos. Los primeros se forman por la erosión de las rocas que componen la Cordillera de Domeyko y Cordillera de los Andes, lo que genera sedimentos clásticos (gravas, arenas, limos y arcillas) que caen por gravedad y, al depositarse, forman las Planicies Aluviales. Por otro lado, los depósitos evaporíticos se desarrollan por la precipitación de sales debido a la evaporación del agua contenida en la salmuera o agua salobre. La halita es el principal mineral que compone del núcleo del Salar: se han observado hasta 900 m de halita (y otras sales) en las profundidades del núcleo. En la Zona Marginal, que es la zona de contacto entre el Núcleo y la Planicie Aluvial, se observan otros tipos de sales (sulfatos, como el yeso, y carbonatos como la calcita), intercalados con sedimentos clásticos de grano fino (arcilla y limo), y con depósitos de materia orgánica tal como los que se observan en la base y alrededores de las actuales lagunas que existen en el Salar. Estos depósitos se observan a profundidades tan grandes como 200m, lo que permite catalogar al Salar de Atacama como un salar maduro y estable durante al menos decenas de miles de años (Sociedad Química y Minera de Chile, 2020).

Existen algunas similitudes entre la geología de la región Paipa-Iza y la región del salar de Atacama en Chile como son: (1) en las dos regiones se presentan aguas termales asociadas a intrusivos de edad Neógeno y de composición félsica riolítica, (2) en ambas regiones existen sistemas hidrotermales que son responsables de la lixiviación de elementos en el subsuelo y su transporte hacia la superficie en donde eventualmente se concentran por evaporación, (3) ambas aguas termales son ricas en  $\text{NaSO}_4$  y  $\text{NaHCO}_3$ . La principal diferencia está en la climatología de las regiones que es opuesta, en Atacama la evaporación supera la precipitación mientras que en

Paipa e Iza la precipitación supera la evaporación. Además, la configuración de las cuencas, donde en Atacama se tiene una cuenca cerrada (endorreica) y en Paipa e Iza una cuenca abierta (exorreica) (Risacher & Alonso, 1996), lo cual dificulta la acumulación y la concentración de las sales, además de que en Atacama las aguas son ricas en  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  y en Paipa no son tan abundantes.

Teniendo en cuenta lo anterior, los valores de litio en los manantiales de Paipa e Iza no alcanzan concentraciones importantes a un nivel en que sea factible su explotación, ya que como se exhibe en la Tabla 9, los manantiales con los valores más altos no superan los 8,5 mg/l de litio. El Salar de Atacama en Chile, con una alta concentración de litio y las condiciones climáticas imperantes en el área, caracterizadas por una alta tasa de evaporación permiten la producción de litio en gran escala y a bajo costo (Cabello, 2022). Se pueden evidenciar las diferencias de las condiciones climáticas, geomorfológicas, geológicas y de extensión entre Paipa e Iza y Atacama, por lo que es comprensible que no se hallen niveles de litio similares en las aguas termales estudiadas en este proyecto.

## 7. Conclusiones

Los manantiales muestreados para este trabajo de investigación fueron doce en Paipa: Hotel Lanceros, Hotel Lanceros 2, Ojo del Diablo, Salpa principal, Salpa 2, Salpa 3, Pozo Azul, Vía Mina de Carbón, El Hervidero, Olitas, Lago Sochagota, El Batán-La Playa, y dos en Iza: Balneario público Erika y Sauzalito. Estos fueron escogidos debido a que cumplían con los requerimientos de ser muestras representativas de la zona, accesibles para el muestreo y con bajos niveles de contaminación.

Al realizar la comparativa de las propiedades físicas entre la época lluviosa y la época seca, se obtuvo como resultado que la temperatura de la época seca tiende a ser un poco más elevada, siendo el manantial El Batán-La Playa el valor máximo con 72,3°C y el Hervidero con 19,3°C el mínimo. Por otro lado, la conductividad de los manantiales en la época seca es más elevada, siendo el manantial Salpa 2 el que posee el valor máximo de 56800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y el mínimo Olitas de 170  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En cuanto al pH se evidenció que es superior en la época lluviosa, el mayor valor que se reporta es el Lago Sochagota con 10,16 y el menor El Hervidero con 3,66.

Mediante el análisis químico de los manantiales, que dio como resultado la composición de las aguas termales, se pudo observar que las especies dominantes de estas son el sulfato que llega hasta los 6700 mg/l, el cloro hasta 6600 mg/l, y el sodio hasta 5800 mg/l, igualmente destacan el potasio y el calcio con valores de hasta 2500 mEq/l. Además de estos, se registraron valores de litio hasta de 8,4 mg/l.

Las aguas fueron clasificadas como cloruradas de sodio y potasio o sulfatadas de sodio según su composición y del tipo agua de salmuera, que en este caso exhiben un comportamiento dominante en los cationes  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  y en los aniones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Al determinar la saturación de los minerales de interés, se concluye que la Mirabilita, la Thenardita, la Nahcolita y la Trona están subsaturados en la zona de estudio. Esto quiere decir que el sistema acuoso aún no está en equilibrio y no puede estar presente ningún sólido precipitado. En zonas donde el valor del producto de actividad y el producto de saturación tienden a ser iguales, en épocas secas extensas, se puede alcanzar la saturación y precipitación de la Mirabilita.

Al determinar la evolución geoquímica de las aguas termales de Paipa e Iza se obtuvo que el primer mineral en precipitar es la calcita, luego debido a un mayor contenido de calcio en todas las muestras, se presenta la segunda división química que lleva a la precipitación del yeso. En este punto las muestras se dividen, la primera muestra Hotel Lanceros 2, posee mayor contenido de calcio que de sulfato, dando como composición final "Na, Ca, Mg, Cl", mientras que las demás muestras Pozo Hotel Lanceros, Ojo del diablo, Lago Sochagota, Pozo Azul, Pozo Principal Salpa, Salpa 2, Salpa 3, Vía Mina de Carbón, El Batán-La Playa, El Hervidero y Sauzalito, al tener mayor contenido de sulfato, dan como composición final "Na, Mg, SO<sub>4</sub>, Cl".

Se concluye que el mejor escenario es para las sales de sodio en las zonas de estudio. En Paipa, se presenta un retorno de la inversión menor a 2 años para la Thenardita y la Nahcolita, pero la explotación económica de la Trona no es factible. En el sector de Iza, el escenario no es favorable ni factible para la Thenardita, el retorno de la inversión supera los años para que el proyecto pueda ser viable; pero para la Nahcolita el retorno de la inversión a mediano plazo es factible.

Para las sales de Litio, se concluye un escenario no favorable ni factible debido a que los valores de Litio son extremadamente bajos en las aguas termales de Paipa e Iza. La explotación comercial de Litio en forma de carbonato, cloruro o sulfato no es viable ya que se tiene una cuenca abierta y un clima lluvioso con altas precipitaciones que impiden la concentración natural del Litio en la zona de estudio.

## 8. Recomendaciones

La planificación de actividades a realizar después de determinar la posible existencia del depósito es muy importante, suele subdividirse en tres etapas, en términos generales se trata de una fase de pre-exploración, una de exploración y otra de evaluación, las cuales se recomienda realizar en un proyecto próximo más avanzado y con mayor detalle.

Considerando el potencial en sales de la zona, es necesario realizar un estudio hidrogeológico a detalle para reducir la sobreestimación de recursos producto de la falta de datos para el caudal en los diferentes lugares. En el presente trabajo se pondera bajo el principio de un caudal promedio con la finalidad de proponer un escenario financiero preliminar, aunque propiamente el análisis de la red de flujo tanto de la cuenca como del acuífero presente en la zona mediante datos obtenidos de pozos es fundamental para una correcta estimación de recursos, ya con el fin de un análisis de factibilidad avanzado.

La inversión de capital necesaria para explotar los minerales analizados puede variar significativamente según varios factores, como la ubicación del yacimiento, el tamaño y calidad del depósito, la tecnología utilizada, la infraestructura existente y los costos laborales y regulatorios específicos del país o región, esta prefactibilidad solo busca establecer un posible escenario por lo que el valor capital es una estimación aproximada y los valores reales pueden variar en función de diversos factores y condiciones específicas.

Por otra parte el conocer a detalle el proceso de producción que se llevará a cabo reducirá la incertidumbre financiera sobre el proyecto, en este sentido, se consideró el costo capital de la técnica salting-out pero no el costo neto de producción lo que reduce el margen de utilidad y por ende la retrasa el retorno de la inversión, encontrado en este escenario otra área de oportunidad para desarrollar en un futuro análisis de factibilidad.

**Referencias Bibliográficas**

- Alcaldía de Paipa. (2015). Información general de Paipa. [https://archive.is/20140310085228/http://www.paipa-boyaca.gov.co/informacion\\_general.shtml](https://archive.is/20140310085228/http://www.paipa-boyaca.gov.co/informacion_general.shtml)
- Alcaldía de Iza. (2015). Información general de Iza. <https://archive.is/mqsbK>
- Alfaro, C. (2002). Geoquímica del sistema geotérmico de Paipa. INGEOMINAS, informe inédito. Bogotá.
- Alfaro, C., Matiz, J. C., Rueda, J., Rodríguez, G., González, C., Beltrán, M., ... & Malo, J. (2017). Actualización del modelo conceptual del área geotérmica de Paipa. Informe Técnico, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia.
- Alfaro, C. M., Monsalve, M. L., Franco, J. V., & Ortiz, I. (2012). Contribuciones al modelo conceptual sistema geotérmico de Paipa. Informe técnico, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.
- Alfaro Valero, C.M., Rueda, J.B. y Matiz León, C. eds. (2019). *Sistema geotérmico hidrotermal de Paipa*. Libros del Servicio Geológico Colombiano.
- Alfaro-Valero, C. M., Rueda Gutiérrez, J. B., Matiz-León, J. C., Beltrán-Luque, M. A., Rodríguez-Rodríguez, G. F., Rodríguez-Ospina, G. Z., ... & Pinilla-Pachon, A. O. (2020). Paipa Geothermal System, Boyacá: Review of exploration studies and conceptual model. The Geology of Colombia.
- Alfaro, C., Velandia, F., Cepeda, H. y Pardo, N. (2010). Modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico de Paipa, Colombia. En Actas del Congreso Geotérmico Mundial.
- Alfaro, C., Velandia, F., Cepeda, H., Pardo, N., Vásquez, L. E., & Espinosa, O. (2005). Modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico de Paipa. Informe técnico. Ingeominas, Bogotá.

- Atalayar. (2023). Los minerales estratégicos. Atalayar. <https://www.atalayar.com/>
- Bertrami, R., Camacho, A., De Stefanis, L., Medina, T., and Zuppi, G. (1992). Geochemical and Isotopic exploration of the geothermal area of Paipa, Cordillera Oriental, Colombia. Geothermal investigations with isotope and geochemical techniques in Latin America. IAEA. San Jose, Costa Rica.
- BNamericas. (2019). Litio en Latinoamérica: No se trata solo de las salmueras. BNamericas.com; *BNamericas*. <https://www.bnamericas.com/es/reportajes/litio-en-latinoamerica-no-se-trata-solo-de-las-salmueras>
- Boussingault, M. & Roulin. (1849). Viajes científicos a los Andes ecuatoriales o colección de memorias sobre física, química e historia natural de la Nueva Granada, Ecuador y Venezuela. Lasserre Editorial.
- Cabello, J. (2022). Reservas, recursos y exploración de litio en salares del norte de Chile. *Andean geology*, 49(2), 297-306.
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá. (2021). <https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2022/03/Informe-de-Gestion-2021.pdf>
- Comunicaciones UA/ David Pasten. Litio versus agua: ¿costo y beneficio? (2017). *Comunicacionesua.cl*. <http://www.comunicacionesua.cl/2017/08/16/litio-versus-agua-costoy-beneficio>
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). *Hidrología Subterránea; Segunda Edición Corregida*. Ediciones Omega: Barcelona, Spain, 2350.
- Davis, SN y De Weist, RJM. (1966). *Hidrogeología*. John Wiley and Sons, Nueva York, 463 p.
- Drever, J. I. (1988). *The Geochemistry of Natural Waters, Second Edition*. (Vol. 437). Englewood Cliffs: Prentice hall. University of Wyoming.

Dirección General de Desarrollo Minero. (2018). Perfil de Mercado del Litio. En EU Mexicanos.

[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419275/Perfil\\_Litio\\_2018\\_\\_T\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419275/Perfil_Litio_2018__T_.pdf)

D. Kirk Nordstrom, R. Blaine McCleskey, James W. Ball, (2008), Sulfur geochemistry of hydrothermal waters in Yellowstone National Park: IV Acid-Sulfate waters. US Geological Survey 24, 2: 191-207.

Elosegui, A. Ed. (2009). Conceptos y técnicas en ecología fluvial. Fundación BBVA.

Ferreira P. y Hernández, R., (1988). Evaluación Geotérmica en el Área de Paipa, Basada en Técnicas Isotópicas, Geoquímica y Aspectos Estructurales. Tesis de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

García, G. (2022). La guerra del litio se repetirá en 2022: estos son sus principales yacimientos. Híbridos Y Eléctricos; Híbridos y Eléctricos.

Garrett, D. E, 2001. Sodium sulphate: Handbook of deposits, processing and use, First edition

Gidahatari. (2023). gidahatari. Gidahatari. <https://gidahatari.com>

Hanna Instruments Colombia. (2023). La Temperatura afecta el pH del Agua. Hannacolombia.com.<https://www.hannacolombia.com/blog/post/39/la-temperatura-afecta-el-ph-del-agua>

Hanna Instruments Colombia. (2023). ¿Qué es la conductividad o conductividad eléctrica? Hannacolombia.com.<https://www.hannacolombia.com/blog/post/621/que-es-la-conductividad-o-conductividad-electrica>

Hem, J. D. 1985. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. U. S. Geological Survey Water – Supply Paper 2254, 263 pp.

Ingrid Garcés M. (s.f.) Minerales Industriales Evaporíticos. Universidad de Antofagasta. Recuperado el 23 de mayo de 2023 de <https://intranetua.uantof.cl/salares/#>

- Japan Consulting Institute, (1983). Feasibility study report of Geothermal Power Plant for Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (Electrificadora de Boyacá).
- Jaramillo, L. F., (2001). Compilación de información geológica de la zona de Paipa – Iza. INGEOMINAS. Informe Interno.
- La, E. (2023). *CARBÓN - Indicadores La República*. Diario La República.
- Last, W. M., & Ginn, F. M. (2009). The chemical composition of saline lakes of the Northern Great Plains, Western Canada.
- Lillo, J. (2007). Técnicas Hidrogeoquímicas, 140pp (Doctoral dissertation, Tesis (en opción del título de Máster Oficial en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos), Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España.
- Lithium Carbonate Price - Buy Cheap Lithium Carbonate At Low Price On Made-in-China.com. (2023). Made-In-China.com. <https://www.made-in-china.com/price/lithium-carbonate-price.html>
- Lurry, D. L. (2023). Sp - IFM - Prepare. Usgs.gov. [https://pubs.usgs.gov/of/2000/ofr00-213/manual\\_sp/prepare.html](https://pubs.usgs.gov/of/2000/ofr00-213/manual_sp/prepare.html)
- Marion, G. M., Millero, F. J., Camões, M. F., Spitzer, P., Feistel, R., & Chen, C. (2011). pH of seawater. *Marine Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2011.04.002>
- Martínez, M. C., & Carrión Mero, P. C. (1999). Estudio económico-técnico de la explotación de sulfato sódico y diseño de la mina de yeso en Belorado Burgos, España (Bachelor's thesis). Tomado de: Espol.edu.ec. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/3408>
- McLanahan. (2019). McLanahan. McLanahan. <https://www.mclanahan.com/es/blog/el-mineral-que-consumimos-pr%C3%A1cticamente-todos-los-d%C3%ADas#>

- Millas, I. G. (2018). La Industria de Litio en Chile. Universidad de Antofagasta. Depto. Ingeniería Química.
- Mineral Data Publishing (2001). Version 1. Crystal Data. Tomado de: Azkurs.org.  
<https://azkurs.org/c-2001-2005-mineral-data-publishing-version-1-crystal-data.html>
- Navia, A. y Barriga, A. (1929). Informe sobre las aguas termomedicinales de Paipa, Colombia. Gobernación de Boyacá. Imprenta Nacional. Bogotá. 76 pp.
- Ojeda Toro, J. C. (2014). Producción de sulfato de sodio mediante cristalización reactiva (Doctoral dissertation).
- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). (1982). Geotérmica Italiana, “Estudio de reconocimiento de los recursos geotérmicos de la República de Colombia”.
- Ozdemir, Orhan & Jain, A & Gupta, V & Wang, Xuming & Miller, Jan. (2010). Evaluation of flotation technology for the trona industry. Minerals Engineering.
- Pardo, N., Jaramillo, J. M., and Cepeda, H. (2005a). The paipa volcano, eastern cordillera of colombia, south america (part ii): Petrography and major elements petrology. Earth Sci. Res. J, (2):148–164.
- Producción sintética de sulfato de sodio, más rentable y ambiental (2019). VirtualPro.co.  
<https://www.virtualpro.co/noticias/produccion-sintetica-de-sulfato-de-sodio-mas-rentable-y-ambiental>
- Protocolos, Procedimientos y Metodologías - IDEAM. (2018). Ideam.gov.co.  
<http://www.ideam.gov.co/web/agua/protocolos-procedimientos-y-metodologias>
- Risacher, F., & Alonso, H. (1996). Geoquímica del Salar de Atacama, parte 2: evolución de las aguas. Andean Geology, 23(2), 123-134.

- Romero, F. H., & Rincón, M. A. (1990). Características petrográficas y geoquímicas de las rocas volcánicas de Iza (Departamento de Boyacá, Colombia). *Geología Colombiana*, 159-168.
- Rodríguez, C. (1998). Exploración y caracterización de los recursos de aguas termominerales en el municipio de Paipa. Informe Técnico. CORPOBOYACÁ. Bogotá.
- Sánchez, F. J. (2017). *Hidrología Superficial y Subterránea*. Create Space Independent Publishing Platform; 1er edición. Departamento de Geología - Universidad de Salamanca, España.  
[http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion\\_geoquimica.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion_geoquimica.pdf)
- Sela, G. (2020). La alcalinidad del agua. Cropaia. <https://cropaia.com/es/blog/la-alcalinidad-del-agua/>
- Servicio Geológico Mexicano (2017). Factores que controlan un yacimiento. Sgm.gob.mx.  
[https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones\\_geologicas/Factores-control-yacimiento.html](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Factores-control-yacimiento.html)
- SGC (2019). *Geotermia en Colombia*. Imprenta Nacional de Colombia Bogotá, D.C., Colombia.  
<https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/geotermia-en-colombia.pdf>
- Sociedad Química y Minera de Chile, 2020. Cuenca Salar de Atacama.  
<https://www.sqmsenlinea.com/contexto-salar>
- Velandia, F. (2003). Informe Técnico: Cartografía geológica y estructural sector sur del municipio de Paipa. Proyecto de Geodinámica, INGEOMINAS.
- Veritrade (2017). Importaciones y Exportaciones - los demás Sulfato de Sodio. Veritradecorp.com.  
<https://www.veritradecorp.com/es/colombia/importaciones-y-exportaciones/los-demas-sulfato-de-sodio/283319>