



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**



ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICO Y DE CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LOS ACUÍFEROS DE LOS VALLES DE SAN NICOLÁS

Paulina Arango Agudelo

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Ambiental

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniera Ambiental

Asesores

Ph.D Teresita Betancur Vargas

MsC. Hector Mario Herrera Parra

Corporación Autónoma Regional de las cuencas del Río Negro y Nare

CORNARE

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a una pequeña niña de cabello rizado y ojos grandes, una niña soñadora, curiosa y resiliente que, a pesar de los obstáculos y las dudas, nunca dejó de creer en la posibilidad de lograr grandes cosas. A esa niña que, sin saberlo, me enseñó que los sueños se alcanzan paso a paso, con esfuerzo, perseverancia y fe en uno mismo. Gracias a mí, por no rendirme cuando el camino se hizo difícil, por levantarme cada vez que sentí que no podía más, y por mantener viva la esperanza y la constancia que hoy me permiten ver este proyecto culminado.

Dedico también este logro a la persona que ha sido mi mayor ejemplo de fortaleza y amor incondicional: mi mamá, Luz Marina Agudelo Gómez. Gracias por estar siempre a mi lado, por buscar la forma de apoyarme sin importar las circunstancias, por tus sacrificios, tus consejos y por ser ese pilar firme que me sostuvo en cada momento de este camino.

A mis amigos y familiares, quienes, con sus palabras de aliento, su compañía y su confianza en mí, me dieron fuerzas cuando las necesitaba. A todos ellos, mi gratitud profunda por acompañarme en este proceso.

Y, de manera muy especial, agradezco a Yin (J.M) por su apoyo moral, su paciencia y por estar siempre presente, dándome el empujoncito que tantas veces necesité para no perder el rumbo y seguir adelante en la realización de este estudio.

A todos ustedes, gracias por ser parte de este capítulo de mi vida.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad de Antioquia y a la Facultad de Ingeniería por haberme proporcionado la formación académica y las herramientas necesarias para enfrentar los retos de este estudio, así como a los docentes y asesores que guiaron mi proceso investigativo con sus conocimientos y experiencia. De manera especial, expreso mi gratitud a la profesora Teresita Betancur Vargas, sin quien este trabajo no hubiese sido posible. Gracias, profesora, por compartir generosamente sus conocimientos, por su acompañamiento constante durante mis prácticas y por guiarme en cada paso de este proceso.

Extiendo mi agradecimiento a CORNARE por brindarme la oportunidad de realizar mi práctica profesional y desarrollar este trabajo de grado en el marco de su labor en la gestión y protección ambiental. Agradezco el acceso a la información, el acompañamiento técnico y el espacio de aprendizaje que me permitió crecer tanto personal como profesionalmente. Un agradecimiento especial a Héctor Mario Herrera por su apoyo y orientación a lo largo de mi recorrido en la corporación.

Finalmente, a cada persona que, desde el ámbito académico y profesional, aportó su tiempo, conocimiento y disposición para el desarrollo de este estudio, les expreso mi más sincero reconocimiento.

Tabla de contenido

Resumen	13
Abstract	14
Introducción	15
1.	13
1.1	13
1.2	14
2.	16
3. Objetivos	21
3.1 Objetivo general	21
3.2 Objetivos específicos	21
4. Marco teórico	22
4.1 Calidad del agua	22
4.1.1 Indicadores de calidad del agua	22
4.1.2 Usos del agua	22
4.1.3 Índices de calidad según su uso	23
4.2 Hidrogeoquímica	23
4.2.1 Representaciones gráficas	23
4.2.2 Secuencia de evolución hidrogeoquímica de Chebotarev:	24
5. Metodología: Materiales y métodos	25
5.1 Síntesis del MHC:	25
5.2 Revisión bibliográfica	25
5.3 Estructuración de la base de datos de calidad del agua	25
5.4 Calidad del agua subterránea	26
5.5 Análisis hidrogeoquímico	27

5.5.1 Diagramas de Piper y Stiff:	28
5.5.2 Mapas de Stiff	28
5.5.3 Síntesis hidrogeológica	28
6. Resultados	29
6.1 Síntesis de información hidrogeoquímica y de calidad	29
6.2 Descripción de los datos	30
6.3 Calidad del agua subterránea en los VSN	34
6.3.1 Indicadores	34
6.3.2 Mapas de concentración	39
6.3.3 Índice de calidad de agua subterránea – ICG-As	43
6.3.4 Calidad de agua subterránea a través de los años según su uso	59
6.4 Hidrogeoquímica	66
6.4.1 Balance iónico	66
6.4.2 Hidrogeoquímica y los flujos del agua subterránea	68
6.4.3 Facies hidrogeoquímicas	72
6.4.4 Síntesis de las características hidrogeoquímica	85
7. Mapas complementarios	86
8. Discusión final	89
9. Recomendaciones: Trabajo futuro	90
10. Referencias	92

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación de los VSN	18
Figura 2. Diagrama de flujo para determinar a qué muestras se le aplica hidroquímica	27
Figura 3. Mapa de localización de los puntos monitoreados para los años 2022, 2023 y 2024	33
Figura 4. Mapa de concentración de cloruros	40
Figura 5. Mapa de concentración de sulfatos	41
Figura 6. Mapa de conductividad eléctrica	42
Figura 7. Mapa de concentraciones de coliformes totales	43
Figura 8. Mapa de nivel piezométrico con los puntos del cuál fue obtenido	70
Figura 9. Mapa de isopiezas. VSN	71
Figura 10. Mapa de direcciones de flujo subterráneo. VSN	72
Figura 11. Mapa geológico con los puntos de monitoreo diferenciados por UHG captada	73
Figura 12. Diagrama de Piper – 2022 67	75
Figura 14. Mapa de facies hidrogeoquímicas por Stiff y unidades geológicas – 2022	76
Figura 15. Diagrama de Piper – 2023 69	78
Figura 17. Mapa de facies hidrogeoquímicas por Stiff y unidades geológicas – 2023	79
Figura 18. Diagrama de Piper - julio 2024 72	80
Figura 20. Mapa de facies hidrogeoquímicas por Stiff y unidades geológicas – Julio 2024	81
Figura 21. Diagrama de Piper-septiembre 2024 74	82
Figura 23. Mapa de facies hidrogeoquímicas por Stiff y unidades geológicas – septiembre 2024	83
Figura 24. Diagrama de Piper - noviembre 2024 76	84

<i>Figura 26.</i> Mapa de facies hidrogeoquímicas por Stiff y unidades geológicas – noviembre 2024	85
<i>Figura 27.</i> Mapa de cobertura de suelos en los VSN	87
<i>Figura 28.</i> Mapa de vertimientos al suelo en los VSN durante el 2024	88

Lista de ecuaciones

Ecuación 1 .	26
Ecuación 2.	26
Ecuación 3.	26
Ecuación 4.	26
Ecuación 5.	26
Ecuación 6.	26
Ecuación 7.	28

Siglas, acrónimos y abreviaturas

VSN: Valles de San Nicolás

MHC: Modelo hidrogeológico conceptual

UDEA: Universidad de Antioquia

CORNARE: Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare

ICG-As: Índice de calidad general para agua subterránea

Resumen

Este estudio presenta un análisis integral de la calidad y la hidrogeoquímica del agua subterránea en los acuíferos de los Valles de San Nicolás (VSN), una región estratégica del Oriente Antioqueño que enfrenta una creciente presión sobre sus recursos hídricos debido al rápido desarrollo urbano, agrícola e industrial. Ante la necesidad de comprender el estado actual de los acuíferos y su evolución en el tiempo, se aplicaron herramientas hidrogeoquímicas y el Índice de Calidad General para Agua Subterránea (ICG-As) a los datos de monitoreo recopilados por CORNARE entre los años 2022 y 2024.

El análisis evidenció que la calidad del agua subterránea en la región está influenciada tanto por procesos naturales, vinculados a la geología y evolución hidrogeoquímica de los acuíferos, como por factores antrópicos, principalmente vertimientos, uso intensivo de agroquímicos y contaminación microbiológica. Las facies predominantes identificadas en los acuíferos reflejan una evolución química que varía desde aguas jóvenes bicarbonatadas cálcicas en acuíferos en depósitos aluviales y el del saprolito del Batolito Antioqueño, hasta aguas más evolucionadas cloruradas y sulfatadas en los acuíferos en roca fracturada de la anfibolita de La Ceja.

Los resultados del ICG-As mostraron una calidad deficiente para consumo humano, con la mayoría de las captaciones clasificadas como "mala", debido a la presencia sistemática de coliformes totales y *E. coli*. Para uso agrícola, se observó una calidad excelente en la mayor parte de las muestras. En cuanto al uso industrial, la calidad fue mayormente aceptable, aunque algunos puntos mostraron incumplimientos relacionados con pH, hierro y manganeso.

El estudio destaca la necesidad de fortalecer la red de monitoreo, establecer estrategias de protección de las zonas de recarga y avanzar hacia modelos hidrogeológicos integrados que consideren tanto la calidad como el flujo del agua subterránea. Esta investigación constituye un aporte clave para la gestión sostenible del recurso hídrico en los VSN y proporciona insumos técnicos para la toma de decisiones ambientales y territoriales en la región.

Palabras clave: Agua subterránea, hidrogeoquímica, calidad del agua, Valles de San Nicolás, gestión hídrica sostenible.

Abstract

This study presents a comprehensive analysis of groundwater quality and hydrogeochemistry in the aquifers of the San Nicolás Valleys (VSN), a strategic region in Eastern Antioquia facing increasing pressure on its water resources due to rapid urban, agricultural, and industrial development. Given the need to understand the current state of the aquifers and their evolution over time, hydrogeochemical tools and the General Groundwater Quality Index (ICG-As) were applied to monitoring data collected by CORNARE between 2022 and 2024.

The analysis showed that groundwater quality in the region is influenced by both natural processes, linked to the geology and hydrogeochemical evolution of the aquifers, and anthropogenic factors, mainly discharges, intensive use of agrochemicals, and microbiological contamination. The predominant facies identified in the aquifers reflect a chemical evolution ranging from young calcium bicarbonate waters in the Antioquian Batholith to more evolved chloride and sulfate waters in sectors overlying amphibolites of the La Ceja.

The ICG-As results indicated poor quality for human consumption, with most water sources classified as "bad" due to the systematic presence of total coliforms and *E. coli*. For agricultural use, a progressive degradation was observed, mainly associated with high copper concentrations. Regarding industrial use, the quality was mostly acceptable, although some points showed non-compliance related to pH, iron, and manganese.

The study highlights the need to strengthen the monitoring network, establish protection strategies for recharge zones, and advance towards integrated hydrogeological models that consider both groundwater quality and flow. This research is a key contribution to the sustainable management of water resources in the VSN and provides technical input for environmental and territorial decision-making in the region.

Keywords: Groundwater, hydrogeochemistry, water quality, San Nicolás Valleys, sustainable water management.

Introducción

Los municipios pertenecientes a los Valles de San Nicolás - VNS concentran la mayor población de la subregión del Oriente Antioqueño. Si bien la mayor parte de la población se abastece de aguas superficiales, el crecimiento del casco urbano, industrial y agrícola ha aumentado la demanda del recurso hídrico, con una mayor presión en aguas superficiales. Por lo anterior, el agua subterránea, cumple con un papel fundamental, pues se comporta como flujo base, recargando ríos y quebradas en temporadas de sequía, lo que garantiza el caudal base y el abastecimiento para diferentes usos. Los acuíferos de los VSN presentan una recarga potencial media, con un aproximado de 547,68 mm/año y una relación con respecto a la precipitación de 28,8% en condiciones neutras del ENSO (EAFIT, 2020).

En los municipios de los VSN existen un total de 193 captaciones de aguas subterráneas, de las cuales el 29.53% son utilizadas para riego, 27.98% para uso industrial, 15.54 para uso pecuario, 14.50 para uso comercial y 12.44 % para uso doméstico (Cornare, 2024).

El incremento de la agricultura, vertimientos residuales y el crecimiento urbano aumentan los riesgos de contaminación y disponibilidad de dicho recurso. Por lo cual CORNARE busca conocer la calidad actual del agua subterránea de la región, con el objetivo de identificar contaminantes y evaluar su cumplimiento con la normativa ambiental vigente.

Si bien la corporación cuenta con una base de datos de parámetros fisicoquímicos del agua subterránea, dichos datos no han sido interpretados. En este estudio se realizará un análisis de los datos hidroquímicos registrados desde el 2022 hasta el 2024, se revisará la normativa ambiental vigente colombiana, Resolución 2115 de 2007, Decreto 3930 de 2010 y el Decreto 1594 de 1984 para compararla con los indicadores seleccionados para evaluar la calidad de agua subterránea, posteriormente se aplicará el índice de calidad del agua subterránea -ICG-As- (Vélez, M. 2017) para conocer el potencial de uso (consumo humano, riego o industrial). Con el fin de dar los primeros pasos para entender los procesos que condicionan las características del agua, en el marco del modelo hidrogeológico conceptual, finalmente, se realiza la evaluación de la composición química de los acuíferos a través de mapas y gráficos hidroquímicos que ayudan a la visualización de la distribución temporal y espacial de los parámetros analizados.

Mediante el análisis conjunto de los estudios realizados en los acuíferos de los VSN, la corporación podrá establecer los protocolos necesarios para su manejo, conservación y protección en la región.

1. Planteamiento del problema

El rápido crecimiento poblacional, urbano, agrícola e industrial en los Valles VSN, ha provocado una creciente presión sobre los recursos hídricos superficiales, llevando a que las aguas subterráneas tomen un papel estratégico como fuente de abastecimiento complementaria.

A pesar de su importancia, los acuíferos en la región enfrentan amenazas derivadas de actividades antrópicas como vertimientos de aguas residuales, el uso intensivo de agroquímicos en la floricultura y la expansión urbana desorganizada. Estos factores incrementan el riesgo de contaminación y ponen en duda la aptitud del recurso hídrico subterráneo para consumo humano, uso agrícola y uso industrial.

Si bien, CORNARE ha recopilado información valiosa desde 2016 sobre la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua subterránea, esta información no había sido analizada de forma integrada ni comparada con la normativa ambiental vigente. Así mismo, no se había realizado una evaluación multianual de la calidad del agua subterránea que permitiera identificar tendencias temporales ni patrones espaciales asociados a las unidades hidrogeológicas del territorio.

Por lo anterior, se hace necesario realizar un análisis integral de los datos existentes, que permita conocer el estado de la calidad del agua subterránea, evaluar su evolución en el tiempo, establecer la relación entre las características químicas del agua y las condiciones geológicas, para apoyar la toma de decisiones en cuanto a la gestión y protección sostenible del recurso hídrico subterráneo.

1.1 Área de estudio

La jurisdicción de Cornare se encuentra ubicada en el Noroccidente de Colombia y está distribuido en cinco zonas de planificación ambiental, 1. Bosques, 2. Páramo, 3. Porce - Nus, 4. Aguas, 5. Valles de San Nicolás. Esta última es el área que fue estudiada en el siguiente informe. Los VSN se componen por los municipios de Rionegro, La Ceja, El Carmen de Viboral, El Retiro, Marinilla, Guarde, San Vicente, El Santuario y La Unión. Su área de cobertura es de 176.600 Ha (31.400 urbanas y 145.200 rurales) y es la zona donde se encuentra la mayor parte de la población del oriente antioqueño donde la industria, el comercio, la explotación de hatos lecheros, la agricultura y la floricultura son las principales actividades económicas (CORNARE, 2015).

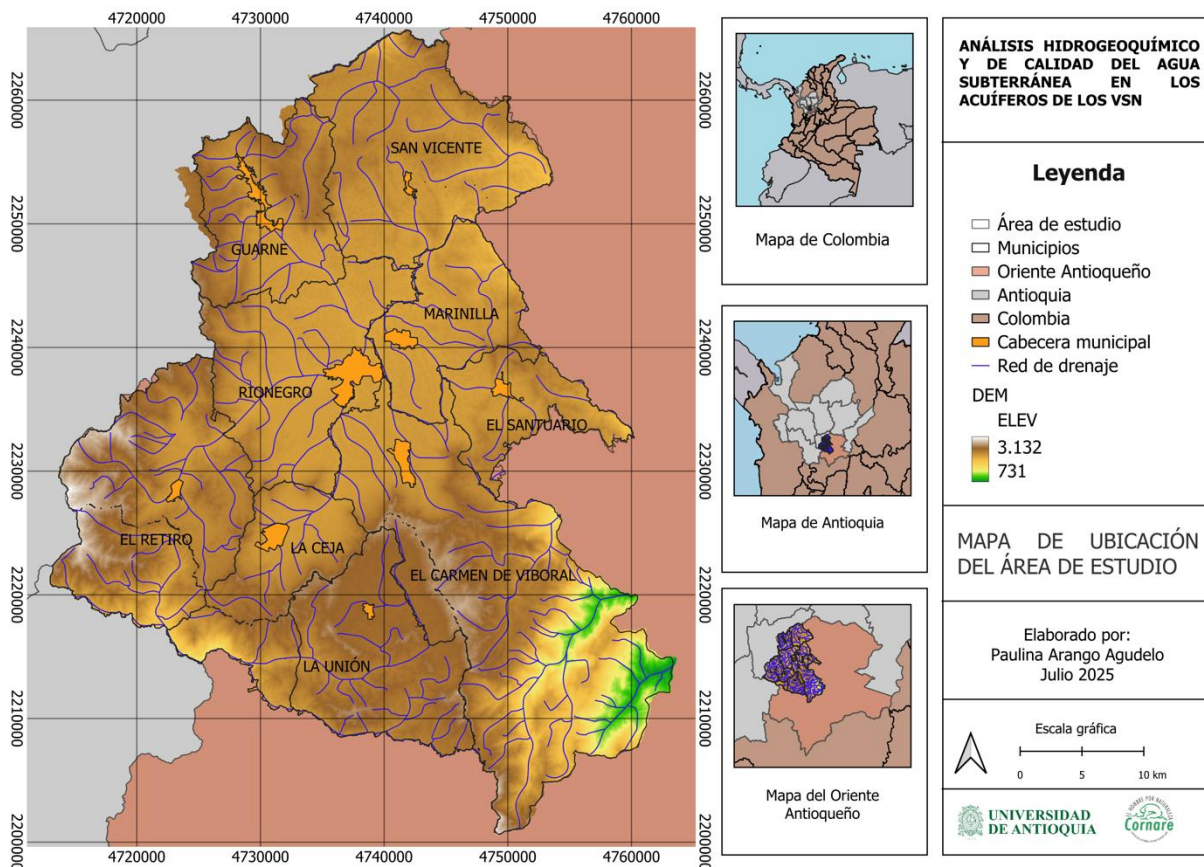


Ilustración 1. Mapa de ubicación de los VSN

1.2 Antecedentes

Los VSN se encuentran ubicados en el oriente antioqueño colombiano, jurisdicción de CORNARE. En 1997 la corporación junto con la Universidad Nacional sede Medellín realizó la evaluación hidrogeológica preliminar para los municipios de: El Retiro, Rionegro, La Ceja, El Carmen, Guarne, Marinilla y Medellín. Luego, en el 2014 Wilmer Enrique Giraldo Ramírez de la Universidad Nacional sede Medellín en su convenio de prácticas con CORNARE durante el 2014 realizó el MHC inicial. En el 2018, David Santiago Gómez Camargo y David Garcés Mesa realizaron cada uno su trabajo de grado titulados; “Determinación de la unidad hidrogeológica y estimación de la recarga potencial del sistema hidrogeológico del Valle de San Nicolás” (Gómez, D. 2018) y “Definición de la red de flujo subterránea de la vega aluvial del Río Negro, mediante modelado numérico” (Garcés, D. 2018) respectivamente, ambos estudiantes pertenecientes a La Escuela de Ingenieros de Antioquia. Posteriormente en el 2020 la Universidad de EAFIT y EPM

realizaron un estudio titulado: “Evaluación de la disponibilidad hídrica subterránea y definición de estrategias de abastecimiento en los VSN y Aburrá, Antioquia” (Eafit. 2020) donde presentaron la actualización del MHC. Gracias a los estudios anteriores se estimó un potencial hidrogeológico y un modelo numérico del sistema hidrogeológico. Actualmente Valentina Marín realiza una primera evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación utilizando las metodologías GOD y DRASTIC.

2. Justificación

Este estudio contribuye de manera significativa al conocimiento técnico de la calidad y la del agua subterránea en los VSN, un territorio donde la presión sobre el recurso hídrico ha ido en aumento y donde los acuíferos han sido poco estudiados en cuanto a su calidad.

La evaluación se basa en el análisis multianual de información fisicoquímica y microbiológica recopilada por CORNARE entre 2022 y 2024, lo que permite identificar tendencias de deterioro, conservar registros históricos y caracterizar de forma más precisa la aptitud del agua subterránea frente a tres usos principales: consumo humano, agrícola e industrial. A través de la aplicación del ICG-As (Veléz, 2017), y del análisis de facies hidrogeoquímicas, se identifican no solo los niveles de cumplimiento frente a la normativa ambiental (Resolución 2115 de 2007 y Decreto 1594 de 1984), sino también los posibles procesos naturales o antrópicos que estén condicionando la calidad del agua.

Este trabajo permite interpretar la calidad del agua no de forma aislada, sino en relación con la geología local, los sistemas de flujo, la ubicación de captaciones, los usos del suelo, y los vertimientos existentes en el área.

Adicionalmente, el estudio contribuye a generar conocimiento aplicable para futuras investigaciones y trabajos académicos, y representa un aporte a la gestión integral del recurso hídrico en una región clave para el desarrollo del Oriente antioqueño.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Analizar las condiciones químicas del agua subterránea en los acuíferos de los VNS, en el Oriente antioqueño (Colombia).

3.2 Objetivos específicos

- Sintetizar el modelo hidrogeológico conceptual de la zona de estudio a partir de información disponible.
- Estructurar una base de datos hidroquímica con parámetros útiles para evaluar la calidad del agua subterránea en los acuíferos de interés, a partir de información disponible.
- Determinar la variación espacial y temporal de la calidad del agua subterránea en los acuíferos de los Valles de San Nicolás a partir de indicadores e índices de calidad de agua subterránea para la zona de estudio.
- Realizar una caracterización de facies hidrogeoquímicas.

4. Marco teórico

4.1 Calidad del agua

La calidad del agua del recurso hídrico es el conjunto de características fisicoquímicas y microbiológicas que habitan en él, que determinan la aptitud del recurso hídrico para distintos usos o propósitos específicos como consumo humano, uso agricultura, uso industrial, uso recreativo o de conservación de fauna y flora. (Chapman, D. 1996).

La calidad del agua subterránea se puede deber a factores naturales, como la geología del área, el clima y la vegetación o por actividades antropogénicas que pueden generar contaminación y aunque las aguas superficiales son más vulnerables a la contaminación por factores antrópicos que las aguas subterráneas, también pueden restaurarse o recuperarse más rápidamente que una fuente subterránea, debido a las escorrentías y lluvias presentes durante el tiempo. (UAJMS)

4.1.1 Indicadores de calidad del agua

Los indicadores de calidad de agua son parámetros que ayudan a evaluar el estado de la calidad del cuerpo de agua para un uso en específico (UNESCO-IHP, 2006). Los indicadores se clasifican en tres grupos, físicos, químicos y microbiológicos.

Según el ENA (Estudio Nacional del Agua) de Colombia, los indicadores de calidad de agua son herramientas técnicas que permiten evaluar el estado, la presión, el uso y la gestión del recurso hídrico en el país. Estos indicadores varían ligeramente entre ediciones del ENA, pero algunos son recurrentes y fundamentales para el análisis integral del agua en Colombia.

4.1.2 Usos del agua

Los usos del agua se refieren a las diferentes formas en que el recurso hídrico es aprovechado por los seres humanos y los ecosistemas. En Colombia, y específicamente según el Estudio Nacional del Agua (ENA) y la normativa como el Decreto 1541 de 1978, los usos del agua se clasifican principalmente en: Consumo humano y doméstico, agropecuario, industrial, recreación y conservación de fauna y flora.

4.1.3 Índices de calidad según su uso

Los índices de calidad de agua (ICA) son utilizados como herramientas que permiten analizar varios indicadores asignándoles un valor numérico para representar la calidad general del agua para un uso determinado (CCME, 2001).

El valor del índice se presenta generalmente en una escala cualitativa que puede incluir categorías como excelente, buena, regular, mala y muy mala, lo que facilita su interpretación por parte de tomadores de decisiones, comunidades y usuarios del agua.

4.2 Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica estudia la composición química del agua, así como los procesos geológicos, químicos y biogeoquímicos que tienen lugar entre el agua, las rocas y el medio ambiente y controlan la recarga, el tránsito, la permanencia y la descarga de los acuíferos, como también la distribución de los elementos disueltos en el agua en el sistema hidrogeológico buscando entender los mecanismos de interacción agua-roca, las fuentes de los iones disueltos, y los factores naturales y antrópicos que pueden alterar la calidad del agua subterránea (Appelo y Postma, 2005)

4.2.1 Representaciones gráficas

La hidrogeoquímica utiliza herramientas gráficas y estadísticas para facilitar la interpretación de los resultados. Entre las más utilizadas se encuentran:

- **Diagramas de Piper:** Se conforma por dos triángulos equiláteros donde se representan las concentraciones en meq/l de los aniones y los cationes, los cuales se proyectan en un rombo central en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes.

Las concentraciones de los iones dadas en meq/l se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes respectivamente. En cada triángulo se reúnen solo tres aniones y tres cationes (son los iones mayoritarios) y a cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión. (Agua y SIG, 2011)

- **Diagramas de Stiff:** Se compone por tres ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama, y los aniones al derecho. Siempre el Na^+ se confronta con el Cl^- , el Ca^{+2} con el HCO_3^- y el Mg^{+2} con el SO_4^- . Todos los ejes horizontales están a la misma escala (lineal) y las concentraciones están dadas en meq/l. (Agua y SIG, 2011)

5. Metodología: Materiales y métodos

5.1 Síntesis del MHC:

Con la información disponible en CONARE y analizada posteriormente se estructuró una síntesis del MHC de los VSN que incluye las principales unidades geológicas y geomorfológicas, las unidades hidrogeológicas identificadas en la región y sus características hidrológicas e hidráulicas relevantes.

5.2 Revisión bibliográfica

Se recopiló y analizó información sobre la geología en los VSN, la composición de los suelos, sus usos, la hidrología, las unidades hidrogeológicas, los niveles piezométricos, direcciones de flujo, recarga y descarga; estudios previos de los MHC en los VSN y de hidrogeoquímica aplicada en aguas subterráneas para familiarizarse con el área de estudio y fundamentar criterios para el análisis hidroquímico.

5.3 Estructuración de la base de datos de calidad del agua

Para el desarrollo de esta fase se siguieron los siguientes pasos:

- Lectura y revisión de la base de datos original suministrada por CONARE.
- Unificación de los puntos de muestreo identificando de que pozo o aljibe fue tomada cada muestra para los diferentes años
- Depuración de la base de datos de inconsistencias
- Asignación de un código a cada punto de muestreo para facilitar su seguimiento temporal.
- Asociaron atributos como el acuífero captado, la profundidad, y la geología cercana y vecina. Para identificar la unidad hidrogeológica captada por cada pozo o aljibe se realizó el siguiente procedimiento:

Se identificó el punto de muestreo y se realizó la busque del diseño del pozo o del aljibe suministrado por el usuario, la columna litológica y la prueba de bombeo realizada. Con el diseño del pozo identificamos la profundidad de este, la ubicación de los filtros y el acceso del agua; con la columna litológica identificamos la ubicación de los acuíferos y de la prueba de bombeo extrajimos información de interés como el nivel estático, caudal captado. Con el análisis integrado de la información se logró encontrar si la captación pertenece a un acuífero libre, uno confinado o una mezcla del libre y del semiconfinado.

5.4 Calidad del agua subterránea

Para evaluar la calidad del agua subterránea se aplicó el ICG-As (Vélez, M. 2017) a los años 2022, 2023 y 2024, el índice se realiza aplicando las siguientes ecuaciones:

ECUACIÓN 1 .

$$ICG - As = 100 - \left(\frac{\sqrt{A_1^2} + F^2 + A_2^2}{1,732} \right)$$

ECUACIÓN 2.

$$A_1 = \left(\frac{N^\circ \text{ de objetivos no alcanzados}}{\text{Total de objetivos medidos}} \right) * 100$$

ECUACIÓN 3.

$$F = \left(\frac{N^\circ \text{ de pruebas fallidas}}{\text{Total de pruebas realizadas}} \right) * 100$$

ECUACIÓN 4.

$$A_2 = \left(\frac{N}{0,01N + 0,01} \right) * 100$$

ECUACIÓN 5.

$$N = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{Evaluación}}{\text{Total de pruebas realizadas}} \right) * 100$$

ECUACIÓN 6.

$$\text{Evaluación} = \left(\frac{\text{Valor prueba fallida}}{\text{Valor del objetivo}} \right) - 1$$

Donde:

ICG – As: Índice de calidad general para agua subterránea

A₁: Parámetros medidos que no cumplieron con los objetivos de calidad o que superan el límite establecido por la normativa

F: Porcentaje de las pruebas que no cumplieron con el objetivo o que superan el límite establecido por la normativa

A₂: Representa la severidad del incumplimiento

N: Magnitud de todos los incumplimientos combinados

Evaluación = Magnitud individual del incumplimiento

5.5 Análisis hidrogeoquímico

Se extrajeron los iones mayoritarios de cada muestra con el fin de realizar un balance iónico. Aquellas muestras con un error de balance menor al 15 % fueron seleccionadas para elaborar diagramas de Piper y Stiff con el fin de identificar los tipos de agua predominantes y sus posibles procesos geoquímico y de evaluar los cambios espaciales y temporales en el agua subterránea.

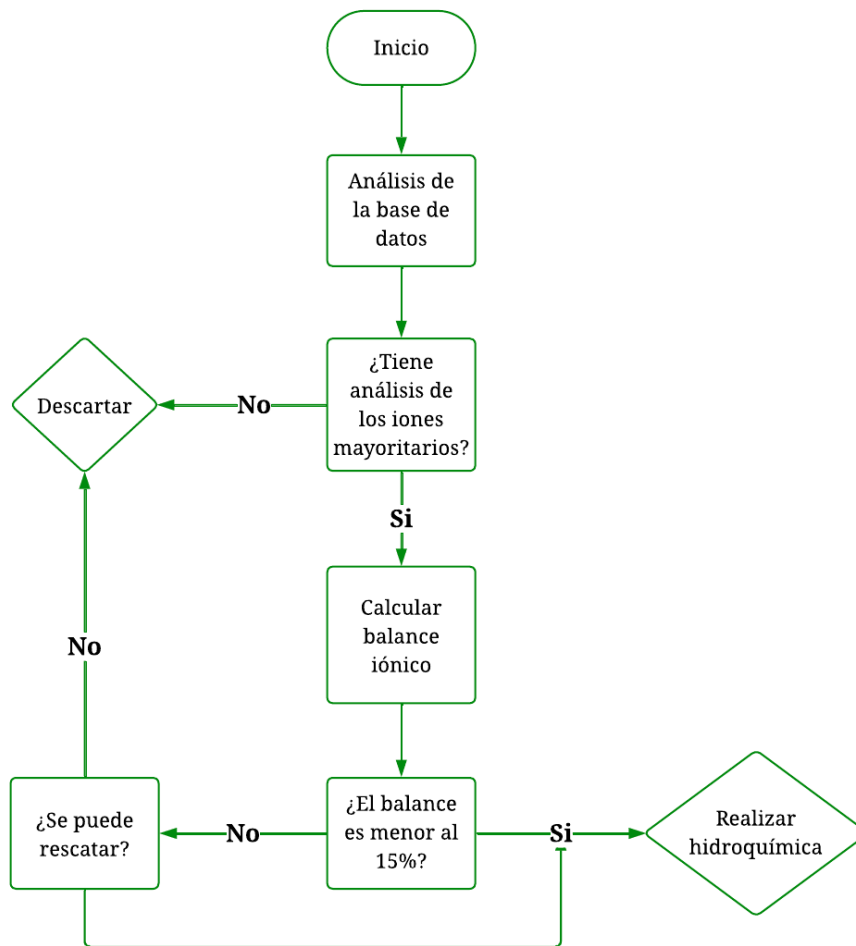


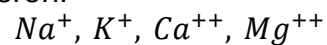
Ilustración 2. Diagrama de flujo para determinar a qué muestras se le aplica hidroquímica

Para identificar las muestras que no cumplen con el balance iónico se aplicó la siguiente ecuación:

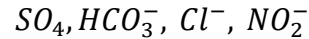
ECUACIÓN 7.

$$\text{Balance iónico (\%)} = \frac{\sum C - \sum A}{\sum C + \sum A} * 100$$

Los cationes tomados fueron:



Los aniones tomados fueron:



5.5.1 Diagramas de Piper y Stiff:

Luego de aplicar la ecuación de balance iónico en la plantilla del programa francés Diagrammé, se utilizó este mismo para realizar los diagramas hidroquímicos, separando las muestras de acuerdo con el acuífero o los acuíferos captados.

5.5.2 Mapas de Stiff

Se siguió el paso a paso del video elaborado por Andrés Zapata para utilizar el código de descarga libre que se obtiene desde github, el cual fue compartido por Juliana Ossa Valencia, para sobre poner los diagramas de Stiff sobre el mapa geológico de los VSN, el código tuvo una pequeña modificación para poder ser utilizado en el programa ArcGIS PRO y poder ajustar la escala según la necesidad.

5.5.3 Síntesis hidrogeológica

Finalmente se analizó la información obtenida para analizar los resultados de forma integral.

6. Resultados

6.1 Síntesis de información hidrogeoquímica y de calidad

El basamento cristalino fracturado conformado por el Batolito Antioqueño es la principal unidad geológica en los VSN, el perfil típico de meteorización se compone de suelo residual, zona saprolítica y zona gruss. Se identifica también unidades geológicas compuestas de depósitos no consolidados de vertientes, y depósitos aluviales, debido al manto de ceniza volcánica presente en gran parte de los suelos del área de estudio. (Universidad Eafit. 2020).

Las características geológicas y geomorfológicas tienen una influencia directa en la recarga, circulación y almacenamiento del agua subterránea, las zonas más permeables como los depósitos aluviales y la zona fracturada del basamento poseen un alto potencial hidrogeológico. Es así como se componen las seis unidades hidrogeológicas en los VSN donde tres de ellas corresponden a los siguientes acuíferos; 1) Acuífero de planicie aluvial (UHG 1), que abarca un área de 95,61 km², identificado como el acuífero libre con mayor potencial hidrogeológico gracias a la presencia de gravas y arenas saturadas y parcialmente saturadas. 2) Acuífero de terraza aluvial (UHG 2), con un área de 37,02 km² y al igual que la UHG 1, es un acuífero libre, con potencial hidrogeológico intermedio debido a los niveles de arena y saprolito presentes en él, aunque estos materiales se pueden encontrar parcial o completamente saturados, en el acuífero también se encuentran materiales del tamaño del limo que limita su capacidad de almacenamiento. 3) Acuífero en superficie de erosión II del Río Negro (UHG 3), caracterizado por tener la mayor extensión (326,45 km²) sin embargo posee el menor potencial hidrogeológico debido a la gran cantidad de materiales finos, donde la permeabilidad presente es secundaria. (Universidad EAFIT, 2020)

Las tres unidades hidrogeológicas restantes corresponden a acuitardos que se dividen en; 1) Acuitardo en superficie de erosión I nivel Santa Elena – La Unión (UHG 4) compuesto principalmente por rocas metamórficas, ígneas y depósitos cuaternarios representadas por la anfibolita de La Ceja. Se encuentra al occidente de los VSN y sus pendientes varían entre 0° a 15°. 2) Acuitardo en superficie de erosión II nivel Rionegro (UHG 5) su litología corresponde principalmente al Batolito Antioqueño y en una menor proporción a depósitos aluviales, anfibolitas de La Ceja. Está localizado al oriente de los VSN y sus pendientes son mayores a 15°. 3) Acuitardo en depósitos de vertiente (UHG 6) que posee acumulaciones desordenadas de limos, cantos y bloques de rocas, sus pendientes están entre los 15° y 78° y se encuentra localizado en toda la extensión de los VSN. (CORNARE, 2015)

6.2 Descripción de los datos

La base de datos de calidad de agua subterránea suministrada por CORNARE cuenta con un registro inicial de 202 muestras analizadas entre los años 2016 y 2024 con un vacío de información para el año 2017 y con tres jornadas de monitoreo para el año 2024 en los meses de julio, septiembre y noviembre. Luego de organizar la base de datos, se identificaron 32 puntos de muestreo diferentes, en los cuales se tiene la posibilidad de obtener información de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, entre ellos: pH, temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, saturación de oxígeno, DBO5, DQO, nitrógeno amoniacal, E. Coli, coliformes totales, nitratos, turbiedad, alcalinidad total, nitritos, cadmio, cobre, plomo, zinc, hierro total, manganeso, dureza total, cloruros, sulfatos, calcio, magnesio, potasio y sodio. Además, la base de datos cuenta con la siguiente información para cada punto de muestreo: tipo de captación, latitud, longitud, municipio, vereda, cuenca, fecha y hora de muestreo.

Luego de filtrar los datos y organizarlos se decidió escoger 29 puntos de muestreo y un total de 176 registros.

Para visualizar la distribución temporal, los datos se representan en la **tabla 1** dónde se observa un escenario de monitoreo año a año, en la donde la etiqueta “1” indica que se tienen registros de datos para el punto de muestreo y el año correspondientes y la etiqueta “0” indica la ausencia de registros.

Tabla 1. Disponibilidad de datos en el transcurso de los años

Punto de muestreo	Código	Años										Total
		2016	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024 Julio	2024 Septiembre	2024 Noviembre	
ALJIBE ALIMENTOS CARNÍCOS	AL1-A.CARNÍCOS	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	6
ALJIBE ARCLAD	AL-ARCLAD	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
ALJIBE CLÍNICA SOMER	AL-C.SOMER	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	6
ALJIBE COLRESIN	AL-COLRESIN	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
AL1-CORLANC	ALJIBE CORLANC	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	6
ALJIBE MARQUILLAS SA	AL1-MARQUILLAS	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	6
ALJIBE SIKÁ 1	AL1-SIKÁ	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	4
ALJIBE SIKÁ 2	AL2-SIKÁ	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	4
ALJIBE TAHAMI CULTIFLORES	AL1-TAHAMI	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
AVICOLA DE ORIENTE AVICOR	AL2-AVICOR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
AVINAL - ALJIBE 3	AL3-AVINAL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
AVINAL - POZO 1	P1-AVINAL	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	9
FLORES EL TRIGAL	P1-TRIGAL	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	6
FLORES LA VIRGINIA P4	P4-VIRGINIA	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	3
FLORES LA VIRGINIA P5	P5-VIRGINIA	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
INMUJNIZAR	AL-INMUJNIZAR	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	5
INVERSIONES CARDONA 1	AL1-I.CARDONA	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	5
INVERSIONES CARDONA 2	AL2-I.CARDONA	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	5
NACIONAL DE CHOCOLATES SA P1	P1-N.CHOCOLATES	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	5
NACIONAL DE CHOCOLATES SA P2	P2-N.CHOCOLATES	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	6
NACIONAL DE CHOCOLATES SA P4	P4-N.CHOCOLATES	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	2
NACIONAL DE CHOCOLATES SA P5	P5-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4
NACIONAL DE CHOCOLATES SA P6	P6-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5
POZO AGROPECUARIA LOS AGAPANTOS	P1-AGAPANTOS	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
POZO FLORES EL CAPIRO P3	P3-CAPIRO	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10
POZO FLORES EL CAPIRO P6	P6-CAPIRO	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
POZO NOVAVENTA	P1-NOVAVENTA	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	6
POZO SENCO EUROCERAMICA	P1-S.EUROCERAMICA	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	5
TINTATEX - POZO 1	P1-TINTATEX	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	3

Tras agrupar y analizar los datos, evaluando una serie de criterios de calidad de información con ayuda de especialistas de laboratorio y del supervisor de la práctica, el MsC. Héctor Mario Herrera y la asesora interna, Ph.D. Teresita Betancur, la confiabilidad y relevancia de los datos, llevó a la decisión de trabajar con los registros para los años 2022, 2023 y 2024, este último año con registros para los meses de julio, septiembre y noviembre. Se trabajó con un total de 25 puntos de monitoreo y un total de 176 registros. Se obtuvo la **tabla 2** donde se observa la disponibilidad de datos para los cinco monitoreos seleccionados para el análisis.

Tabla 2. Distribución de los datos para los monitoreos seleccionados

Punto de muestreo	Código	Años					Total
		2022	2023	2024 Julio	2024 Septiembre	2024 Noviembre	
ALJIBE ALIMENTOS CARNICOS	AL1-A.CARNICOS	1	0	0	0	0	1
ALJIBE ARCLAD	AL-ARCLAD	1	1	1	1	1	5
ALJIBE CLINICA SOMER	AL-C.SOMER	1	0	0	0	0	1
ALJIBE COLRESIN	AL-COLRESIN	1	1	1	1	1	5
AL1-CORLANC	ALJIBE CORLANC	1	0	0	0	0	1
ALJIBE MARQUILLAS SA	AL1-MARQUILLAS	1	0	0	0	0	1
ALJIBE TAHAMI CULTIFLORES	AL1-TAHAMI	1	1	1	1	1	5
AVICOLA DE ORIENTE AVICOR	AL2-AVICOR	1	1	1	1	1	5
AVINAL - ALJIBE 3	AL3-AVINAL	0	0	0	0	1	1
AVINAL - POZO 1	P1-AVINAL	1	1	1	1	0	4
FLORES EL TRIGAL	P1-TRIGAL	1	0	0	0	0	1
FLORES LA VIRGINIA P4	P4-VIRGINIA	1	1	0	0	0	2
FLORES LA VIRGINIA P5	P5-VIRGINIA	1	0	0	0	0	1
INMUNIZAR	AL-INMUNIZAR	1	0	0	0	0	1
NACIONAL DE CHOCOLATES SA P1	P1-N.CHOCOLATES	0	0	1	1	1	3
NACIONAL DE CHOCOLATES SA P2	P2-N.CHOCOLATES	1	0	0	0	0	1
NACIONAL DE CHOCOLATES SA P4	P4-N.CHOCOLATES	0	1	0	0	0	1
NACIONAL DE CHOCOLATES SA P5	P5-N.CHOCOLATES	1	0	1	1	1	4
NACIONAL DE CHOCOLATES SA P6	P6-N.CHOCOLATES	1	1	1	1	1	5
POZO AGROPECUARIA LOS AGAPANTOS	P1-AGAPANTOS	1	1	1	1	1	5
POZO FLORES EL CAPIRO P3	P3-CAPIRO	1	1	1	1	1	5
POZO FLORES EL CAPIRO P6	P6-CAPIRO	1	0	0	0	0	1
POZO NOVAVENTA	P1-NOVAVENTA	1	0	0	0	0	1
POZO SENCO EUROCERAMICA	P1-S.EUROCERAMICA	1	0	0	0	0	1
TINTATEX - POZO 1	P1-TINTATEX	0	1	1	0	1	3

En el mapa de localización de los puntos monitoreados y seleccionados (**Figura 3**) se observa la distribución espacial de las captaciones en el área de estudio. Los puntos rojos representan las captaciones que cuentan con información de monitoreo en los tres años analizados; para el año 2024, se consideró que el punto estaba incluido si presentaba información en al menos uno de los tres muestreos de dicho año. Los puntos amarillos muestran las captaciones con información en dos de los años de interés, mientras que el

color verde identifica aquellas que las captaciones cuentan con información de monitoreo para un solo año.

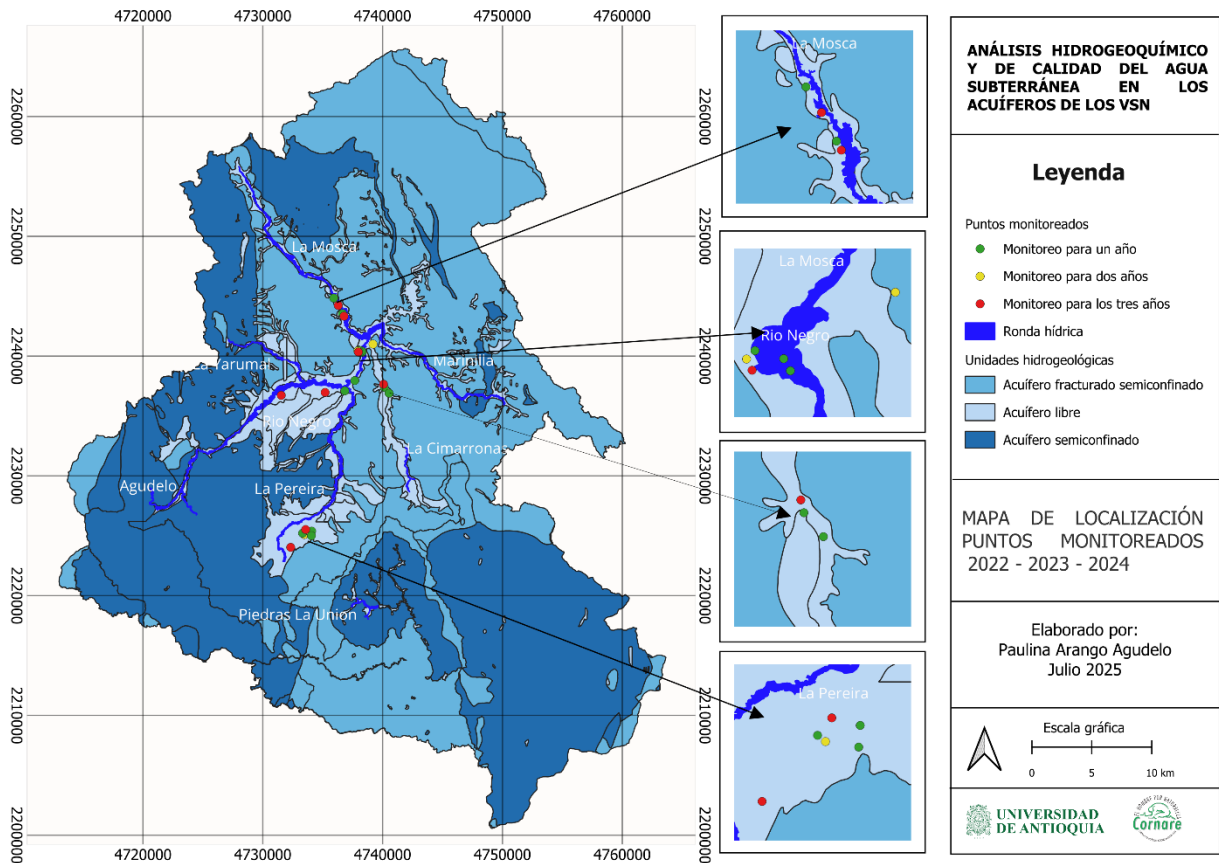


Ilustración 3. Mapa de localización de los puntos monitoreados para los años 2022, 2023 y 2024

Para continuar con la organización de la base de datos de calidad de agua subterránea y obtener un mejor análisis de la información se analizó la información de diseños de pozo, columna litológica, prueba de bombeo y captaciones en los VSN para identificar de que acuífero capta cada pozo o aljibe y así conocer con mayor certeza de que UHG proviene la muestra de agua tomada. Esta información se consolidó en la base de datos ANEXO 1

6.3 Calidad del agua subterránea en los VSN

6.3.1 Indicadores

Los indicadores seleccionados para este estudio fueron doce, entre los parámetros evaluados fueron pH, conductividad, coliformes totales, escherichia coli, alcalinidad, dureza, cloruros, sulfatos, carbono orgánico total, nitratos, hierro, color, manganeso, cobre y sólidos totales disueltos y fueron comparados con la Resolución 2115 del 2007 para consumo humano y Decreto 1594 de 1984 para uso industrial y uso agrícola.. En ninguno de los monitoreos fueron evaluados COT, STD ni color.

En los análisis realizados para el año 2022 (**tabla 3**) se encontró que el parámetro de coliformes totales supera el valor límite establecido en el 100% de los puntos monitoreados. En cuanto a escherichia coli se encontraron concentraciones superiores al límite en el 50% indicando presencia de contaminación microbiológica y un riesgo para la salud si el agua se destina para uso de consumo humano sin un tratamiento adecuado. Así mismo, el 33,3 % de las muestras presentaron valores por debajo de 6,5 y ninguna está por encima de 9, valores establecidos en la Resolución 2115 de 2007 para agua destinada a consumo humano. Los valores de conductividad registrados están por encima de 1000 (us/cm) en los pozos 3 y 6 de Flores El Capiro y el pozo 4 de Flores La Virginia indicando alta concentración de sólidos totales que pueden provenir de actividades antrópicas o procesos químicos naturales.

Tabla 3. Indicadores de calidad de agua subterránea. VSN 2022

Código Interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestra	Parámetros VSN-Ag 2022															
			pH (Unidades de pH)	Conductividad (µs/cm)	Coliformes totales (microg/100cm3)	E. Coli (microg/100cm3)	Alcalinidad total (mg/L CaCO3)	Dureza total (mg/L CaCO3)	Cloruro (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	CO3 (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Hierro (mg/L)	Color (UIC)	Manganeso (mg/L)	Cobre (mg/L)	STD (mg/L)	
1.260	2/08/2022	ALCOQUESIN	5,0	208,4	233,5	0,0	43,5	67,8	16,3	38,2	-	1,7	0,2	-	0,2	0,0	-	
1.261	2/08/2022	AL-A-CARNICOS	6,6	110,4		26,1	0,0	52,2	53,5	0,6	1,5	-	0,3	0,1	-	0,1	0,0	-
1.262	2/08/2022	AL-C-SOMER	6,6	115,2		2419,6	365,8	37,0	46,2	5,2	3,6	-	2,5	0,1	-	0,0	0,0	-
1.263	2/08/2022	AL-INMUNIZAR	6,2	113,1		2,0	0,0	47,8	46,3	2,8	1,3	-	1,0	0,1	-	0,0	0,0	-
1.264	2/08/2022	PS-AGAPANTOS	6,1	121,8	2419,6	0,0	46,6	50,5	1,6	6,8	-	1,2	0,1	-	0,0	0,0	-	
1.265	2/08/2022	AL-S-TAHAM	5,5	142,2	307,8	2,0	38,5	54,7	2,4	0,0	-	12,5	0,1	-	0,0	0,0	-	
1.267	2/08/2022	PS-CARRO	8,3	1365,5	77,6	0,0	381,5	25,8	300,7	384,4	-	0,0	0,1	-	0,1	0,0	-	
1.267	2/08/2022	PS-VIRGINIA	8,3	1365,5	77,6	0,0	381,5	25,8	300,7	384,4	-	0,0	0,1	-	0,1	0,0	-	
1.268	2/08/2022	PS-VIRGINIA	8,3	417,0	8,5	0,0	125,0	30,0	31,8	40,7	-	0,0	0,1	-	0,0	0,0	-	
1.269	2/08/2022	AL-S-CDRIANC	6,1	67,2	2419,6	344,8	26,1	30,0	0,1	6,6	-	0,3	0,4	-	0,1	0,0	-	
1.270	2/08/2022	PS-TRIGAL	7,3	275,0	2419,6	16,0	303,3	54,7	27,1	36,7	-	0,0	1,7	-	0,1	0,0	-	
1.271	2/08/2022	PS-CARRO	8,5	3964,0	141,6	1,0	151,1	36,8	250,9	281,9	-	0,0	0,1	-	0,0	0,0	-	
1.272	2/08/2022	AL-2-AVICOR	6,3	4,3	2419,6	2046	62,0	128,3	20,2	41,3	-	15,0	0,2	-	0,0	0,0	-	
1.273	2/08/2022	PS-N-CHOCOLATES	6,5	184,7	184,2	63,0	89,1	85,1	3,3	0,0	-	0,8	0,1	-	0,0	0,0	-	
1.274	2/08/2022	PS-N-CHOCOLATES	7,0	79,4	190,0	50,0	46,6	36,4	0,0	0,0	-	0,3	0,1	-	0,0	0,0	-	
1.276	2/08/2022	AL-S-MARQUILLAS	6,7	103,3	525,0	50,0	84,8	82,0	9,0	0,0	-	0,3	0,2	-	0,2	0,0	-	
1.277	2/08/2022	PS-NOVAVENTA	7,2	214,5	1119,9	0,0	97,8	90,7	6,4	0,0	-	0,3	0,1	-	0,1	0,0	-	
1.279	2/08/2022	PS-AMNAL	7,0	366,0	136,5	0,0	119,6	128,3	36,9	0,0	-	1,5	0,1	-	0,0	0,0	-	
		Valor Máximo	8,5	1365,5	2419,6	344,8	381,5	128,3	300,7	384,4	-	15,0	1,7	-	0,2	0,0	-	
		Promedio	6,9	454,0	380,1	49,8	84,0	54,5	54,5	66,3	-	2,3	0,2	-	0,1	0,0	-	
		Valor mínimo	5,5	4,3	2,0	0,0	38,5	25,8	0,0	0,0	-	0,0	0,1	-	0,0	0,0	-	
		Valores Límites	6,5	1080	0	0	200	30	28	28	5	10	0,3	15	0,2	0,2	1,0	
			9,0															

En los monitores realizados en el 2023 (**tabla 4**) se mantuvo contaminación microbiológica por coliformes totales, exceptuando las muestras de agua provenientes de los pozos 4 y 6 de la Nacional de Chocolates, el indicador de escherichia coli mejoró significativamente, sin embargo, el 35,2% de las muestras superan los valores establecidos en la Resolución 2115 de 2007 para agua destinada a consumo humano. Siendo este último el que mayor contaminación presenta en estos parámetros, 77600 microorganismos/100cm³ para coliformes totales y 630 microorganismos/100cm³ para escherichia coli. Esta contaminación puede ser debido a infiltración de aguas residuales domésticas.

Tabla 4. Indicadores de calidad de agua subterránea. VSN 2023

Código interno laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestra	Parámetros ICG-Ac 2023														
			pH (Unidades de pH)	Conductividad (µS/cm)	Coliformes totales (microg/100cm3)	E. Coli (microg/100cm3)	Alcalinidad total (mg/L CaCO3)	Dureza total (mg/L CaCO3)	Cloruros (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	COT (mg/l)	Nitritos (mg/L)	Hierro (mg/L)	Cobalt (µg/L)	Manganeso (mg/L)	Cobre (mg/L)	STD (mg/L)
2127	31/10/2023	P1-AGAPANTOS	6.8	1304	2419.6	0.0	46.0	65.5	3.7	7.0	-	1.4	00	-	0.0	0.0	-
2128	31/10/2023	P1-S. EUROCEFAMEA	7.2	1224	1732.9	6.3	54.3	65.5	3.5	1.4	-	0.4	00	-	0.0	0.0	-
2129	31/10/2023	AL-COLRESIN	6.7	2140	344.8	1.0	43.9	74.2	15.7	24.9	-	1.5	00	-	0.1	0.0	-
2130	31/10/2023	AL-ARCLAD	6.8	339.0	7790.0	6300	113.8	121.4	31.5	00	-	0.1	9.3	-	0.5	0.0	-
2131	31/10/2023	ALI-TAHAMI	6.2	131.3	365.4	41.7	19.8	66.5	4.7	00	-	10.0	00	-	0.0	0.0	-
2132	31/10/2023	AL-IRM UNZAR	6.7	1225	16.0	0.0	51.2	56.9	5.2	00	-	0.6	00	-	0.0	0.0	-
2133	31/10/2023	P3-CARRO	7.5	3875.0	2419.6	8.6	143.1	131.1	879.0	644.3	-	7.1	00	-	0.2	0.0	-
2134	31/10/2023	P4-VIRGINIA	8.3	1684.0	2419.6	1.0	176.1	42.4	359.0	307.1	-	0.1	00	-	0.0	0.0	-
2139	31/10/2023	P1-NO VAVENTA	7.1	208.5	69.1	0.0	93.0	86.7	12.1	00	-	0.1	00	-	0.1	0.0	-
2140	31/10/2023	AL2-AVEOR	6.1	648.0	2419.6	0.0	53.3	158.1	122.0	18.1	-	19.1	05	-	0.2	0.0	-
2141	31/10/2023	P2-R. CHOCOLATES	5.9	1009	179.3	0.0	26.2	32.8	10.5	40	-	0.1	1.3	-	0.1	0.0	-
2142	31/10/2023	P4-R. CHOCOLATES	6.6	147.8	0.0	0.0	80.4	93.0	5.7	00	-	0.5	00	-	0.1	0.0	-
2143	31/10/2023	P6-R. CHOCOLATES	6.7	145.9	0.0	0.0	77.3	77.1	3.2	00	-	0.1	05	-	0.1	0.0	-
2144/69	31/06/2023	P1-AMINAL	7	323.5	18.9	0	116.98	107.94	42.71	27	-	1.75	0.01	-	0	0.0	-
2145/69	31/06/2023	P1-TINTATEX	6.4	163.1	1	0	84.6	95.9	8.11	0	-	1.33	0.02	-	0	0.0	-
		Variación máximo	8.3	3875.0	7790.0	6300	176.1	158.1	879.0	644.3	-	19.1	9.3	-	0.5	0.0	-
		Promedio	6.8	557.1	1344.4	45.9	79.0	100.4	67.3	-	2.9	0.8	-	0.1	0.0	-	-
		Variación mínimo	5.9	100.9	0.0	0.0	19.8	32.8	3.2	0.0	-	0.1	0.0	-	0.0	0.0	-
		Valores límites	6.5	1699	0	0	289	289	289	359	5	19	9.3	15	0.2	0.2	120
			8.0														

En la **tabla 5** se presentan los indicadores para monitoreos realizados en el mes de julio del 2024, para este monitoreo el 92,3% y el 46,1% de las muestras superan el límite permisible para coliformes totales y escherichia coli respectivamente y los valores de pH mejoraron significativamente, donde solo dos muestras están por debajo del límite permisible.

Tabla 5. Indicadores de calidad de agua subterránea. VSN julio 2024

Código interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestreo	Parámetros ICS-As Julio 2024														
			pH (Unidades de pH)	Conductividad (µs/cm)	Coliformes totales (microg/100cm3)	E. Coli (microng/100cm3)	Alcalinidad total (mg/L CaCO3)	Dureza total (mg/L CaCO3)	Cloruros (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	COT (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Hierro (mg/L)	Color (UC)	Manganeso (mg/L)	Cobre (mg/L)	STD (mg/L)
1.051	16/07/2024	P3-NOVAVENTA	7,0	214,1	209,0	1,0	100,7	89,4	0,0	0,0	-	0,1	0,1	-	0,0	0,0	-
1.063	16/07/2024	AL-COLRESN	6,3	209,6	0,0	0,0	46,7	67,0	-	-	-	1,0	0,1	-	0,1	0,0	-
1.052	16/07/2024	AL3-AVICOR	6,4	496,0	2439,6	5,2	44,5	155,3	46,7	46,7	-	26,7	0,0	-	0,0	0,0	-
1.053	16/07/2024	P3-N-CHOCOLATES	7,3	161,3	2,0	0,0	94,0	56,0	0,0	0,0	-	0,2	0,1	-	0,0	0,0	-
1.054	16/07/2024	P5-N-CHOCOLATES	6,0	163,0	1504,1	9,0	94,0	74,7	0,0	0,0	-	0,5	0,0	-	0,1	0,0	-
1.055	16/07/2024	P6-N-CHOCOLATES	6,7	136,5	1760,0	0,0	82,7	69,0	0,0	0,0	-	0,2	1,7	-	0,3	0,0	-
1.056	16/07/2024	AL3-AVINAL	7,0	356,5	2,0	0,0	112,4	116,9	0,0	0,0	-	1,9	0,0	-	0,0	0,0	-
1.057	16/07/2024	P3-TINTATEX	6,5	177,2	435,2	1,0	80,6	76,7	0,0	0,0	-	1,2	0,0	-	0,0	0,0	-
1.062	16/07/2024	P3-A-GAPANTOS	6,6	146,0	12,6	0,0	59,4	50,1	0,0	0,0	-	0,5	0,0	-	0,0	0,0	-
1.064	16/07/2024	AL-ARCLAD	6,6	294,5	142100,0	25900,0	99,7	63,9	10,3	10,3	-	0,1	3,1	-	0,2	0,0	-
1.065	16/07/2024	AL3-TAHAMI	6,1	132,0	613,1	29,9	17,0	46,7	0,0	0,0	-	10,0	0,0	-	0,0	0,0	-
1.066	16/07/2024	AL-INMUNIZAR	6,5	125,3	71,2	0,0	29,7	34,9	2,4	2,4	-	3,9	0,0	-	0,0	0,0	-
1.088	16/07/2024	P3-CAPIRO	8,1	1763,0	471,0	0,0	153,2	26,0	241,7	241,7	-	0,1	0,1	-	0,0	0,0	-
		Valor máximo	8,1	1763,0	142100,0	25900,0	153,2	155,3	241,7	241,7	-	26,7	3,1	-	0,3	0,0	-
		Promedio	6,7	320,9	10686,4	3853,3	74,5	71,2	25,0	25,0	-	3,5	0,4	-	0,1	0,0	-
		Valor mínimo	6,1	125,3	0,0	0,0	17,0	26,0	0,0	0,0	-	0,1	0,0	-	0,0	0,0	-
		Valores límites	9,0	1000	0	0	200	300	200	200	5	10	0,3	15	0,2	0,2	120

Durante el monitoreo de septiembre del 2024 (*tabla 6*) los coliformes totales disminuyeron en su totalidad en las muestras tomadas en los pozos 1 y 6 de La Nacional de Chocolates y en el pozo 1 de Avinal, sin embargo el 76,9% de las muestras siguen incumpliendo con lo establecido en la resolución, los valores de pH disminuyeron nuevamente con 46,1% de las muestras por debajo del límite permisible.

Tabla 6. Indicadores de calidad de agua subterránea. VSN septiembre 2024

Código interno laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestra	Parámetros KQ-4s Septiembre 2024														
			pH (Unidades de pH)	Conductividad (µS/cm)	Coliformes totales (microg/100cm)	E. coli (microg/100cm)	Alcalinidad total (mg/L CaCO3)	Dureza total (mg/L CaCO3)	Cloruros (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	COT (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Hierro (mg/L)	Color (UPC)	Manganeso (mg/L)	Cobalto (mg/L)	STD (mg/L)
1.476	24/08/2024	P1-NOVAVENTA	6,9	252,0	3,0	0,0	100,1	88,9	12,0	-1,7	-	0,1	0,0	-	0,0	0,0	-
1.477	24/08/2024	AL1-AVEGIR	6,8	520,5	4839,2	0,0	47,9	139,9	30,0	52,3	-	16,6	0,0	-	0,0	0,0	-
1.478	24/08/2024	P5-N-CHOCOLATES	6,8	188,1	0,0	0,0	80,9	73,9	5,3	-1,7	-	0,5	0,0	-	0,1	0,0	-
1.479	24/08/2024	P6-N-CHOCOLATES	7,2	182,6	39,3	0,0	82,0	61,9	3,1	-1,7	-	0,2	0,0	-	0,0	0,0	-
1.480	24/08/2024	P1-N-CHOCOLATES	7,2	197,7	0,0	0,0	74,6	69,4	3,6	-1,7	-	0,2	0,2	-	0,1	0,0	-
1.481	24/08/2024	P1-AVIMAL	6,8	543,5	0,0	0,0	74,6	140,4	110,5	4,9	-	0,1	0,0	-	0,0	0,0	-
1.491	24/08/2024	P1-AGAPANTOS	6,0	120,9	133,6	0,0	35,2	51,0	4,3	5,9	-	1,8	0,0	-	0,0	0,0	-
1.492	24/08/2024	AL1-5-EUROKERAMICA	6,0	121,0	45,6,4	0,0	50,1	50,0	5,3	1,8	-	0,1	14,8	-	0,4	0,0	-
1.493	24/08/2024	AL-COLRESIN	6,2	215,1	214,3	3,1	47,9	69,9	17,7	23,2	-	0,7	0,0	-	0,1	0,0	-
1.494	24/08/2024	AL-ARCIAD	6,2	263,3	13960,0	750,0	78,8	53,0	24,2	13,3	-	0,3	7,2	-	0,3	0,0	-
1.495	24/08/2024	AL1-TAHAMI	6,1	143,1	188,3	0,0	22,4	75,9	4,3	-1,7	-	10,0	0,0	-	0,0	0,0	-
1.496	24/08/2024	AL-INMUNIZAR	6,5	119,7	15,8	0,0	50,6	50,0	4,6	0,5	-	0,8	0,1	-	0,0	0,0	-
1.497	24/08/2024	P3-CAPIRO	6,4	3082,0	24,9	1,0	132,1	114,9	1039,9	625,3	-	0,1	0,0	-	0,1	0,0	-
		Valor mínimo	7,2	3082,0	13960,0	750,0	132,1	140,4	1039,9	625,3	-	16,6	14,8	-	0,4	0,0	-
		Promedio	6,5	485,3	1466,2	53,0	67,5	79,9	97,0	55,3	-	24	1,7	-	0,1	0,0	-
		Valor máximo	6,0	119,7	0,0	0,0	22,4	50,0	3,1	-1,7	-	0,1	0,0	-	0,0	0,0	-
		Valores límites	6,5	1999	0	0	289	289	289	289	5	19	6,39	15	0,30	0,30	120
			9,0														

En el tercer monitoreo realizado en el año 2024 (**tabla 7**) en general se observa el mismo comportamiento de los indicadores, el pH está por debajo de lo establecido en 46,1% de las muestras, este mismo porcentaje de muestras incumplen en cuanto al parámetro eschericha coli, los coliformes totales incumple en el 92,3% de muestras, todos estos valores comparados con la Resolución 2115 de 2007 para agua destinada a consumo humano.

Tabla 7. Indicadores de calidad de agua subterránea. VSN noviembre 2024

Código Interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestra	Parámetros ICG-AE Noviembre 2024														
			pH (Unidades de pH)	Conductividad (µS/cm)	Coliformes totales (microg/100cm)	E.Coli (microg/100cm)	Alcalinidad total (mg/L CaCO3)	Dureza total (mg/L CaCO3)	Cloruros (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	COT (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Hierro (mg/L)	Color (UPC)	Manganeso (mg/L)	Cobre (mg/L)	STD (mg/L)
1.877	12/11/2024	P5-AGAPANTOS	6,2	118,2	19,8	2,0	37,3	38,6	4,3	6,1	-	1,4	0,0	-	0,0	0,1	-
1.878	12/11/2024	AL1-S. EUROGERMANICA	6,3	162,1	84,0	0,0	44,8	50,5	5,0	8,3	-	0,0	11,2	-	0,6	0,0	-
1.879	12/11/2024	AL-COJRESIN	6,2	225,0	110,0	0,0	44,8	64,9	14,3	32,3	-	2,3	0,0	-	0,1	0,0	-
1.880	12/11/2024	AL-ARCLAD	6,4	167,0	4836,2	4836,2	55,5	48,4	11,0	7,6	-	0,3	1,9	-	0,1	0,0	-
1.881	12/11/2024	AL1-TAHAMI	5,5	135,9	1297,6	12,4	21,3	44,3	5,1	0,0	-	9,8	0,0	-	0,0	0,0	-
1.882	12/11/2024	AL-IMMUNZAR	6,4	125,0	0,0	0,0	56,5	48,4	37	0,0	-	0,7	0,1	-	0,0	0,0	-
1.887	12/11/2024	AL2-AVCOR	6,7	39,65	3672,6	522,6	43,7	254,5	27,5	49,3	-	26,7	0,0	-	0,0	0,0	-
1.888	12/11/2024	P5-N.CHOCOLATES	6,7	122,8	37,0	0,0	78,9	68,0	5,9	0,0	-	0,7	0,0	-	0,1	0,0	-
1.889	12/11/2024	P6-N.CHOCOLATES	6,9	103,6	4130,0	0,0	72,5	58,7	31	0,0	-	0,2	0,3	-	0,2	0,0	-
1.890	12/11/2024	P1-N.CHOCOLATES	7,0	115,0	480,0	0,0	77,9	51,5	3,2	0,0	-	0,2	0,3	-	0,0	0,0	-
1.891	12/11/2024	P1-AVINAL	6,8	330,0	2,0	0,0	73,1	123,5	9,60	5,1	-	0,1	0,0	-	0,0	0,0	-
1.892	12/11/2024	P1-TINTATEX	6,8	128,8	26,8	4,1	77,9	721	8,4	0,0	-	1,2	0,1	-	0,0	0,0	-
1.893	12/11/2024	P3-CAPARO	8,0	1429,0	3026,5	484,1	153,6	26,9	284,6	251,2	-	0,0	1,4	-	0,2	0,0	-
		Valores máximos	8,0	1429,0	4836,2	4836,2	153,6	254,5	284,6	251,2	-	26,7	11,2	-	0,6	0,1	-
		Protección	6,6	273,7	1387,2	853,1	69,4	69,5	36,3	27,7	-	3,4	1,2	-	0,1	0,0	-
		Valor mínimo	5,5	103,6	0,0	0,0	21,3	29,9	3,1	0,0	-	0,0	0,0	-	0,0	0,0	-
		Valores límites	6,50	1889	0	0	280	289	289	289	5	18	6,99	15	0,2	0,2	120
			9,00														

6.3.2 Mapas de concentración

Para identificar los puntos con mayor concentración de los parámetros más críticos analizados anteriormente se realizaron mapas de concentración para el monitoreo más reciente (noviembre 2024) presentados a continuación.

En la **figura 4** muestra la distribución espacial de las concentraciones de cloruros en mg/l en los acuíferos de los VSN, las concentraciones se agrupan en cuatro, muestras donde no se encontraron concentraciones se representan en color blanco, donde se presentaron concentraciones entre 0 – 50 mg/l en amarillo, entre 50 y 100 mg/l en naranjado y entre 100 y 290 mg/l en rojo, el tamaño de los círculos es proporcional a las concentraciones. La concentración más alta de cloruros fue de 284,6 mg/l, muestra proveniente del pozo 3 de Flores el Capiro ubicado en el municipio de La Ceja y es la única que sobrepasó el límite establecido en la Resolución 2115 de 2007 para uso de consumo humano, el cual es de 250 mg/l.

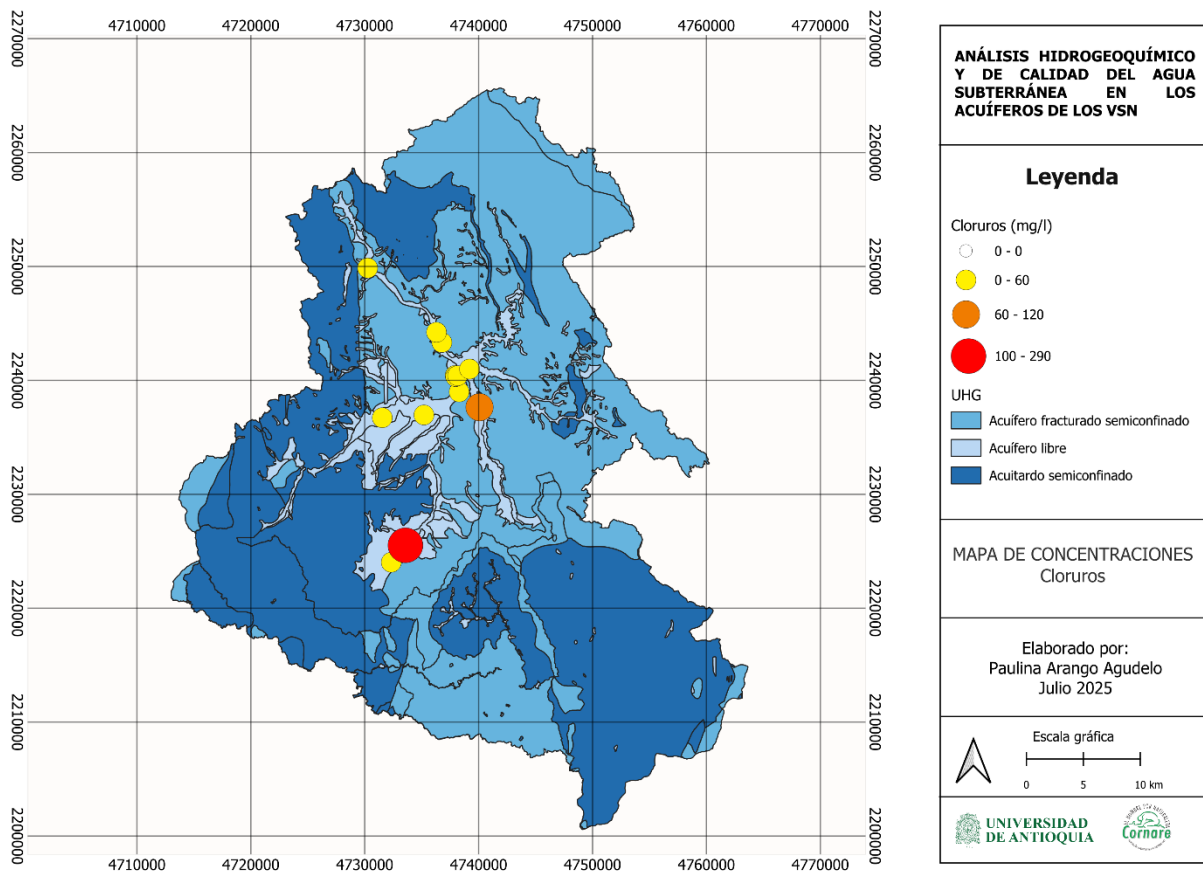


Ilustración 4. Mapa de concentración de cloruros

En la **figura 5** muestra la distribución espacial de las concentraciones de sulfatos en mg/l en los acuíferos de los VSN en donde nuevamente el único valor que sobrepasa el valor establecido en la Resolución 2115 de 2007 para uso de consumo humano el cual es de 250 mg/l y el de concentración más altas corresponden a la muestra proveniente del pozo 3 de Flores el Capiro, con un valor de 251,2 mg/l, las demás muestras se encuentran entre 0 y 50 mg/l.

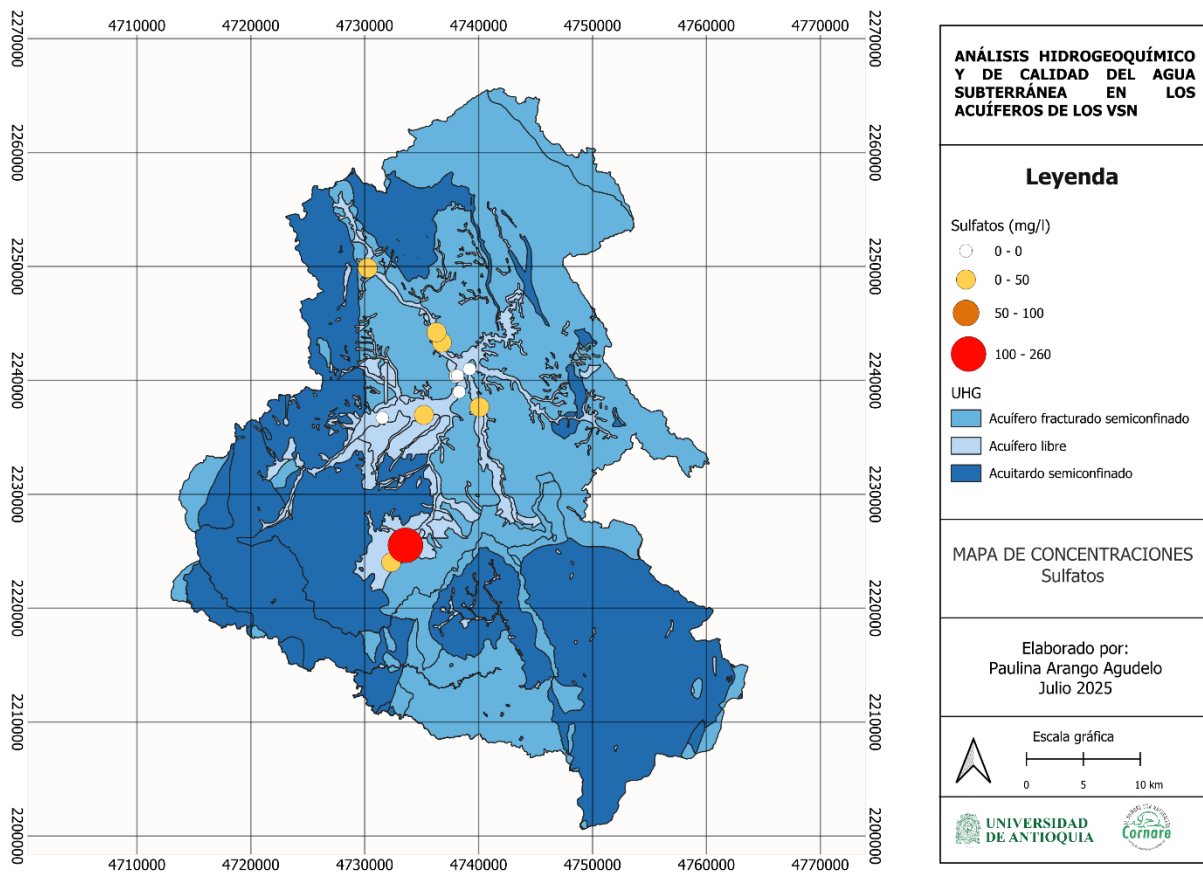


Ilustración 5. Mapa de concentración de sulfatos

En la **figura 6** muestra la distribución espacial de los valores de conductividad eléctrica en los acuíferos de los VSN, el valor más alto se presentó nuevamente en la muestra proveniente del pozo 3 de Flores El Capito, esta conductividad fue de 1429 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y fue también el único valor que sobrepasa el valor establecido en la Resolución 2115 de 2007 para uso de consumo humano el cual es de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

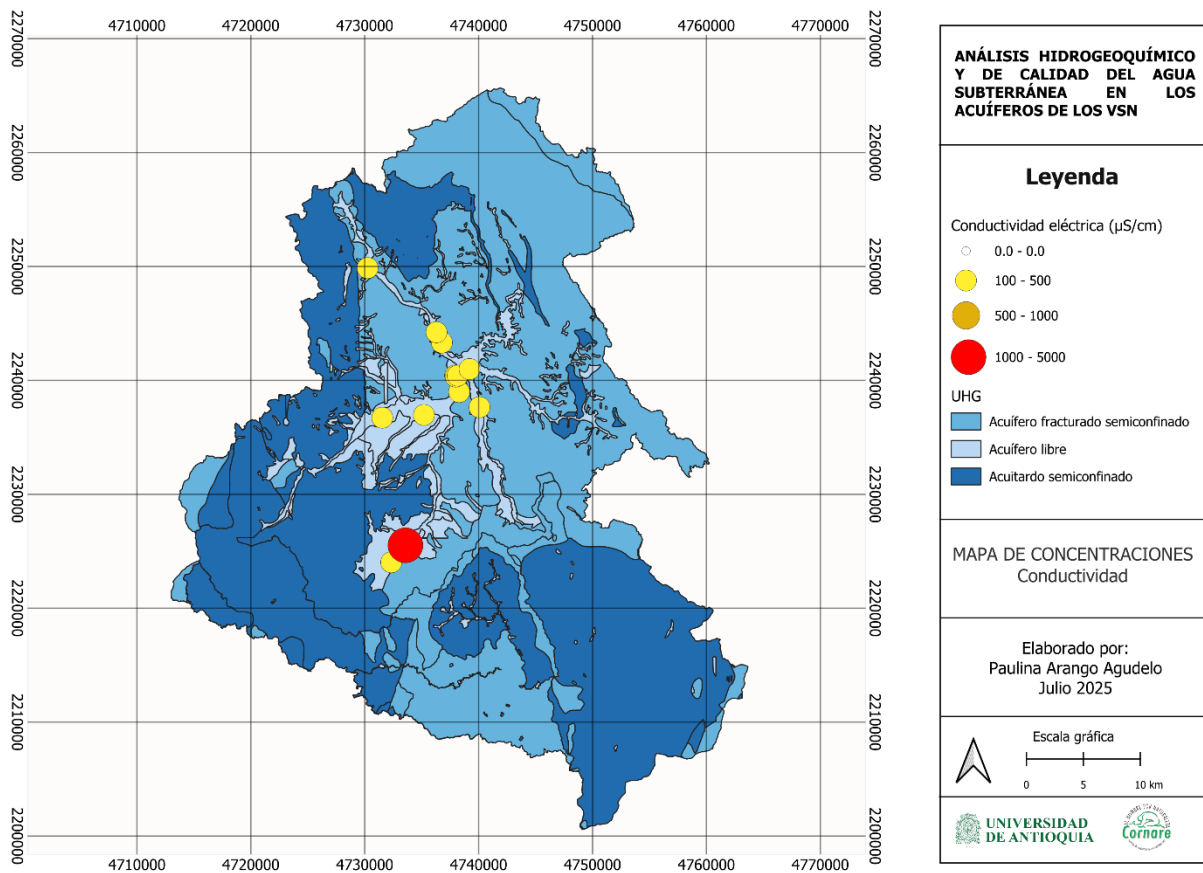


Ilustración 6. Mapa de conductividad eléctrica

En la **figura 7** muestra la distribución espacial de los valores coliformes totales en los acuíferos de los VSN. La única muestra que no presentó coliformes totales fue la proveniente del pozo de Inmunizar y se presenta en un círculo color blanco. El resto de las muestras se categorizaron de la siguiente forma: Color verde para valores entre 0 y 100 microorg/100cm³, color amarillo para valores entre 100 y 500 microorg/100cm³ y color rojo para valores entre 1000 y 5000 microorg/100cm.

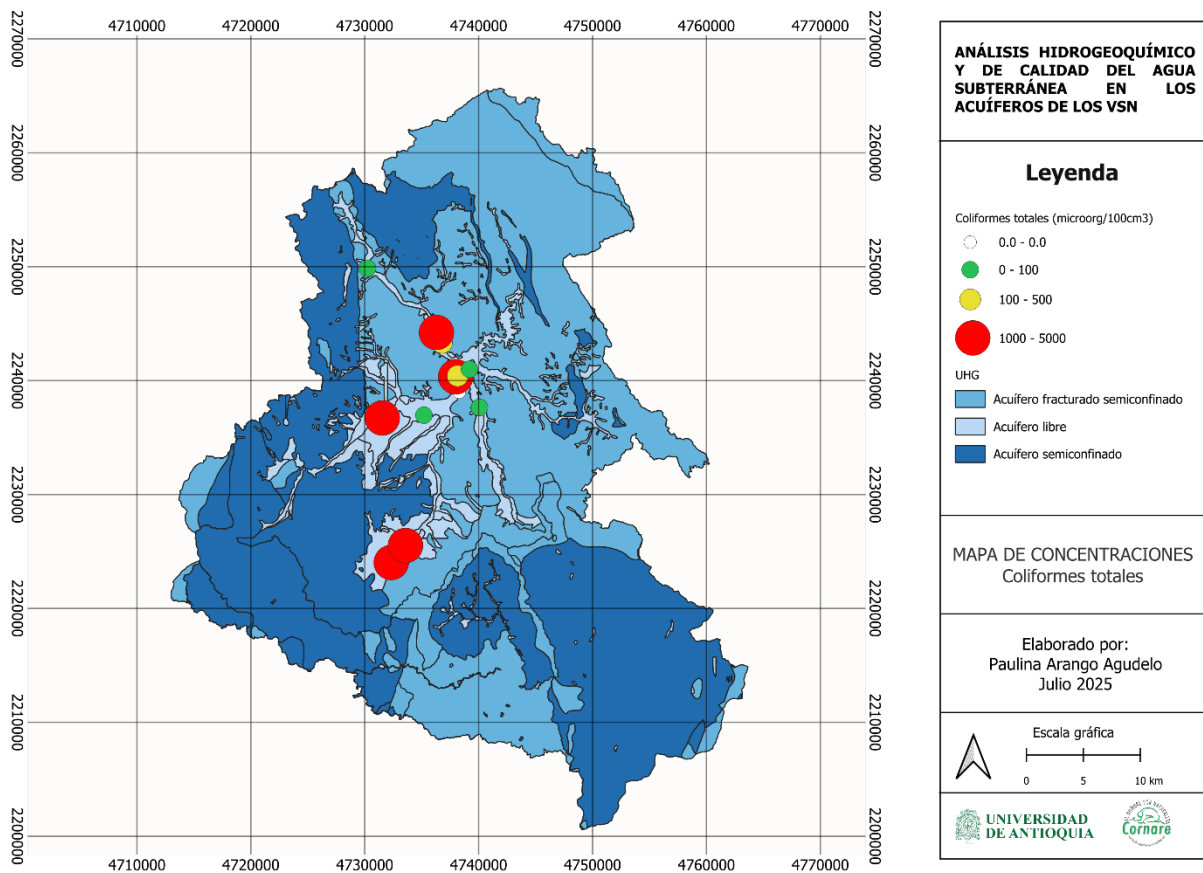


Ilustración 7. Mapa de concentraciones de coliformes totales

6.3.3 Índice de calidad de agua subterránea – ICG-As

Para identificar la calidad del agua subterránea se aplicó el ICG-As (Vélez, 2017) a las cinco campañas de monitoreo seleccionadas anteriormente y establecer la calidad para consumo humano, uso agrícola e industrial dónde se califica la calidad del agua como excelente, buena, aceptable, regular o mala y se le asigna un color a cada calificación según el rango en el que se encuentre el resultado tras aplicar el índice, los colores para cada rango se establecen como se observa en la **tabla 8**

Tabla 8. Calificación de la calidad del agua subterránea según el ICG-As

Calificación	Valor	Descripción
Excelente	95 -100	La calidad del agua subterránea es apta para el uso evaluado y cumple con la normatividad establecida.
Buena	79 - 95	La calidad del agua subterránea puede ser apta para el uso evaluado, sin embargo debe ser pasada por un proceso u operación sencilla de tratamiento para llegar a la calidad óptima.
Aceptable	64 – 79	La calidad del agua subterránea tiene potencial para el uso evaluado, sin embargo debe ser sometida a un tren de tratamiento convencional para llegar a la calidad óptima exigida por la normatividad. El recurso está bajo un posible estado de deterioro.
Regular	44- 64	La calidad del agua subterránea no es adecuada para el uso evaluado, por lo que debe ser sometida a un tren de tratamiento más elaborado que la lleve a su calidad óptima exigida por la normatividad. El recurso está bajo condiciones deterioro.
Mala	0 - 44	La calidad del agua subterránea no es apta para el uso evaluado. Para su uso debe evaluarse a profundidad el diseño de un tren de tratamiento que contrarreste en su totalidad las condiciones actuales en las que se encuentra y pueda llegar al cumplimiento de las exigencias normativas. El recurso está siendo expuesto a contaminación.

Fuente: (Vélez, 2017)

Tras aplicar el índice se obtuvieron los siguientes resultados:

En la **tabla 9** se presentan los resultados del ICG-As para consumo humano del monitoreo del año 2022, donde todas las muestras de agua indicaron ser malas para consumo humano, esto es de esperarse, pues el parámetro con más restricción es coliformes totales y para este año todas las muestras sobre pasaron el valor permisible en la Resolución 2115 de 2007

Tabla 9. ICG-As para consumo humano - año 2022

Código interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestreo	Al	F	Evaluación	N	A2	ICG-As	Resultado
1260	2/08/2022	AL-COLRESIN	20	20	193499	1934991	100	40	Mala
1261	2/08/2022	AL1-A.CARNICOS	10	10	28099	280990	100	42	Mala
1262	2/08/2022	AL-C.SOMER	20	20	2585398	25853980	100	40	Mala
1263	2/08/2022	AL-INMUNIZAR	20	20	1999	19991	100	40	Mala
1264	2/08/2022	P1-AGAPANTOS	20	20	2419599	24195991	100	40	Mala
1265	2/08/2022	AL1-TAHAMI	40	40	309598	3095984	100	34	Mala
1267	2/08/2022	P6-CAPIRO	40	40	77601	776007	100	34	Mala
1267	2/08/2022	P4-VIRGINIA	40	40	77601	776007	100	34	Mala
1268	2/08/2022	P5-VIRGINIA	10	10	8499	84990	100	42	Mala
1269	2/08/2022	AL1-CORLANC	40	40	2764398	27643982	100	34	Mala
1270	2/08/2022	P1-TRIGAL	30	30	2435603	24356025	100	37	Mala
1271	2/08/2022	P3-CAPIRO	50	50	1413599	14135988	100	29	Mala
1272	2/08/2022	AL2-AVICOR	40	40	2624199	26241989	100	34	Mala
1273	2/08/2022	P5-N.CHOCOLATES	20	20	247198	2471980	100	40	Mala
1274	2/08/2022	P6-N.CHOCOLATES	20	20	199998	1999980	100	40	Mala
1276	2/08/2022	AL1-MARQUILLAS	20	20	974998	9749980	100	40	Mala
1277	2/08/2022	P1-NOVAVENTA	10	10	1119899	11198990	100	42	Mala
1279	2/08/2022	P1-AVINAL	10	10	156499	1564990	100	42	Mala

En la **tabla 10** se muestran los resultados del ICG-As para uso agrícola del año 2022, donde todas las muestras muestran una calidad excelente para dicho uso, con excepción de la muestra tomada del aljibe de Marquillas S.A., que resultó ser regular, posiblemente debido a concentraciones de magnesio que exceden el valor permisible según el Decreto 1594 de 1984 para uso agrícola.

Tabla 10. ICG-As para uso agrícola - año 2022

ICG - As Uso agrícola - 2022									
Código interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestreo	A1	F	Evaluación	N	A2	ICG-As	Resultado
1260	2/08/2022	AL-COLRESIN	0	0	0	0	0	100	Excelente
1261	2/08/2022	AL1-A.CARNICOS	0	0	0	0	0	100	Excelente
1262	2/08/2022	AL-C.SOMER	0	0	0	0	0	100	Excelente
1263	2/08/2022	AL-INMUNIZAR	0	0	0	0	0	100	Excelente
1264	2/08/2022	P1-AGAPANTOS	0	0	0	0	0	100	Excelente
1265	2/08/2022	AL1-TAHAMI	0	0	0	0	0	100	Excelente
1267	2/08/2022	P6-CAPIRO	0	0	0	0	0	100	Excelente
1267	2/08/2022	P4-VIRGINIA	0	0	0	0	0	100	Excelente
1268	2/08/2022	P5-VIRGINIA	0	0	0	0	0	100	Excelente
1269	2/08/2022	AL1-CORLANC	0	0	0	0	0	100	Excelente
1270	2/08/2022	P1-TRIGAL	0	0	0	0	0	100	Excelente
1271	2/08/2022	P3-CAPIRO	0	0	0	0	0	100	Excelente
1272	2/08/2022	AL2-AVICOR	0	0	0	0	0	100	Excelente
1273	2/08/2022	P5-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1274	2/08/2022	P6-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1276	2/08/2022	AL1-MARQUILLAS	20	20	0	2	67	58	Regular
1277	2/08/2022	P1-NOVAVENTA	0	0	0	0	0	100	Excelente
1279	2/08/2022	P1-AVINAL	0	0	0	0	0	100	Excelente

En la **tabla 11** se presentan los resultados del ICG-As para uso industrial del año 2022, donde dos de las muestras muestran una calidad aceptable, otras dos muestran una calidad regular y tres muestran que el agua no es apta para dicho uso; estos últimos corresponden al pozo 6 de Flores el Capiro, el pozo 4 de Flores la Virginia y el pozo 1 de Flores el Trigal, ubicados en el municipio de La Ceja. El resto de las muestras muestran una calidad excelente para uso industrial.

Tabla 11. ICG-As para uso industrial - año 2022

ICG - As Uso Industrial - 2022									
Código interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestreo	A1	F	Evaluación	N	A2	ICG-As	Resultado
1260	2/08/2022	AL-COLRESIN	0	0	0	0	0	100	Excelente
1261	2/08/2022	AL1-A.CARNICOS	0	0	0	0	0	100	Excelente
1262	2/08/2022	AL-C.SOMER	0	0	0	0	0	100	Excelente
1263	2/08/2022	AL-INMUNIZAR	0	0	0	0	0	100	Excelente
1264	2/08/2022	P1-AGAPANTOS	0	0	0	0	0	100	Excelente
1265	2/08/2022	AL1-TAHAMI	0	0	0	0	0	100	Excelente
1267	2/08/2022	P6-CAPIRO	17	17	1	16	94	44	Mala
1267	2/08/2022	P4-VIRGINIA	17	17	1	16	94	44	Mala
1268	2/08/2022	P5-VIRGINIA	0	0	0	0	0	100	Excelente
1269	2/08/2022	AL1-CORLANC	17	17	0	3	74	55	Regular
1270	2/08/2022	P1-TRIGAL	17	17	5	76	99	41	Mala
1271	2/08/2022	P3-CAPIRO	17	17	1	11	92	45	Regular
1272	2/08/2022	AL2-AVICOR	17	17	0	1	54	66	Aceptable
1273	2/08/2022	P5-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1274	2/08/2022	P6-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1276	2/08/2022	AL1-MARQUILLAS	0	0	0	0	0	100	Excelente
1277	2/08/2022	P1-NOVAVENTA	0	0	0	0	0	100	Excelente
1279	2/08/2022	P1-AVINAL	17	17	0	1	54	66	Aceptable

En la **tabla 12** se presentan los resultados del ICG-As para consumo humano correspondientes al monitoreo del año 2023. De las 15 muestras analizadas, tres mostraron una clasificación diferente a “mala”: el pozo 4 de La Nacional de Chocolates obtuvo una calidad excelente, el pozo 6 de la misma empresa fue clasificado como regular, y el pozo 1 de Tintatex alcanzó una calidad buena. En estos tres casos, las

concentraciones de coliformes totales fueron mínimas o no detectadas. En contraste, las demás muestras presentaron concentraciones elevadas de coliformes, lo que llevó a su clasificación como de mala calidad para consumo humano, según los criterios de la Resolución 2115 de 2007.

Tabla 12. ICG-As para consumo humano - año 2023

ICG-As Consumo humano - 2023									
Código interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestreo	A1	F	Evaluación	N	A2	ICG-As	Resultado
2127	31/10/2023	P1-AGAPANTOS	10	10	2419599	24195990	100	42	Mala
2128	31/10/2023	P1-S.EUROCERAMICA	20	20	1739198	17391980	100	40	Mala
2129	31/10/2023	AL-COLRESIN	20	20	345798	3457980	100	40	Mala
2130	31/10/2023	AL-ARCLAD	30	30	8390028	83900279	100	37	Mala
2131	31/10/2023	AL1-TAHAMI	30	30	407098	4070980	100	37	Mala
2132	31/10/2023	AL-INMUNIZAR	10	10	15999	159990	100	42	Mala
2133	31/10/2023	P3-CAPIRO	50	50	2428205	24282050	100	29	Mala
2134	31/10/2023	P4-VIRGINIA	50	50	2420599	24205993	100	29	Mala
2139	31/10/2023	P1-NOVAVENTA	10	10	69099	690990	100	42	Mala
2140	31/10/2023	AL2-AVICOR	40	40	2419601	24196007	100	34	Mala
2141	31/10/2023	P2-N.CHOCOLATES	30	30	179303	1793025	100	37	Mala
2142	31/10/2023	P4-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
2143	31/10/2023	P6-N.CHOCOLATES	10	10	1	7	87	49	Regular
2144	31/10/2023	P1-AVINAL	10	10	18899	188990	100	42	Mala
2145	31/10/2023	P1-TINTATEX	20	20	999	9990	100	40	Buena

La aplicación del ICG-As para uso agrícola sobre las muestras de agua subterránea recolectadas en 2023 (**tabla 13**) arrojó que 13 de las 15 muestras fueron clasificadas como de calidad excelente. Sin embargo, se identificó una muestra con calidad mala correspondiente al aljibe de Arclad, y otra con calidad regular en el aljibe de Avícola de Oriente. Estos resultados indican que, en su mayoría, el agua es apta para riego agrícola, aunque algunas captaciones presentan concentraciones que exceden los límites permisibles, especialmente en parámetros como el magnesio o el pH establecidos en el Decreto 1594 de 1984.

Tabla 13. ICG-As para uso agrícola - año 2023

ICG-As Uso agrícola - 2023									
Código interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestreo	A1	F	Evaluación	N	A2	ICG-As	Resultado
2127	31/10/2023	P1-AGAPANTOS	0	0	0	0	0	100	Excelente
2128	31/10/2023	P1-S.EUROCERAMICA	0	0	0	0	0	100	Excelente
2129	31/10/2023	AL-COLRESIN	0	0	0	0	0	100	Excelente
2130	31/10/2023	AL-ARCLAD	40	40	2	44	98	35	Mala
2131	31/10/2023	AL1-TAHAMI	0	0	0	0	0	100	Excelente
2132	31/10/2023	AL-INMUNIZAR	0	0	0	0	0	100	Excelente
2133	31/10/2023	P3-CAPIRO	0	0	0	0	0	100	Excelente
2134	31/10/2023	P4-VIRGINIA	0	0	0	0	0	100	Excelente
2139	31/10/2023	P1-NOVAVENTA	0	0	0	0	0	100	Excelente
2140	31/10/2023	AL2-AVICOR	20	20	0	4	80	51	Regular
2141	31/10/2023	P2-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
2142	31/10/2023	P4-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
2143	31/10/2023	P6-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
2144	31/10/2023	P1-AVINAL	0	0	0	0	0	100	Excelente
2145	31/10/2023	P1-TINTATEX	0	0	0	0	0	100	Excelente

En la **tabla 14** se presentan los resultados del ICG-As para uso industrial del año 2023, los cuales evidencian una mayor variabilidad en la calidad del agua. El 60% de las muestras (9 muestras) fueron clasificadas como de calidad excelente, mientras que el 13,3% presentó calidad regular y el 26,6% (4 muestras) fueron consideradas de mala calidad para este uso. Esta variabilidad puede estar relacionada con la presencia de

parámetros como pH bajo o concentraciones elevadas de ciertos metales, que afectan la aptitud del agua para procesos industriales.

Tabla 14. ICG-As para uso industrial - año 2023

ICG-As Uso industrial - 2023									
Código interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestreo	A1	F	Evaluación	N	A2	ICG-As	Resultado
2127	31/10/2023	P1-AGAPANTOS	0	0	0	0	0	100	Excelente
2128	31/10/2023	P1-S.EUROCERAMICA	0	0	0	0	0	100	Excelente
2129	31/10/2023	AL-COLRESIN	0	0	0	0	0	100	Excelente
2130	31/10/2023	AL-ARCLAD	50	50	30	508	100	29	Mala
2131	31/10/2023	AL1-TAHAMI	0	0	0	0	0	100	Excelente
2132	31/10/2023	AL-INMUNIZAR	0	0	0	0	0	100	Excelente
2133	31/10/2023	P3-CAPIRO	33	33	3	49	98	37	Mala
2134	31/10/2023	P4-VIRGINIA	17	17	1	11	92	45	Regular
2139	31/10/2023	P1-NOVAVENTA	0	0	0	0	0	100	Excelente
2140	31/10/2023	AL2-AVICOR	33	33	1	18	95	39	Mala
2141	31/10/2023	P2-N.CHOCOLATES	17	17	3	57	98	42	Mala
2142	31/10/2023	P4-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
2143	31/10/2023	P6-N.CHOCOLATES	17	17	1	11	92	45	Regular
2144	31/10/2023	P1-AVINAL	0	0	0	0	0	100	Excelente
2145	31/10/2023	P1-TINTATEX	0	0	0	0	0	100	Excelente

En la **tabla 15** se presentan los resultados del ICG-As para consumo humano correspondientes al monitoreo de julio de 2024. Todas las muestras fueron clasificadas como de mala calidad para este uso, de acuerdo con los límites establecidos por la

Resolución 2115 de 2007. Esta clasificación se debe principalmente a la presencia de coliformes totales y escherichia coli, indicadores que reflejan contaminación microbiológica significativa en los puntos evaluados.

Tabla 15. ICG-As para consumo humano - julio 2024

ICG-As Consumo humano - julio 2024									
Código interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestreo	A1	F	Evaluación	N	A2	ICG-As	Resultado
1051	16/07/2024	P1-NOVAVENTA	20	20	210798	2107980	100	40	Mala
1052	16/07/2024	AL2-AVICOR	40	40	2424800	24247999	100	34	Mala
1053	16/07/2024	P1-N.CHOCOLATES	10	10	1999	19990	100	42	Mala
1054	16/07/2024	P5-N.CHOCOLATES	20	20	1513098	15130980	100	40	Mala
1055	16/07/2024	P6-N.CHOCOLATES	20	20	1767999	17679990	100	40	Mala
1056	16/07/2024	AL3-AVINAL	10	10	1999	19990	100	42	Mala
1057	16/07/2024	P1-TINTATEX	20	20	436198	4361980	100	40	Mala
1062	16/07/2024	P1-AGAPANTOS	10	10	12599	125990	100	42	Mala
1064	16/07/2024	AL-ARCLAD	30	30	168000007	1680000073	100	37	Mala
1065	16/07/2024	AL1-TAHAMI	30	30	642998	6429981	100	37	Mala
1066	16/07/2024	AL-INMUNIZAR	10	10	71199	711990	100	42	Mala
1068	16/07/2024	P3-CAPIRO	20	20	471800	4717998	100	40	Mala

Los resultados del ICG-As para uso agrícola en el mismo periodo (**tabla 16**) muestra que la muestra correspondiente al pozo 6 de La Nacional de Chocolates es de calidad regular y la muestra del aljibe de Arclad es de calidad mala, el resto de las muestras obtuvieron una calidad excelente para este uso.

Tabla 16. ICG-As para uso agrícola - julio 2024

ICG-As Uso agrícola - julio 2024									
Código interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestreo	Al	F	Evaluación	N	A2	ICG-As	Resultado
1051	16/07/2024	P1-NOVAVENTA	0	0	0	0	0	100	Excelente
1052	16/07/2024	AL2-AVICOR	0	0	0	0	0	100	Excelente
1053	16/07/2024	P1-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1054	16/07/2024	P5-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1055	16/07/2024	P6-N.CHOCOLATES	20	20	1	10	91	45	Regular
1056	16/07/2024	AL3-AVINAL	0	0	0	0	0	100	Excelente
1057	16/07/2024	P1-TINTATEX	0	0	0	0	0	100	Excelente
1062	16/07/2024	P1-AGAPANTOS	0	0	0	0	0	100	Excelente
1063	16/07/2024	AL-COLRESIN	0	0	0	0	0	100	Excelente
1064	16/07/2024	AL-ARCLAD	60	60	52	1047	100	24	Mala
1065	16/07/2024	AL1-TAHAMI	0	0	0	0	0	100	Excelente
1066	16/07/2024	AL-INMUNIZAR	0	0	0	0	0	100	Excelente
1068	16/07/2024	P3-CAPIRO	0	0	0	0	0	100	Excelente

Los resultados del ICG-As para uso industrial en el mismo periodo (**tabla 17**) evidencian que el 69,2% de las muestras (9 puntos) fueron clasificadas como de calidad excelente, un 15,4% (2 muestras) como regular y otro 15,4% (2 muestras) como de mala calidad. Los factores que influyeron en esta clasificación fueron los valores en parámetros como pH, magnesio y hierro que incumplen con lo establecido en el Decreto 1594 de 1984 para uso industrial.

Tabla 17. ICG-As para uso industrial - julio 2024

ICG-As Uso industrial - julio 2024									
Código interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestreo	Al	F	Evaluación	N	A2	ICG-As	Resultado
1051	16/07/2024	P1-NOVAVENTA	0	0	0	0	0	100	Excelente
1052	16/07/2024	AL2-AVICOR	17	17	0	5	83	50	Regular
1053	16/07/2024	P1-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1054	16/07/2024	P5-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1055	16/07/2024	P6-N.CHOCOLATES	17	17	5	76	99	41	Mala
1056	16/07/2024	AL3-AVINAL	0	0	0	0	0	100	Excelente
1057	16/07/2024	P1-TINTATEX	0	0	0	0	0	100	Excelente
1062	16/07/2024	P1-AGAPANTOS	0	0	0	0	0	100	Excelente
1063	16/07/2024	AL-COLRESIN	0	0	0	0	0	100	Excelente
1064	16/07/2024	AL-ARCLAD	33	33	37	613	100	36	Mala
1065	16/07/2024	AL1-TAHAMI	0	0	0	0	0	100	Excelente
1066	16/07/2024	AL-INMUNIZAR	0	0	0	0	0	100	Excelente
1068	16/07/2024	P3-CAPIRO	17	17	1	13	93	45	Regular

En la **tabla 18** se presentan los resultados del ICG-As para consumo humano correspondientes al monitoreo realizado en septiembre de 2024. Del total de muestras evaluadas, 10 de las 13 fueron clasificadas como de calidad mala, lo cual representa un 76,9% de incumplimiento frente a los criterios de la Resolución 2115 de 2007. Solo tres muestras alcanzaron una calificación excelente (pozos 1 y 5 de La Nacional de Chocolates y pozo 1 de Avinal). Estas excepciones presentaron valores nulos de coliformes totales y escherichia coli, mientras que el resto mantuvo una contaminación microbiológica significativa

Tabla 18. ICG-As para consumo humano - septiembre 2024

ICG-As Consumo humano - septiembre -2024									
Código interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestreo	A1	F	Evaluación	N	A2	ICG-As	Resultado
1476	24/09/2024	P1-NOVAVENTA	10	10	2999	29990	100	42	Mala
1477	24/09/2024	AL2-AVICOR	20	20	4839200	48391997	100	40	Mala
1478	24/09/2024	P5-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1479	24/09/2024	P6-N.CHOCOLATES	10	10	39299	392990	100	42	Mala
1480	24/09/2024	P1-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1481	24/09/2024	P1-AVINAL	0	0	0	0	0	100	Excelente
1491	24/09/2024	P1-AGAPANTOS	20	20	133599	1335991	100	40	Mala
1492	24/09/2024	AL1-S EURO CERAMICA	30	30	456449	4564485	100	37	Mala
1493	24/09/2024	AL-COLRESIN	30	30	217398	2173980	100	37	Mala
1494	24/09/2024	AL-ARCLAD	40	40	14710021	147100210	100	34	Mala
1495,00	24/09/2024	AL1-TAHAMI	20	20	1986299	19862991	100	40	Mala
1496,00	24/09/2024	AL-INMUNIZAR	10	10	15799	157990	100	42	Mala
1497,00	24/09/2024	P3-CAPIRO	60	60	25905	259047	100	24	Mala

Los resultados del ICG-As para uso agrícola del mismo periodo (**tabla 19**) indican que la calidad del agua fue mayormente excelente para este uso. De las 15 muestras evaluadas, 2 fueron clasificadas como malas, estas muestras son las correspondientes los aljibes de Eurocerámica y Arclad, esta calificación se atribuye a las concentraciones de manganeso, que superan los límites permisibles del Decreto 1594 de 1984 para uso agrícola.

Tabla 19. ICG-As para uso agrícola - septiembre 2024

ICG-As Uso agrícola - septiembre 2024									
Código interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestreo	Al	F	Evahación	N	A2	ICG-As	Resultado
1476	24/09/2024	P1-NOVAVENTA	0	0	0	0	0	100	Excelente
1477	24/09/2024	AL2-AVICOR	0	0	0	0	0	100	Excelente
1478	24/09/2024	P5-N-CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1479	24/09/2024	P6-N-CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1480	24/09/2024	P1-N-CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1481	24/09/2024	P1-AVINAL	0	0	0	0	0	100	Excelente
1491	24/09/2024	P1-A-GAPANTOS	0	0	0	0	0	100	Excelente
1492	24/09/2024	AL1-S-EURO-CERAMICA	20	20	1	22	96	42	Mala
1493	24/09/2024	AL-COLRESIN	0	0	0	0	0	100	Excelente
1494	24/09/2024	AL-ARCLAD	40	40	2	47	98	35	Mala
1495	24/09/2024	AL1-TAHAMI	0	0	0	0	0	100	Excelente
1496	24/09/2024	AL-INMUNIZAR	0	0	0	0	0	100	Excelente
1497	24/09/2024	P3-CAPIRO	0	0	0	0	0	100	Excelente

En la **tabla 20** se presentan los resultados del ICG-As para uso industrial durante el monitoreo de septiembre de 2024. De las 10 muestras, 8 fueron clasificadas como de calidad excelente (80%), 2 muestras fueron calificadas como regulares y 3 muestras como malas tras evaluar el ICG-As con la normativa establecida en el Decreto 1594 de 1984 para uso industrial.

Tabla 20. ICG-As para uso industrial - septiembre 2024

ICG-As Uso industrial- septiembre -2024									
Código interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestreo	A1	F	Evaluación	N	A2	ICG-As	Resultado
1476	24/09/2024	P1-NOVAVENTA	0	0	0	0	0	100	Excelente
1477	24/09/2024	AL2-AVICOR	17	17	0	3	73	55	Regular
1478	24/09/2024	P5-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1479	24/09/2024	P6-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1480	24/09/2024	P1-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1481	24/09/2024	P1-AVINAL	17	17	0	3	74	55	Regular
1491	24/09/2024	P1-AGAPANTOS	0	0	0	0	0	100	Excelente
1492	24/09/2024	AL1-S.EUROCERAMICA	17	17	48	807	100	41	Mala
1493	24/09/2024	AL-COLRESIN	0	0	0	0	0	100	Excelente
1494	24/09/2024	AL-ARCLAD	33	33	50	839	100	36	Mala
1495	24/09/2024	AL1-TAHAMI	0	0	0	0	0	100	Excelente
1496	24/09/2024	AL-INMUNIZAR	0	0	0	0	0	100	Excelente
1497	24/09/2024	P3-CAPIRO	17	17	1	13	93	45	Mala

En la **tabla 21** se presentan los resultados del ICG-As para consumo humano en el monitoreo de noviembre de 2024 donde 11 de las muestras analizadas fueron clasificadas como de calidad mala, evidenciando nuevamente una situación crítica en relación con la calidad del agua para este uso, las otras dos tuvieron como resultado calidad regular y calidad buena. Estos resultados se relacionan principalmente con la persistencia de contaminación microbiológica, especialmente la presencia de coliformes totales y escherichia coli, que superan ampliamente los valores establecidos en la Resolución 2115 de 2007.

Tabla 21. ICG-As para consumo humano - noviembre 2024

ICG-As Consumo humano - noviembre 2024									
Código interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestreo	A1	F	Evaluación	N	A2	ICG-As	Resultado
1877	12/11/2024	P1-AGAPANTOS	30	30	21598	215980	100	37	Mala
1878	12/11/2024	AL1-S.EUROCERAMICA	30	30	84035	840354	100	37	Mala
1879	12/11/2024	AL-COLRESIN	20	20	109999	1099990	100	40	Mala
1880	12/11/2024	AL-ARCLAD	40	40	9678403	96784033	100	34	Mala
1881	12/11/2024	AL1-TAHAMI	30	30	1309998	13099982	100	37	Mala
1882	12/11/2024	AL-INMUNIZAR	10	10	0	0	14	89	Buena
1887	12/11/2024	AL2-AVICOR	30	30	4495200	44951997	100	37	Mala
1888	12/11/2024	P5-N.CHOCOLATES	10	10	36999	369990	100	42	Mala
1889	12/11/2024	P6-N.CHOCOLATES	20	20	4129999	41299991	100	40	Mala
1890	12/11/2024	P1-N.CHOCOLATES	10	10	489999	4899990	100	42	Mala
1891	12/11/2024	P1-AVINAL	10	10	1999	19990	100	42	Regular
1892	12/11/2024	P1-TINTATEX	20	20	30698	306980	100	40	Mala
1893	12/11/2024	P3-CAPIRO	60	60	3508602	35086023	100	24	Mala

En la **tabla 22** se presentan los resultados del ICG-As para uso agrícola que indican que, de las 13 muestras evaluadas, dos muestras no fueron calificadas como calidad mala para este uso, las mismas que en el muestreo anterior (septiembre 2024), estas corresponden a los aljibes de Eurocerámica y Arclad, las demás muestras fueron calificadas como excelente para este uso.

Tabla 22. ICG-As para uso agrícola - noviembre 2024

ICG-As Uso agrícola - noviembre 2024									
Código interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestreo	A1	F	Evaluación	N	A2	ICG-As	Resultado
1877	12/11/2024	P1-AGAPANTOS	0	0	0	0	0	100	Excelente
1878	12/11/2024	AL1-SEUROCERAMICA	20	20	2	40	98	41	Mala
1879	12/11/2024	AL-COLRESIN	0	0	0	0	0	100	Excelente
1880	12/11/2024	AL-ARCLAD	20	20	4	77	99	41	Mala
1881	12/11/2024	AL1-TAHAMI	0	0	0	0	0	100	Excelente
1882	12/11/2024	AL-INMUNIZAR	0	0	0	0	0	100	Excelente
1887	12/11/2024	AL2-AVICOR	0	0	0	0	0	100	Excelente
1888	12/11/2024	P5-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1889	12/11/2024	P6-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1890	12/11/2024	P1-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1891	12/11/2024	P1-AVINAL	0	0	0	0	0	100	Excelente
1892	12/11/2024	P1-TINTATEX	0	0	0	0	0	100	Excelente
1893	12/11/2024	P3-CAPIRO	0	0	0	0	0	100	Excelente

En cuanto al uso industrial (**tabla 23**), los resultados del ICG-As indican las siguientes calificaciones: siete fueron clasificadas como excelentes, tres como malas, una como regular y una como aceptable. La mayoría de los puntos monitoreados se mantuvieron dentro de los valores aceptables para procesos industriales.

Tabla 23. ICG-As para uso industrial - noviembre 2024

ICG-As Uso industrial - noviembre 2024									
Código interno Laboratorio	Fecha de toma de muestra (AAAA-MM-DD)	Código Muestreo	Al	F	Evaluación	N	A2	ICG-As	Resultado
1877	12/11/2024	P1-AGAPANTOS	0	0	0	0	0	100	Excelente
1878	12/11/2024	AL1-S EUROCEAMICA	17	17	36	606	100	41	Mala
1879	12/11/2024	AL-COLRESIN	0	0	0	0	0	100	Excelente
1880	12/11/2024	AL-ARCLAD	17	17	5	88	99	41	Mala
1881	12/11/2024	AL1-TAHAMI	0	0	0	0	0	100	Excelente
1882	12/11/2024	AL-INMUNIZAR	0	0	0	0	0	100	Excelente
1887	12/11/2024	AL2-AVICOR	17	17	0	5	83	50	Regular
1888	12/11/2024	P5-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1889	12/11/2024	P6-N.CHOCOLATES	17	17	0	1	53	67	Aceptable
1890	12/11/2024	P1-N.CHOCOLATES	0	0	0	0	0	100	Excelente
1891	12/11/2024	P1-AVINAL	17	17	0	0	17	83	Buena
1892	12/11/2024	P1-TINTATEX	0	0	0	0	0	100	Excelente
1893	12/11/2024	P3-CAPIRO	33	33	4	69	99	37	Mala

6.3.4 Calidad de agua subterránea a través de los años según su uso

Para analizar la calidad del agua subterránea en los VSN temporalmente según su uso, se realizaron las siguientes tablas donde muestra la calidad del agua para cada uso durante las cinco campañas de monitoreo. Para este análisis únicamente se tomarán en cuenta los monitoreos con información disponible durante las cinco campañas.

En la **tabla 24** se presentan los resultados del ICG-As para consumo humano durante las cinco campañas de monitoreo. La mayoría de las muestras fueron clasificadas como de calidad mala para consumo humano, con algunas excepciones, el pozo 1 de Inmunizar obtuvo una calificación de buena para el último monitoreo del año 2024, el pozo 5 de La

Nacional de Chocolate obtuvo una calificación de excelente durante el segundo monitoreo del mismo año y el pozo 6 de la misma empresa obtuvo una calificación regular durante el año 2023.

Los usuarios cuyo uso principal es para consumo humano son Novaventa y La Clínica Somer y como uso secundario, Agropecuaria Agapantos, Flores El Capiro y Flores La Virginia (señalados en color naranja en la **tabla 24**). En estos casos es importante señalar que el agua debería ser sometida a procesos de tratamiento previamente para que su consumo sea seguro.

Tabla 24. Comparación multianual del ICG-As para consumo humano (2022–2024)

Código de muestreo	Consumo humano				
	Años				
	2022	2023	2024-Julio	2024-Septiembre	2024-Noviembre
AL-COLRESIN	Mala	Mala	-	Mala	Mala
AL1-A.CARNICOS	Mala	-	-	-	-
AL-C.SOMER	Mala	-	-	-	-
AL-INMUNIZAR	Mala	Mala	Mala	Mala	Buena
P1-AGAPANTOS	Mala	Mala	Mala	Mala	Mala
AL1-TAHAMI	Mala	Mala	Mala	Mala	Mala
P6-CAPIRO	Mala	-	-	-	-
P4-VIRGINIA	Mala	Mala	-	-	-
P5-VIRGINIA	Mala	-	-	-	-
AL1-CORLANC	Mala	-	-	-	-
P1-TRIGAL	Mala	-	-	-	-
P3-CAPIRO	Mala	Mala	Mala	Mala	Mala
AL2-AVICOR	Mala	Mala	Mala	Mala	Mala
P5-N.CHOCOLATES	Mala	-	Mala	Excelente	Mala
P6-N.CHOCOLATES	Mala	Regular	Mala	Mala	Mala
AL1-MARQUILLAS	Mala	-	-	-	-
P1-NOVAVENTA	Mala	Mala	Mala	Mala	-
P1-AVINAL	Mala	Mala	-	Excelente	Regular
P1-TINTATEX	-	Buena	Mala	-	Mala
P4-N.CHOCOLATES	-	Excelente	-	-	-
P2-N.CHOCOLATES	-	Mala	-	-	-
AL-ARCLAD	-	Mala	Mala	Mala	Mala
P1-S.EUROCERAMICA	-	Mala	-	Mala	Mala
P1-N.CHOCOLATES	-	-	Mala	Excelente	Mala
AL3-AVINAL	-	-	Mala	-	-

En la **tabla 25** se presentan los resultados del ICG-As para uso agrícola durante las cinco campañas de monitoreo. La calidad para este uso, en general fue excelente, las muestra correspondiente al aljibe de Avicor tuvo una calificación de regular únicamente en el monitoreo del año 2023 y las correspondientes al pozo 6 de La Nacional de Chocolates también obtuvo una calificación de regular en el primer monitoreo del 2024, en cuanto a las muestras correspondientes al aljibe de Arclad fueron calificadas con calidad mala para

este uso y las correspondientes al aljibe de Eurocerámica fueron deficientes para los últimos dos monitoreos realizados. Estas deficiencias son influenciadas por las concentraciones de manganeso que superan el límite establecido en Decreto 1594 de 1984 para uso agrícola.

Los usuarios con captaciones de agua subterránea que su uso principal es para uso agrícola son, Flores El Capiro, Flores La Virginia y Flores El Trigo (señalados en color naranja en la **tabla 25**).

Tabla 25. Comparación multianual del ICG-As para uso agrícola (2022–2024)

Código de muestreo	Uso agrícola				
	Años				
	2022	2023	2024-Julio	2024-Septiembre	2024-Noviembre
AL-COLRESIN	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
AL1-A.CARNICOS	Excelente	-	-	-	-
AL-C.SOMER	Excelente	-	-	-	-
AL-INMUNIZAR	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
P1-AGAPANTOS	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
AL1-TAHAMI	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
P6-CAPIRO	Excelente	-	-	-	-
P4-VIRGINIA	Excelente	Excelente	-	-	-
P5-VIRGINIA	Excelente	-	-	-	-
AL1-CORLANC	Excelente	-	-	-	-
P1-TRIGAL	Excelente	-	-	-	-
P3-CAPIRO	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
AL2-AVICOR	Excelente	Regular	Excelente	Excelente	Excelente
P5-N.CHOCOLATES	Excelente	-	Excelente	Excelente	Excelente
P6-N.CHOCOLATES	Excelente	Excelente	Regular	Excelente	Excelente
AL1-MARQUILLAS	Regular	-	-	-	-
P1-NOVAVENTA	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	-
P1-AVINAL	Excelente	Excelente	-	Excelente	Excelente
P1-TINTATEX	-	Excelente	Excelente	-	Excelente
P4-N.CHOCOLATES	-	Excelente	-	-	-
P2-N.CHOCOLATES	-	Excelente	-	-	-
AL-ARCLAD	-	Mala	Mala	Mala	Mala
P1-S.EUROCERAMICA	-	Excelente	-	Mala	Mala
P1-N.CHOCOLATES	-	-	Excelente	Excelente	Excelente
AL3-AVINAL	-	-	Excelente	-	-

En la **tabla 26** se presentan los resultados del ICG-As para uso industrial durante las cinco campañas de monitoreo. La calidad para este uso fue la que obtuvo mejores resultados. En los puntos de interés, la calificación con mayor resultado fue excelente, esta calidad se mantuvo todo el tiempo para el aljibe de Colresin, el aljibe de Inmunizar, el pozo 1 de Agapantos y el aljibe 1 de Tahami. Sin embargo, para el pozo 3 de Flores El Capiro la calidad comenzó siendo regular en el año 2022, se deterioró en el 2023 dando como resultado calidad mala, mejoró nuevamente en el primer muestreo del año 2024 aunque volvió a decaer terminando el 2024, siendo mala para los dos últimos muestreos. En el aljibe 2 de Avicor la calidad comenzó siendo aceptable, se deterioró para el año 2023 con una calidad de mala y mejoró ligeramente para los tres muestreos del año 2024 obteniendo una calidad regular para este uso. Por último, el pozo x de La Nacional de Chocolates obtuvo una calificación de excelente para el año 2022 y se fue deteriorando progresivamente durante el 2023 y julio del 2024, para septiembre del 2024 mejoró significativamente con una calificación de excelente, pero volvió a decaer durante el último monitoreo del año obteniendo una calificación de aceptable.

Los usuarios que utilizan el agua subterránea como uso principal son La Nacional de Chocolates, Marquillas SA, Corlanc, Colresin, Arclad, Eurocerámica, Tahami, Inmunizar, Alimentos Cárnicos y Tintatex (señalados en color naranja en la **Tabla 26**).

Tabla 26. Comparación multianual del ICG-As para uso industrial (2022–2024)

Código de muestreo	Uso industrial				
	Años				
	2022	2023	2024-Julio	2024-Septiembre	2024-Noviembre
AL-COLRESIN	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
AL1-A.CARNICOS	Excelente	-	-	-	-
AL-C.SOMER	Excelente	-	-	-	-
AL-INMUNIZAR	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
P1-AGAPANTOS	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
AL1-TAHAMI	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
P6-CAPIRO	Mala	-	-	-	-
P4-VIRGINIA	Mala	Regular	-	-	-
P5-VIRGINIA	Excelente	-	-	-	-
AL1-CORLANC	Regular	-	-	-	-
P1-TRIGAL	Mala	-	-	-	-
P3-CAPIRO	Regular	Mala	Regular	Mala	Mala
AL2-AVICOR	Aceptable	Mala	Regular	Regular	Regular
P5-N.CHOCOLATES	Excelente	-	Excelente	Excelente	Excelente
P6-N.CHOCOLATES	Excelente	Regular	Mala	Excelente	Aceptable
AL1-MARQUILLAS	Excelente	-	-	-	-
P1-NOVAVENTA	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	-
P1-AVINAL	Aceptable	Aceptable	-	Regular	Buena
P1-TINTATEX	-	Excelente	Excelente	-	Excelente
P4-N.CHOCOLATES	-	Excelente	-	-	-
P2-N.CHOCOLATES	-	Mala	-	-	-
AL-ARCLAD	-	Mala	Mala	Mala	Mala
P1-S.EUROCERAMICA	-	Excelente	-	Mala	Mala
P1-N.CHOCOLATES	-	-	Excelente	Excelente	Excelente
AL3-AVINAL	-	-	Excelente	-	-

6.4 Hidrogeoquímica

6.4.1 Balance iónico

Para evaluar la calidad analítica de los datos se aplicó la fórmula de balance iónico para cada campaña de monitoreo. El análisis hidrogeoquímico se aplicó solamente a las muestras cuyo error de balance iónico sea menor o igual al 15%. A continuación, se presentan los resultados.

En la **tabla 27** muestran los resultados de balance iónico para el monitoreo del año 2022 donde se obtuvo que 11 muestras presentan un error de balance por encima del 15% y 9 muestras entraron en el rango admisible para realizar el análisis hidrogeoquímico.

Tabla 27. Balance iónico - 2022

Código	Fecha	Mediciones en laboratorio		Mediciones en laboratorio								Balance
		T°C	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	
PI-S-EURO CERAMICA	2/08/2022	20,4	7,6	42,55871594	1,3	1,8	0	5,3	6,7	2,3	12,4	22%
AL-ARCLAD	2/08/2022	20	6,5	143,9220528	99,7	15,1	0	17,4	3,5	15,9	54,7	-6%
AL-COLRESIN	2/08/2022	24,7	5,9	53,06648512	16,3	6,6	18,2	19,2	6,1	6,3	24,6	19%
AL1-A.CARNICOS	2/08/2022	20,7	6,6	63,41894772	0,6	0,4	1,5	5,1	3,1	4,1	21	21%
AL-C.SOMER	2/08/2022	19,7	6,6	45,12501979	5,2	4,6	3,6	9,5	4,4	3,7	16,8	22%
AL-INMUNIZAR	2/08/2022	22,1	6,2	58,55226201	2,8	0,2	1,3	6,1	1	4,7	16,7	17%
PI-AGAPANTOS	2/08/2022	20,5	6,1	55,50417343	1,6	0,6	6,8	3,1	6,8	3,2	24,2	23%
AL1-TAHAMI	2/08/2022	18	5,5	22,56940476	2,4	1	0	6,6	3,8	6,4	16,9	59%
P6-CAIRO	2/08/2022	18,2	8,3	217,8066054	300,7	0,8	384,4	87,2	5,2	1,4	12,4	-62%
P4-VIRGINIA	2/08/2022	18,2	8,3	217,8066054	300,7	0,8	384,4	1,2	5,2	1,4	12,4	-91%
P5-VIRGINIA	2/08/2022	17,9	8,3	150,0045119	31,8	0	40,7	59,5	1,4	1,2	14,3	-10%
AL1-CORLANC	2/08/2022	19,6	6,1	31,7166702	0,1	0,1	8,6	2,5	0,8	2,7	10,9	12%
PI-TRIGAL	2/08/2022	21	7,3	126,0602831	27,1	2,1	16,7	45,7	2,8	1,2	6,6	-13%
P9-CAIRO	2/08/2022	19,5	8,5	179,4875925	250,9	5,9	281,9	84,6	9,5	0,8	8,5	-57%
AL2-AVICOR	2/08/2022	19,4	6,3	75,62741795	20,2	22,5	41,3	16,1	34,5	6	59,6	23%
P5-N.CHOCOLATES	2/08/2022	19,4	6,5	108,5513784	3,3	0,6	0	9,4	2,4	7,7	29,4	15%
P6-N.CHOCOLATES	2/08/2022	19,3	7	55,46375162	0	0,5	0	5,3	0,3	3,3	14,5	15%
AL1-MARQUILLAS	2/08/2022	23	6,7	103,656683	9	52,8	0	8,3	2,3	3,8	38,6	-8%
PI-NOVAVENTA	2/08/2022	21,5	7,2	119,4022138	8,4	0	0	12,8	3,4	3,6	41	15%
PI-AVINAL	2/08/2022	19,5	7	145,6685444	36,9	5,6	0	27,4	1,1	2,7	63,6	13%

Tras aplicar el balance iónico a las muestras tomadas en la campaña de monitoreo del año 2023 (**tabla 28**) se obtuvieron resultados más favorables donde dos de las muestras sobrepasan el 15%, estas muestras son las provenientes del aljibe 1 de Tahami y el pozo 3 de Flores El Capiro, al resto de las muestras se le analizó la hidrogeoquímica.

Tabla 28. Blance iónico - 2023

Código	Fecha	Mediciones en campo		Mediciones en laboratorio								Balance
		T°C	pH	HCO ₃ -	Cl-	NO ₂ -	SO ₄ --	Na+	K+	Mg++	Ca++	
P1-AGAPANTOS	31/10/2023	21,8	6,8	56,1	3,7	0,1	7,0	2,5	4,5	1,8	18,2	4%
P1-S.EUROCERAMICA	31/10/2023	23,9	7,2	66,4	3,5	0,7	1,4	5,5	1,0	3,0	12,6	-4%
AL-COLRESN	31/10/2023	27,2	6,7	53,7	15,7	3,9	24,9	13,8	2,6	4,1	18,0	-1%
AL-ARCLAD	31/10/2023	21,2	6,8	139,0	31,5	32,6	0,0	16,9	2,3	5,9	32,1	-15%
AL1-TAHAMI	31/10/2023	19,7	6,2	24,4	4,7	1,2	0,0	4,8	2,1	3,0	10,9	31%
AL-INMUNIZAR	31/10/2023	24,1	6,7	62,2	5,2	0,3	0,0	5,7	1,4	2,9	12,0	-2%
P3-CAPIRO	31/10/2023	19,3	7,5	174,0	879,0	207,8	644,3	129,8	15,0	3,8	47,6	-68%
P4-VIRGENIA	31/10/2023	19,1	8,3	213,6	359,0	1,0	307,1	332,4	3,4	0,8	12,5	-14%
P1-NOVAVENTA	31/10/2023	22,6	7,1	113,3	12,1	1,2	0,0	15,6	2,0	2,2	28,4	2%
AL2-AVICOR	31/10/2023	20,4	6,1	65,3	122,0	26,9	18,1	21,5	62,2	5,0	54,8	2%
P2-N.CHOCOLATES	31/10/2023	21,9	5,9	35,4	10,5	1,3	4,0	8,8	1,2	1,9	6,8	-4%
P4-N.CHOCOLATES	31/10/2023	20,4	6,6	98,2	5,7	0,8	0,0	7,7	1,4	4,0	19,3	-4%
P6-N.CHOCOLATES	31/10/2023	20,4	6,7	94,5	3,2	2,5	0,0	5,6	2,5	3,8	19,0	-4%
P1-AVINAL	31/10/2023	19,3	7	142,6	42,7	8,1	2,7	39,6	4,5	1,6	46,8	7%
P1-TINTATEX	31/10/2023	20,5	6,4	103,1	8,1	1,2	0,0	6,4	1,1	4,4	19,9	-8%

Los resultados tras aplicar el balance iónico a la primera campaña de monitoreo del año 2024 realizada en julio se presentan en la **tabla 29**, donde cuatro de las trece muestras superaron el 15%, el resto de las muestras cumplió con el porcentaje requerido y se le aplicó el análisis hidrogeoquímico

Tabla 29. Balance iónico - julio 2024

Código	Fecha	Mediciones en campo		Mediciones en laboratorio								Balance
		T°C	pH	HCO ₃ -	Cl-	NO ₂ -	SO ₄ --	Na+	K+	Mg++	Ca++	
P1-NOVAVENTA	16/07/2024	22,3	7	122,5	0	18,8	0	10,5	2,8	3,8	28,3	-4%
AL2-AVICOR	16/07/2024	19,6	6,4	54,3	45,7	31,5	45,7	12,5	27,1	6,5	51,4	6%
P1-N.CHOCOLATES	16/07/2024	22,8	7,3	103,5	0	3,4	0	10,6	4	5,3	14,8	-1%
P5-N.CHOCOLATES	16/07/2024	20	6,8	103,6	0	2,1	0	5,9	1,5	6,7	17,6	-1%
P6-N.CHOCOLATES	16/07/2024	21,4	6,7	100,6	0	3,8	0	6,1	5,3	6,5	17,4	2%
AL3-AVINAL	16/07/2024	19,2	7	137,1	0	10	0	26,2	2,8	2,5	41,3	17%
P1-TINTATEX	16/07/2024	20,9	6,5	98,2	0	2	0	6,5	2,4	7,2	19,5	7%
P1-AGAPANTOS	16/07/2024	22,4	6,6	72,6	0	1,7	0	4,3	5,6	4,5	12,7	4%
AL-COLRESIN	16/07/2024	25,4	6,3	56,7	-	-	-	11,8	1,7	6,8	14,1	32%
AL-ARCLAD	16/07/2024	21,9	6,6	121,3	10,3	4,7	10,3	18,6	9,8	4,2	17,8	-6%
AL1-TAHAMI	16/07/2024	20,2	6,1	20,7	0	2,7	0	4	3	5,2	8,9	48%
AL-INMUNIZAR	16/07/2024	27,3	6,5	36	2,4	3,4	2,4	8,8	3,5	2,8	8,3	18%
P3-CAPIRO	16/07/2024	19,5	8,1	184,7	241,7	5,7	241,7	282	6,2	1	8	-8%

Al igual que en el monitoreo anterior, en la segunda campaña de monitoreo del año 2024 realizada en septiembre nuevamente cuatro muestras sobrepasaron el 15% tras realizar el balance iónico, sin embargo, las muestras no son provenientes de los mismos pozos, en la **tabla 30** se observan que muestras no cumplieron con el balance para dicho monitoreo

Tabla 30. Balance iónico - septiembre 2024

Código	Fecha	Mediciones en campo				Mediciones en laboratorio						Balance
		T°C	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	
P1-NOVAVENTA	24/09/2024	22,1	6,9	121,9	12	0,6	0	10	6,2	3,2115	30,4	1%
AL2-AVICOR	24/09/2024	19,5	6,8	58,5	30	12,1	52,3	16	37,5	5,1806	48,9	18%
P5-N.CHOCOLATES	24/09/2024	20,1	6,8	98,8	5,3	0,6	0	12,6	18,5	5,6764	18,2	15%
P6-N.CHOCOLATES	24/09/2024	24,7	7,2	99,9	3,1	2	0	11,3	9,5	4,4025	15,5	3%
P1-N.CHOCOLATES	24/09/2024	21,3	7,2	90,8	3,6	0,5	0	7	9	5,0343	17	6%
P1-AVINAL	24/09/2024	19,8	6,6	90,9	110,5	0,2	4,9	27,1	2,9	2,9524	46,7	-10%
P1-AGAPANTOS	24/09/2024	22,7	6	42,7	4,3	0,4	5,9	2,7	8,6	2,3117	10	4%
AL1-S.EUROCERAMICA	24/09/2024	23,1	6	61	5,3	1	1,8	6	4,8	3,0001	11	-1%
AL-COLRESIN	24/09/2024	27	6,2	58,6	17,7	7,8	23,2	12,9	8,9	5,9133	13,8	-4%
AL-ARCLAD	24/09/2024	22,1	6,2	96,4	24,2	18,3	13,3	14,2	6,9	4,9559	16,8	-18%
AL1-TAHAMI	24/09/2024	19,8	6,1	27,5	4,3	0,8	0	6,9	8,6	4,4082	7,4	36%
AL-INMUNIZAR	24/09/2024	27,6	6,5	61,6	4,6	0,4	0,5	5,1	5,8	3,751	10,1	1%
P3-CAPIRO	24/09/2024	22,1	6,4	161	1035,9	2,9	625,3	450,2	26,3	4,8327	45,4	-32%

Para la tercera campaña de monitoreo del año 2024 realizada en noviembre, los resultados al calcular el balance iónico fueron los más favorables, como se observa en la **tabla 31** solo una muestra no cumplió con el porcentaje requerido, esta muestra proviene del aljibe 1 de Tahami. Las demás muestras cumplieron con el porcentaje y se les aplicó análisis hidrogeoquímico

Tabla 31. Balance iónico - noviembre 2024

Código	Fecha	Mediciones en campo				Mediciones en laboratorio						Balance
		T°C	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	
P1-AGAPANTOS	12/11/2024	21,3	6,2	45,8	4,3	0,8	6,1	1	8,1	2,6	10,8	-1%
AL1-S.EUROCERAMICA	12/11/2024	25,9	6,1	54,9	5	3,2	8,3	5,6	3	3,4	12,4	-3%
AL-COLRESIN	12/11/2024	26,8	6,2	54,9	14,3	10,4	32,3	9,3	1,8	4,9	17,1	-13%
AL-ARCLAD	12/11/2024	20,7	6,4	67,7	11	5,2	7,6	7,4	5,3	3,2	13,7	-9%
AL1-TAHAMI	12/11/2024	20	5,5	26,2	5,1	0,2	0	4	3,4	4,7	9,8	33%
AL-INMUNIZAR	12/11/2024	24,2	6,4	68,9	3,7	0,3	0	4	3,2	4,1	12,8	0%
AL2-AVICOR	12/11/2024	19,2	6,7	53,1	27,5	19,8	49,3	10,6	28,6	4,6	51,8	15%
P5-N.CHOCOLATES	12/11/2024	19,8	6,7	96,3	5,9	0,8	0	7	6,7	5,6	18,3	2%
P6-N.CHOCOLATES	12/11/2024	20	6,9	88,4	3,1	0,6	0	2,9	0,8	4,9	16,1	-7%
P1-N.CHOCOLATES	12/11/2024	20,3	7	95,1	3,2	2	0	7,6	2,5	4,6	16,1	-4%
P1-AVINAL	12/11/2024	20,3	6,8	89	96	0,2	5,1	26,1	3,4	3,3	45,4	-6%
P1-TINTATEX	12/11/2024	20,8	6,8	95,1	8,4	0,3	0	5,2	1,4	5,5	19,1	-4%
P3-CAPIRO	12/11/2024	19,3	8	185,7	284,6	0,6	251,2	253,4	11,7	1,5	12,8	-15%

6.4.2 Facies hidrogeolquimicas

Esto no aporta a la interpretación química del agua de los acuíferos del Valle de San Nicolás, hay muchas suposiciones

Para obtener un análisis más preciso de los datos se identificaron los acuíferos captados por cada uno de los pozos o aljibes donde se tomaron las muestras de agua, los cuales se dividieron en los siguientes tres escenarios:

1. UHG-L: Acuífero libre
2. UHG- LS – B: Mezcla entre el acuífero libre y el semiconfinado en suelo residual del Batolito Antioqueño
3. UHG- LS – A: Mezcla entre el acuífero libre y el semiconfinado en suelo residual de Anfibolita de La Ceja

Estos puntos se ubicaron en el mapa geológico (**figura 8**) y posteriormente, para validar los resultados obtenidos, se trazaron los diagramas de Stiff sobre el mapa geológico y superpuesto en el mapa de direcciones de flujo (**figura 8**)

En la **figura 8** se encuentra la distribución espacial de las captaciones de agua subterránea en los VSN diferenciados por UHG captada superpuestos a las unidades geológicas. Se puede identificar que 19 captaciones se encuentran sobre los depósitos aluviales de saprolito de Batolito Antioqueño y las otras 6 captaciones se encuentran ubicadas sobre los depósitos aluviales de la anfibolita de La Ceja.

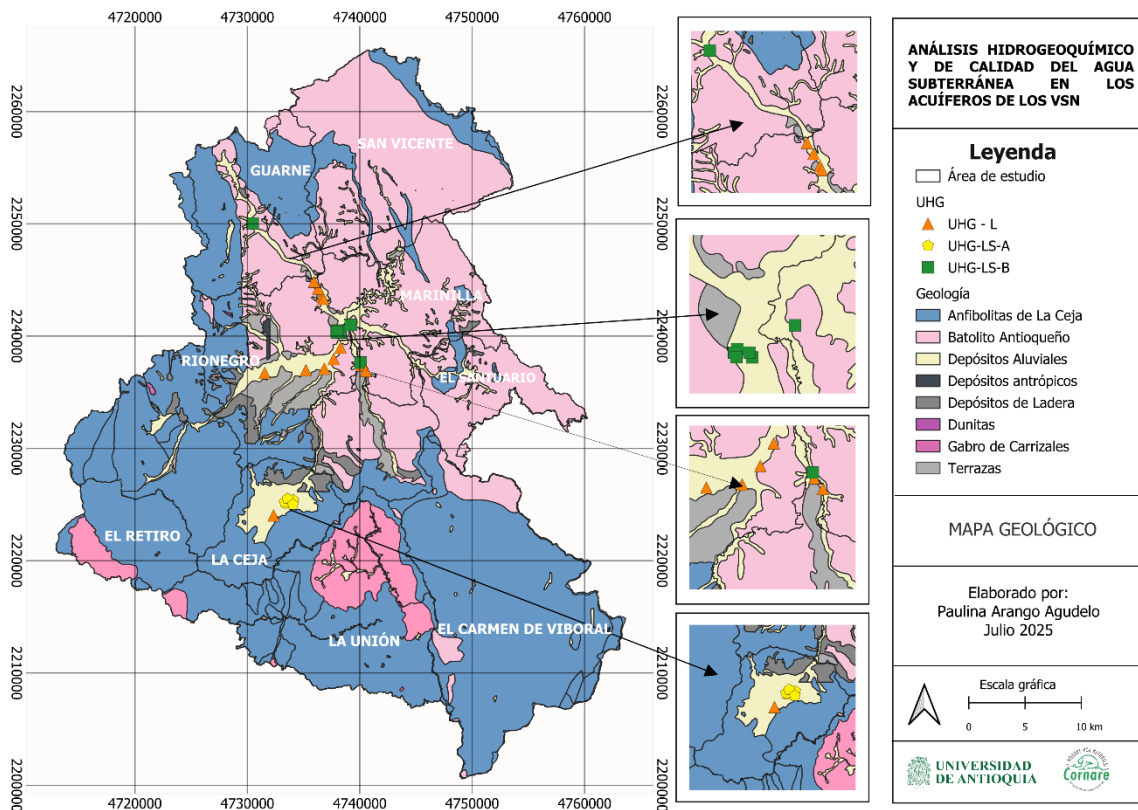


Ilustración 8. Mapa de concentraciones de coliformes totales

El análisis hidrogeoquímico para el monitoreo realizado en el año 2022 se identificaron tres facies principales, una de ellas es bicarbonatada cálcica (circulo café **figura 9**), esta facies predomina en los aljibes que se encuentran captando el acuífero libre y los pozos que captan una mezcla del acuífero libre y el semiconfinado que se encuentran ubicados sobre el basamento del Batolito Antioqueño. Entre ese estos aljibes se excluye el aljibe de Arclad (circulo azul **figura 9**) donde los resultados arrojaron una facies clorurada bicarbonatada cálcico magnésica, este resultado es anómalo debido a que los sólidos totales son muy bajos y la geología en la que se encuentra es basamento de Batolito Antioqueño, además está captando el acuífero libre y se espera que el agua en este acuífero no esté tan evolucionada. El pozo 1 de Avinal también sale de la generalidad, pues tiene una facies bicarbonatada a clorurada cálcico sódica, esto puede ser correspondiente a que el pozo está captando el acuífero semiconfinado. Esta última facies también se encontró en la muestra tomadas en el pozo 1 de Flores El Trigo, en el pozo 5 de Flores La Virginia se obtuvo una facies bicarbonatada a sulfatada clorurada sódica (circulo negro **figura 9**), estos últimos pozos están ubicados en el municipio de La Ceja que captan una mezcla del acuífero libre y el semiconfinado que se encuentran sobre el

basamento de la anfibolita de La Ceja y su facies puede estar asociada a la evolución del agua subterránea encontrada en el acuífero semiconfinado.

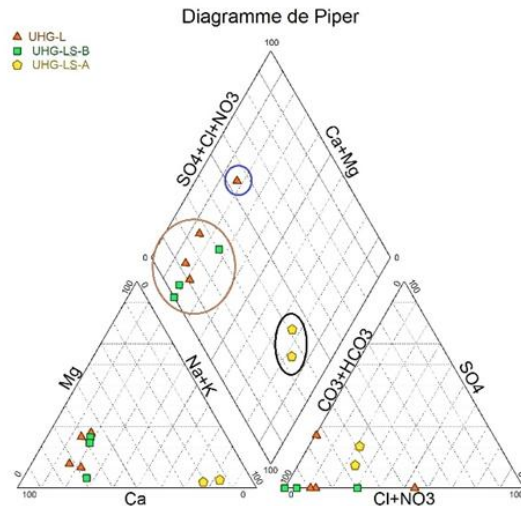


Ilustración 9. Diagrama de Piper – 2022

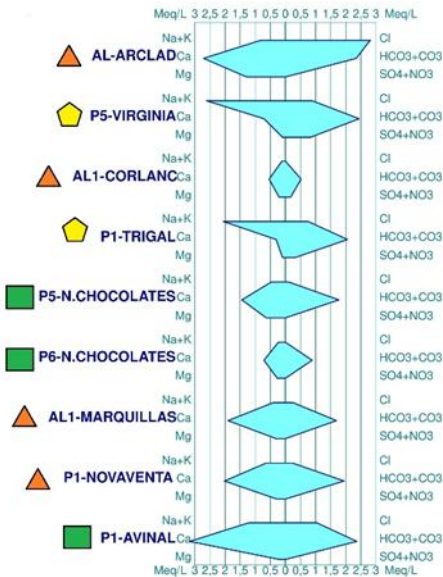


Ilustración 10. Diagrama de Stiff – 2022

Tabla 32. Facies hidrogeoquímicas - 2022

Fecha de muestreo	Código	STD (suma de iones mayoritarios) (mg/L)	Conductividad (μs/cm)	Facies	Edad	Evolución preliminar
2/8/2022	AL-ARCLAD	350	530	Clorurada bicarbonatada calcico magnésica	Media	Evolución media grado 2
2/8/2022	P5-VIRGINIA	299	417	Bicarbonatada a sulfatada clorurada sódica	Media	Evolucionada
2/8/2022	AL1-CORLANC	57	67	Bicarbonatada clorurada cálcico sódica	Joven	Evolución media grado 2
2/8/2022	P1-TRIGAL	228	275	Bicarbonatada clorurada cálcico sódica	Joven	Evolución media grado 2
2/8/2022	P5-N.CHOCOLATES	161	185	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada
2/8/2022	P6-N.CHOCOLATES	79	79	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada
2/8/2022	AL1-MARQUILLAS	218	193	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada
2/8/2022	P1-NOVAVENTA	188	215	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada
2/8/2022	P1-AVINAL	283	366	Bicarbonatada clorurada cálcico sódica	Media	Evolución media grado 2

En la **figura 11** se observa la distribución espacial de las facies hidrogeoquímicas obtenidas anteriormente en el diagrama de Stiff para el monitoreo del 2022, superpuestas sobre la geología de los VSN. En el mapa se puede identificar con mayor facilidad que en las muestras asociadas a UHG asociadas al Batolito Antioqueño (rosado) predominan las facies bicarbonatadas cálcicas consistentes con aguas no se puede afirmar porque no hay dataciones del agua poco evolucionadas con excepción de la muestra proveniente de Arclad (primer mapa en la esquinad derecha superior). Así mismo, las facies con predominancia cloruradas o sulfatadas se ubican en el municipio de La Ceja y son

consistentes con la interacción del agua con la geología de la región, anfibolita de La Ceja (azul oscuro)..

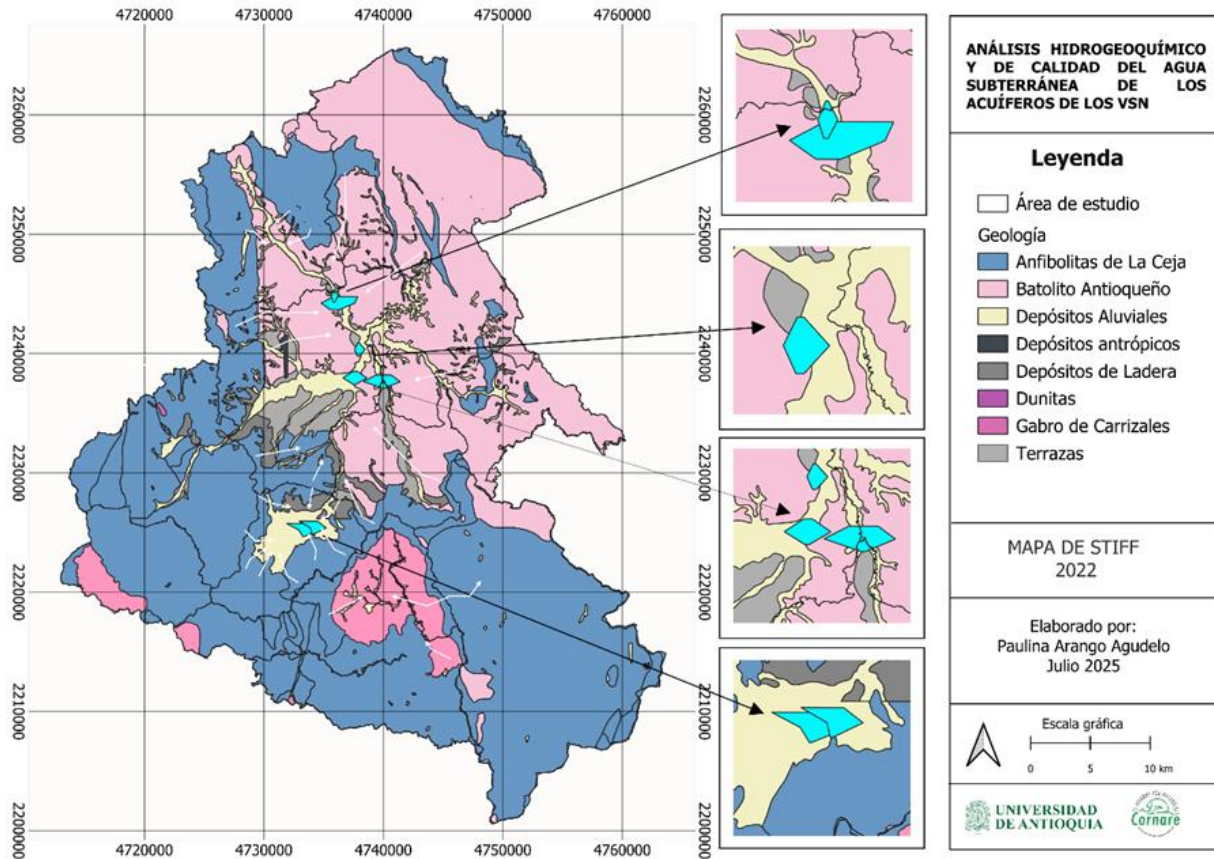


Ilustración 11. Mapa de facies hidrogeoquímicas por Stiff y unidades geológicas – 2022

Durante el análisis hidrogeoquímico realizado para el año 2023 se identificaron seis facies donde predomina la facies bicarbonatada cálcica en acuíferos libres, sin embargo para este año el aljibe de Arclad, al igual que en el 2022, resultó tener una facies diferente, esta vez bicarbonatada clorurada cálcico sódica, esta facies la encontramos también en el pozo 1 de Avinal que está captando el acuífero libre y el semiconfinado ubicados en el basamento del Batolito Antioqueño, así mismo el pozo 2 de La Nacional de Chocolates que capta estos mismos acuíferos es de facies bicarbonatada clorurada sódica. El aljibe de Colresin a pesar de que también está captando solo el acuífero libre en basamento de Batolito Antioqueño también resultó tener una facies diferente, esta fue bicarbonatada a sulfatada cálcica, este último es un comportamiento anómalo al igual que el resultado obtenido en el aljibe de Arclad por sus bajas concentraciones de sólidos totales, su

ubicación geográfica y la corta profundidad de los aljibes (6,8 m para el aljibe de Arclad y 7,4m para el aljibe de Colresin)

Finalmente, las captaciones ubicadas en el municipio de La Ceja se componen de facies diferentes debido a su geología. El pozo 4 de Flores La Virginia que capta agua del acuífero libre y el semiconfinado ubicados en el basamento de la anfíbolita de La Ceja, tiene una facies clorurada a sulfatada bicarbonatada sódica, solidos totales muy altos y una gran evolución debido a la composición geológica donde se encuentra no se puede afirmar esto porque no hay dataciones, puede deberse a contaminación antrópica. En el aljibe 2 de Avicor también se encontró una facies diferente, esta fue clorurada bicarbonatada cálcico sódica, este aljibe tiene una profundidad de 18,5 m, es decir, es un aljibe con gran profundidad donde puede estar captando aguas más evolucionada

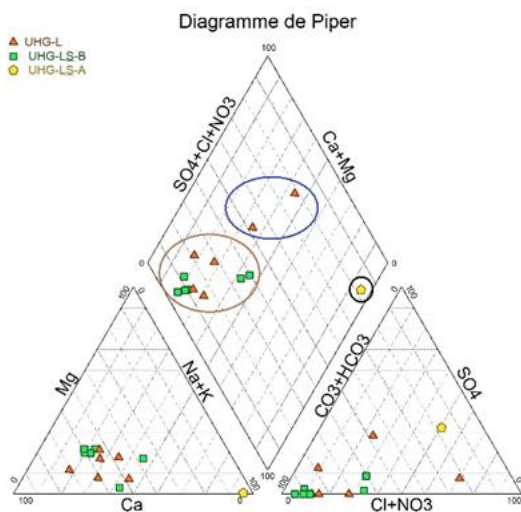


Ilustración 12. Diagrama de Piper – 2023

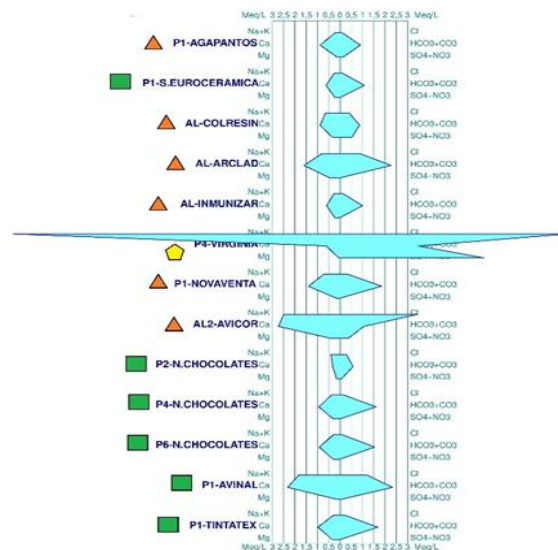


Ilustración 13. Figura 16. Diagrama de Stiff – 2023

Tabla 33. *Facies hidrogeoquímicas - 2023*

Fecha de muestreo	Código	STD (suma de iones mayoritarios) (mg/L)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Facies	Edad	Evolución preliminar
31/10/2023	P1-AGAPANTOS	94,1	130,40	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada
31/10/2023	P1-S.EUROCERAMICA	94,0	122,35	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada
31/10/2023	AL-COLRESIN	136,6	213,95	Bicarbonatada a sulfatada cálcica	Joven	Evolución media grado 2
31/10/2023	AL-ARCLAD	260,2	339,00	Bicarbonatada clorurada cálcico sódica	Media	Poco evolucionada
31/10/2023	AL-INMUNIZAR	89,7	122,50	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada
31/10/2023	P4-VIRGINIA	1229,8	1684,00	Clorurada a sulfatada bicarbonatada sódica	Antigua	Evolucionada
31/10/2023	P1-NOVAVENTA	174,9	208,50	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada
31/10/2023	AL2-AVICOR	375,7	649,00	Clorurada bicarbonatada cálcico sódica	Media	Evolución media grado 2
31/10/2023	P2-N.CHOCOLATES	69,9	100,90	Bicarbonatada clorurada sódica	Joven	Evolución media grado 2
31/10/2023	P4-N.CHOCOLATES	137,0	147,80	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada
31/10/2023	P6-N.CHOCOLATES	131,1	145,90	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada
31/10/2023	P1-AVINAL	288,7	323,50	Bicarbonatada clorurada cálcico sódica	Media	Evolución media grado 2
31/10/2023	P1-TINTATEX	144,2	163,10	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada

En la **figura 14** se observa la distribución espacial de las facies hidrogeoquímicas obtenidas anteriormente en el diagrama de Stiff para el monitoreo del 2023, superpuestas sobre la geología de los VSN. Nuevamente se identifica una clara correspondencia entre la geología y la composición iónica de las aguas subterráneas, donde las facies bicarbonatadas cálcicas predominan en las muestras provenientes de las muestras asociados al saprolito del Batolito Antioqueño y las facies con predominancia cloruradas o sulfatadas provienen de las muestras asociadas a la anfibolita de La Ceja.

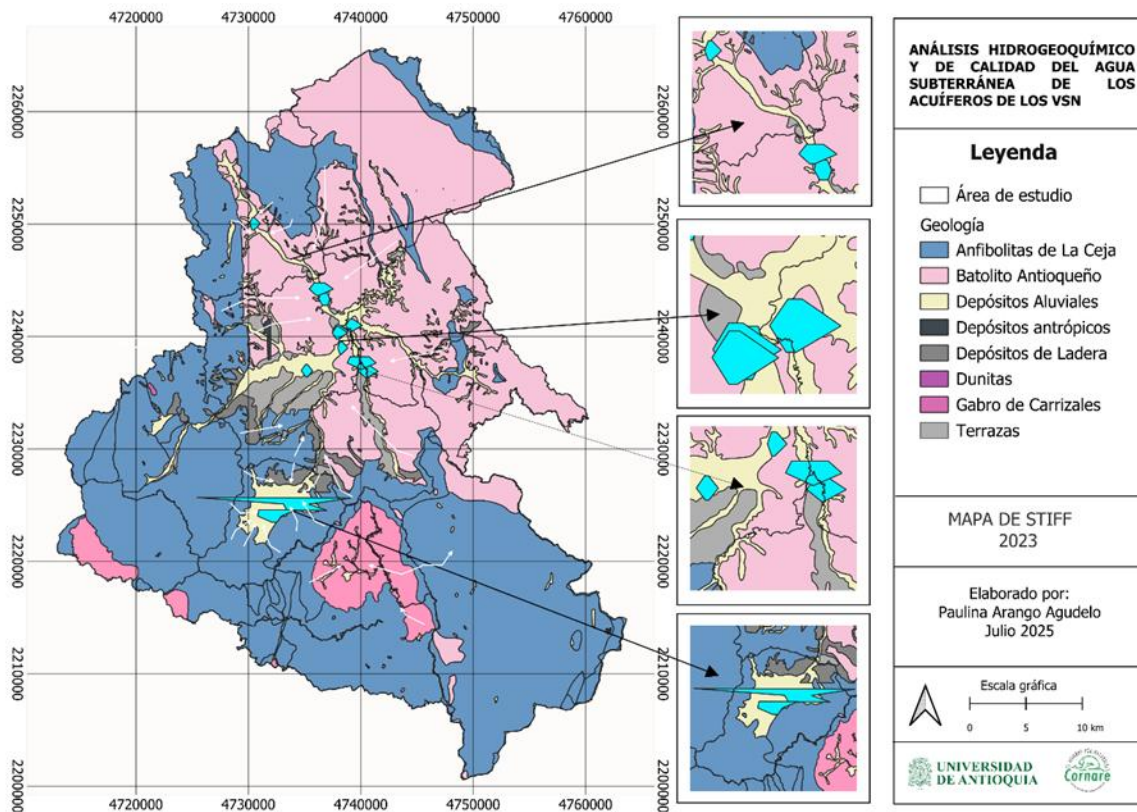


Ilustración 14. Mapa de facies hidrogeoquímicas por Stiff y unidades geológicas – 2023

La facies que predomina en los resultados obtenidos durante la campaña de monitoreo del mes de julio del 2024 es bicarbonatada cálcica, está la encontramos en puntos donde se capta el acuífero libre y el semiconfinado cuyo basamento es el Batolito Antioqueño, con excepción nuevamente del aljibe de Arclad, donde esta vez resultó tener una facies bicarbonatada sódico cálcica.

Para los puntos ubicados en el municipio de La Ceja se obtuvieron facies diferentes como era de esperarse, para el pozo 3 de Flores El Capiro se obtuvo una facies clorurada a sulfatada sódica y el aljibe de Avicor tuvo un comportamiento similar a los años anteriores y su facies fue a clorurada bicarbonatada cálcica.

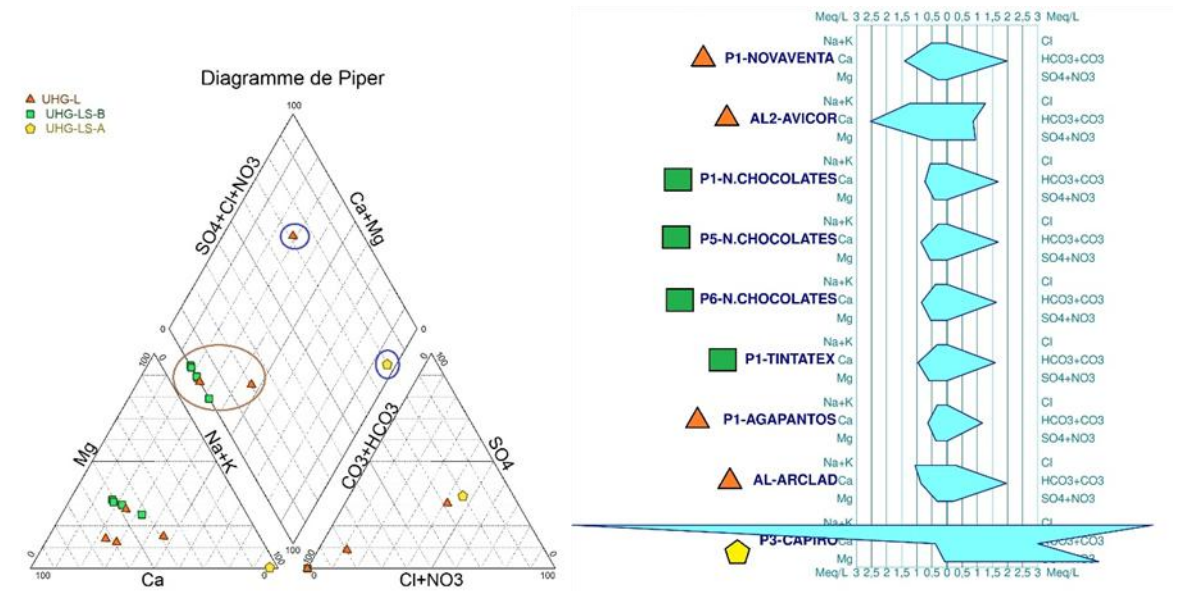


Ilustración 15. Diagrama de Piper - julio 2024

Ilustración 16. Diagrama de Stiff - julio 2024

Tabla 34. Facies hidrogeoquímicas - julio 2024

Fecha de muestreo	Código	STD (suma de iones mayoritarios) (mg/L)	Conductividad (µs/cm)	Facies	Edad	Evolución preliminar
16/7/2024	P1-NOVAVENTA	186,6	214,10	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada
16/7/2024	AL2-AVICOR	274,7	496,00	Clorurada bicarbonatada cálcica	Joven	Evolución media grado 2
16/7/2024	P1-N.CHOCOLATES	141,6	161,30	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada
16/7/2024	P5-N.CHOCOLATES	137,5	163,00	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada
16/7/2024	P6-N.CHOCOLATES	139,6	136,50	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada
16/7/2024	P1-TINTATEX	135,9	177,20	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada
16/7/2024	P1-AGAPANTOS	101,4	146,80	Bicarbonatada cálcica	Joven	Poco evolucionada
16/7/2024	AL-ARCLAD	197,0	294,50	Bicarbonatada sodico cálcica	Joven	Poco evolucionada
16/7/2024	P3-CAPIRO	971,0	1783,00	Clorurada a sulfatada sodica	Antigua	Evolucionada

En la **figura 17** se observa la distribución espacial de las facies hidrogeoquímicas obtenidas anteriormente en el diagrama de Stiff para el monitoreo de julio del 2024, superpuestas sobre la geología de los VSN. Al igual que en los monitoreos anteriores, se identifica una correspondencia entre la geología y las facies encontradas. Donde las facies bicarbonatadas cálcicas están asociadas al Batolito Antioqueño y las facies con predominancia a cloruradas o sulfatadas están asociadas a la anfibolita de La Ceja. Durante este monitoreo se observa nuevamente que la muestra proveniente del aljibe de

Arclad tiene una facies fuera de lo esperado donde se encontraron concentraciones altas de sodio

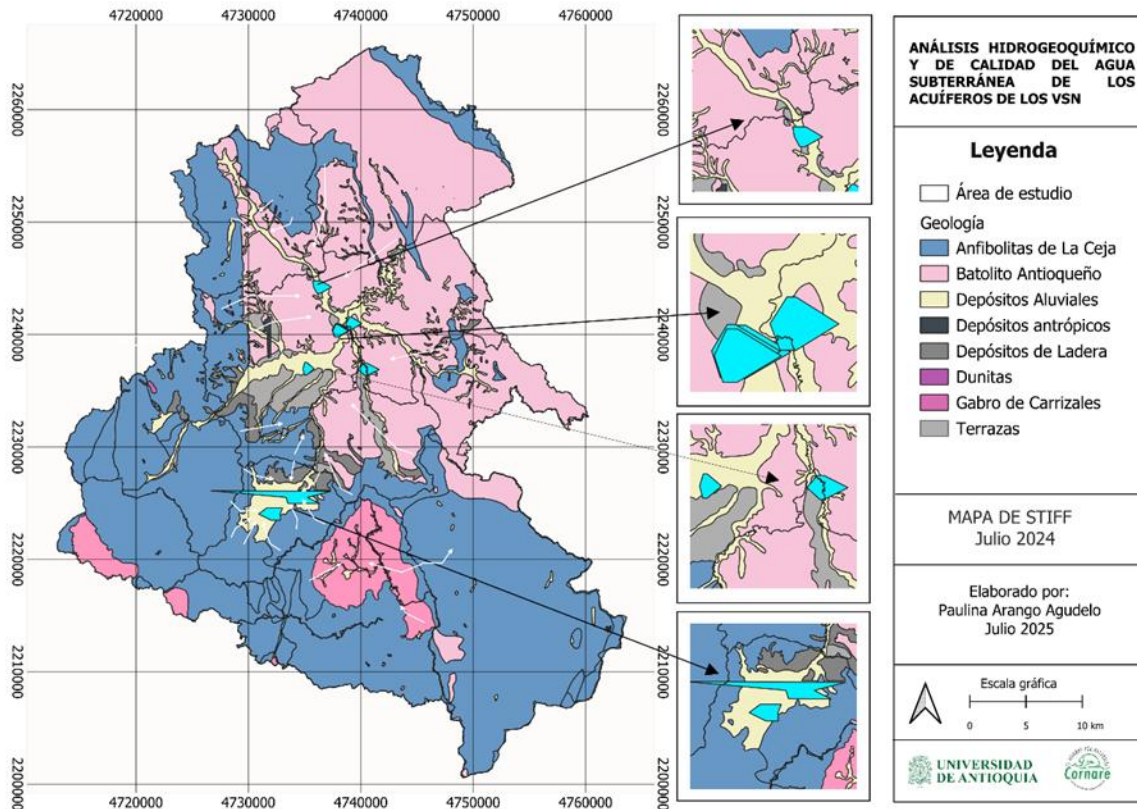


Ilustración 17. Mapa de facies hidrogeoquímicas por Stiff y unidades geológicas – Julio 2024

A partir de los resultados obtenidos en el análisis hidrogeoquímico para la campaña del mes de septiembre del 2024 se obtuvieron cinco facies dónde nuevamente predomina la facies bicarbonatada cálcica en acuíferos cuyo basamento es el Batolito Antioqueño. Para los pozos 5 y 6 de La Nacional de Chocolates se identificaron facies bicarbonatada sódico cálcica y bicarbonatada cálcico sódica respectivamente y para el pozo 1 de Avinal se identificó una facies clorurada cálcica. Nuevamente encontramos una anomalía en cuanto a la facies del aljibe de Colresin la cual dio bicarbonatada sódica

Para este análisis no se cuenta con información para captaciones ubicadas en el municipio de La Ceja dado que ninguna muestra tomada en la zona cumplió con el balance iónico.

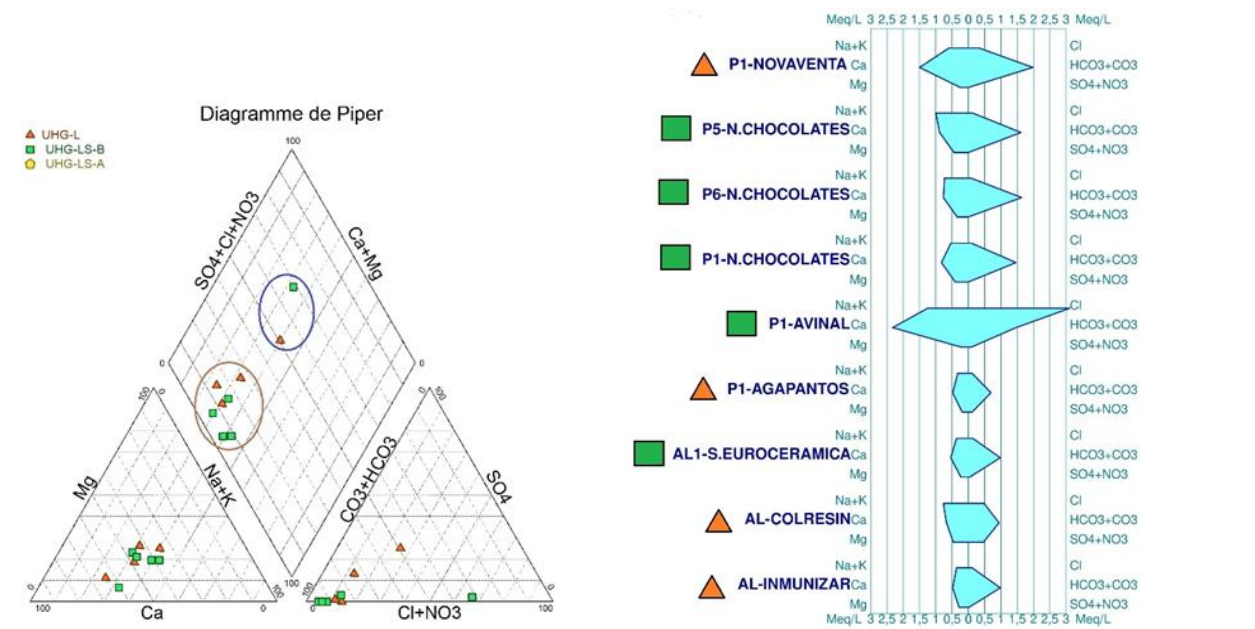


Ilustración 18. Diagrama de Piper-septiembre 2024

Ilustración 19. Diagrama de Stiff - septiembre 2024

Tabla 35. Facies hidrogeoquímicas - septiembre 2024

Fecha de muestreo	Código	STD (suma de iones mayoritarios) (mg/L)	Conductividad (µs/cm)	Facies	Edad	Evolución preliminar
24/9/2024	P1-NOVAVENTA	184,3	252,00	Bicarbonatada calcica	Joven	Evolución media grado 1
24/9/2024	P5-N.CHOCOLATES	159,6	188,10	Bicarbonatada sodico calcica	Joven	Poco evolucionada
24/9/2024	P6-N.CHOCOLATES	145,7	182,55	Bicarbonatada calcico sódica	Joven	Poco evolucionada
24/9/2024	P1-N.CHOCOLATES	132,8	167,70	Bicarbonatada calcica	Joven	Poco evolucionada
24/9/2024	P1-AVINAL	286,1	543,50	Clorurada calcica	Media	Evolución media grado 2
24/9/2024	P1-AGAPANTOS	77,0	120,90	Bicarbonatada calcica	Joven	Evolución media grado 1
24/9/2024	AL1-S.EUROCERAMICA	94,0	121,00	Bicarbonatada calcica	Joven	Poco evolucionada
24/9/2024	AL-COLRESIN	148,8	215,10	Bicarbonatada sodica	Joven	Evolución media grado 2
24/9/2024	AL-INMUNIZAR	91,8	119,70	Bicarbonatada calcica	Joven	Poco evolucionada

En la **figura 20** se observa la distribución espacial de las facies hidrogeoquímicas obtenidas anteriormente en el diagrama de Stiff para el monitoreo de septiembre del 2024, superpuestas sobre la geología de los VSN. Durante este análisis no se tuvieron en cuenta muestras asociadas a la anfibolita de La Ceja debido a que no cumplieron el balance iónico. Si bien las muestras asociadas al Batolito Antioqueño tienen en general una correspondencia a ser bicarbonatadas cálcicas, para este monitoreo se observa un aumento en las concentraciones de sodio, especialmente en las muestras que captan el

acuífero libre y el semiconfinado en la región, sin embargo, dos muestras dieron resultados anómalos, una de ellas es la muestra proveniente del aljibe de Colresin, aljibe con elevadas concentraciones de sodio y la muestra de Anival con facies clorurada cálcica.

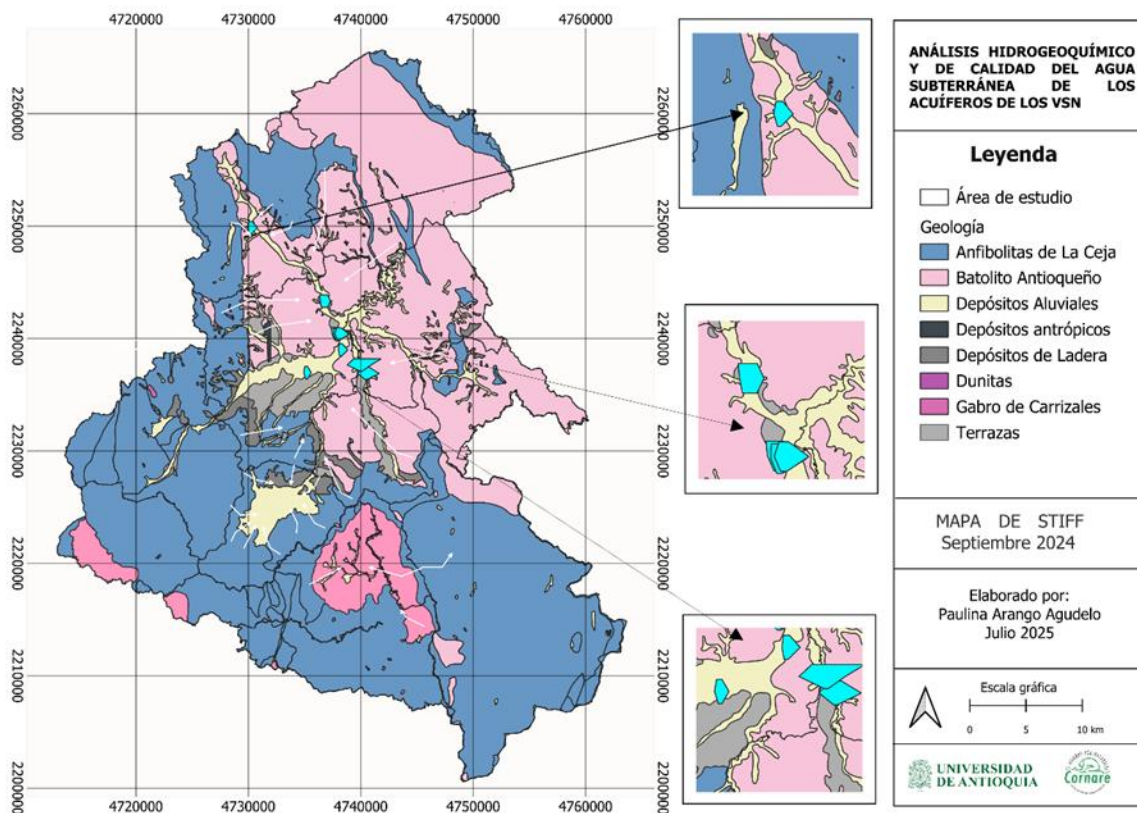


Ilustración 20. Mapa de facies hidrogeoquímicas por Stiff y unidades geológicas – septiembre 2024

Durante la campaña del mes de noviembre del 2024 se identificaron nuevamente cinco facies donde se mantiene la predominancia de la facies bicarbonatada cálcica en acuíferos cuyo basamento es el Batolito Antioqueño, el aljibe de Colresin continua arrojando resultados anómalos, para este monitoreo su facies fue una mezcla bicarbonatada a sulfatada cálcico sódico magnésica y el pozo 1 de Avinal continúa con su predominancia clorurada, con una facies para este monitoreo de clorurada bicarbonatada cálcica.

Las otras dos facies se encontraron en las muestras de agua provenientes de los acuíferos cuyo basamento es la anfibolita de La Ceja, el aljibe de Avicor obtuvo una facies sulfatada clorurada cálcico magnésica y el pozo 3 de Flores El Capiro indica una facies clorurada a sulfatada bicarbonatada sódica.

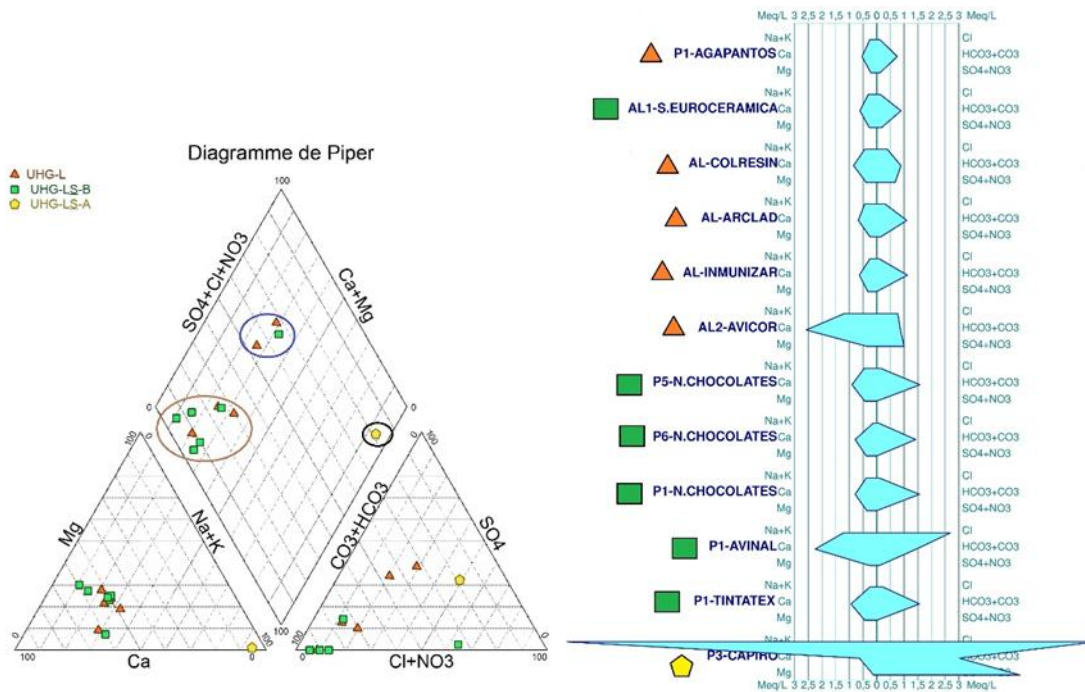


Ilustración 21. Diagrama de Piper - noviembre 2024 **Ilustración 22.** Diagrama de Stiff - noviembre 2024

Tabla 36. Facies hidrogeoquímicas - noviembre 2024

Fecha de muestreo	Código	STD (suma de iones mayoritarios) (mg/L)	Conductividad (μs/cm)	Facies	Edad	Evolución preliminar
12/11/2024	P1-AGAPANTOS	79,5	118,15	Bicarbonatada calcica	Joven	Poco evolucionada
12/11/2024	AL1-S.EUROCERAMICA	95,6	162,05	Bicarbonatada calcica	Joven	Poco evolucionada
12/11/2024	AL-COLRESIN	145,0	225,00	Bicarbonatada a sulfatada calcico sodico magnesica	Joven	Evolución media grado 2
12/11/2024	AL-ARCLAD	121,2	166,95	Bicarbonatada calcica	Joven	Evolución media grado 1
12/11/2024	AL-INMUNIZAR	96,9	125,00	Bicarbonatada calcica	Joven	Poco evolucionada
12/11/2024	AL2-AVICOR	245,4	396,50	Sulfatada clorurada calcico magnesica	Media	Evolución media grado 2
12/11/2024	P5-N.CHOCOLATES	140,7	122,75	Bicarbonatada calcica	Joven	Poco evolucionada
12/11/2024	P6-N.CHOCOLATES	116,8	103,60	Bicarbonatada calcica	Joven	Poco evolucionada
12/11/2024	P1-N.CHOCOLATES	131,2	114,95	Bicarbonatada calcica	Joven	Poco evolucionada
12/11/2024	P1-AVINAL	268,6	330,00	Clorurada bicarbonatada clacica	Media	Evolucionada
12/11/2024	P1-TINTATEX	135,0	128,75	Bicarbonatada calcica	Joven	Evolución media grado 1
12/11/2024	P3-CAPIRO	1001,4	1429,00	Clorurada a sulfatada bicarbonatada sódica	Antigua	Evolucionada

En **figura 23** se observa la distribución espacial de las facies hidrogeoquímicas obtenidas anteriormente en el diagrama de Stiff para el monitoreo de septiembre del 2024,

superpuestas sobre la geología de los VSN. Al igual que en los años anteriores se sostiene, en general, la relación entre la geología y la composición química del agua. No obstante, se observan puntos anómalos como Arclad y Colresin ubicados sobre el basamento del Batolito Antioqueño y cuyas facies resultaron ser mixtas, con altas concentraciones de cloruros y sulfatos, posiblemente influenciados por actividades antrópicas.

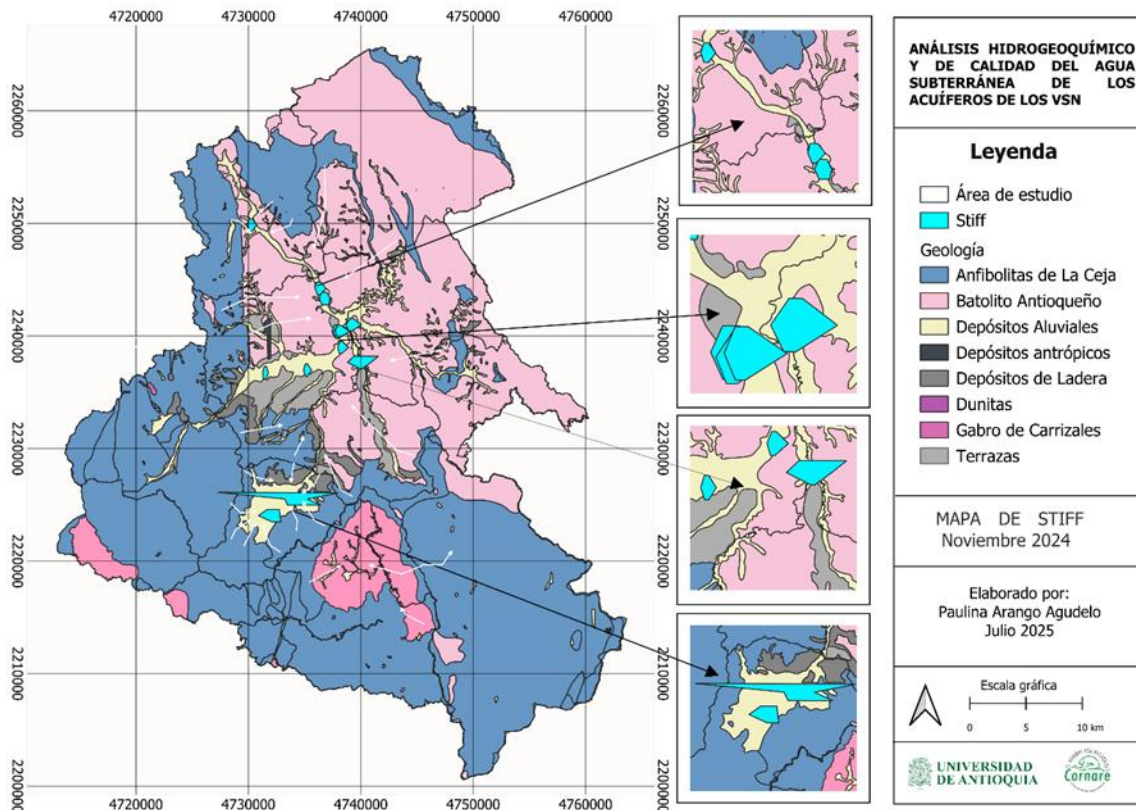


Ilustración 23. Mapa de facies hidrogeoquímicas por Stiff y unidades geológicas – noviembre 2024

6.4.4 Síntesis de las características hidrogeoquímica

Las facies encontradas y descritas en el análisis hidrogeoquímico, en general, tienen una clara correspondencia con las características hidrogeológicas de la zona de estudio. Las muestras procedentes del acuífero libre cuyo basamento es el saprolito de Batolito Antioqueño se caracterizan por tener una facies bicarbonatada cálcica en su mayoría, esto es común en ambientes de recarga directa. Estas facies indican un bajo grado de evolución hidroquímica, consistente con aguas jóvenes, de tránsito superficial y en contacto con el saprolito del Batolito Antioqueño.

Una excepción a este patrón se observa en los aljibes de Arclad y Colresin, donde se identificaron resultados anómalos, con facies más evolucionadas y presencia de cloruros, sulfatos o sodio., lo cual se debe a que?

Finalmente, las muestras provenientes de captaciones asociadas a acuíferos cuyo basamento es la anfibolita de La Ceja, muestran una clara predominancia de facies cloruradas o sulfatadas, lo cual concuerda con la geología de la zona, compuesta por rocas metamórficas; estas tienen más cantidad de ferromagnesianos, pueden contener sulfuros de hierro y/o cobre, además el acuífero emplazado en ellas es semiconfinado lo que hace que el agua pueda Esto no sepuede afirmar porque no hay dataciones del agua.

7. Mapas complementarios

Para la interpretación conjunta de los resultados fue necesario analizar el mapa de cobertura del suelo realizado con la información disponible en CORNARE (**figura 24**) y el mapa de vertimientos (**figura 25**)

El mapa de cobertura de suelo (**figura 26**) se realizó con el shapefile suministrado por CORNARE, es importante resaltar que no tiene información disponible para toda el área de estudio. En el mapa se logra identificar que la mayor parte de captaciones analizadas en el estudio se encuentran en suelos destinados a uso agrícola (color rosado claro), o en territorios artificializados (color café), el color verde indica suelos semi naturales o bosques y el color azul son superficies de agua.

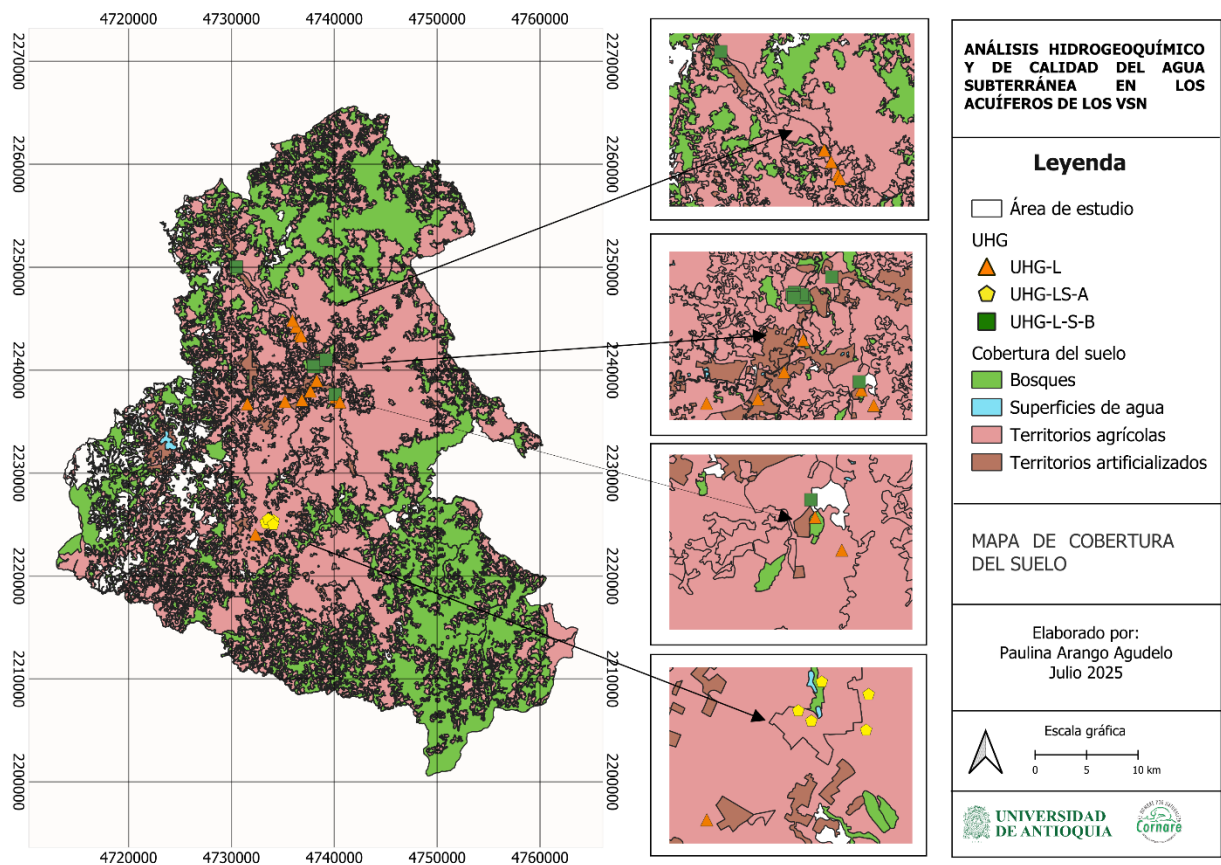


Ilustración 24. Mapa de cobertura de suelos en los VSN

Durante el año 2024 existen 459 vertimientos al suelo en los VSN de aguas residuales domésticas. En la **figura 25** se caracteriza la actividad económica de los usuarios, donde se encontró que 68 tienen como actividad principal la agricultura (color amarillo), 30 el sector pecuario (color verde) y 361 corresponden a otras actividades como construcción, manufactura, inmobiliarias o recreación (color café). Los usuarios con actividades agrícolas o pecuarias pueden presentar vertimientos de forma indirecta al suelo mediante planes de fertilización, aplicación de enmiendas o uso de aguas residuales para riego, lo que incrementa el riesgo de infiltración de contaminantes hacia los acuíferos.

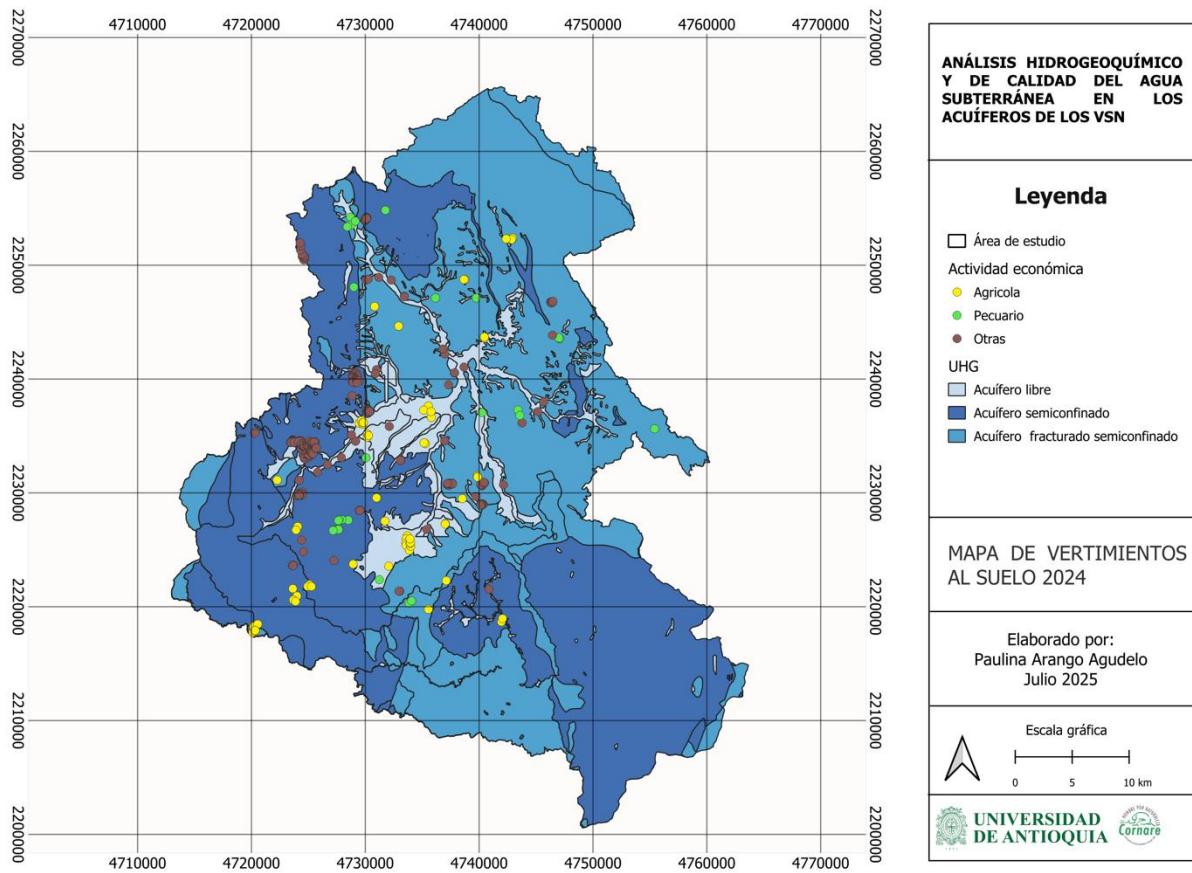


Ilustración 25. Mapa de vertimientos al suelo en los VSN durante el 2024

8. Discusión final

La química de las aguas subterráneas en los VSN, ¿Evolución natural o contaminación?

La clasificación hidrogeoquímica de las aguas subterráneas en los VSN permite evidenciar que la calidad del recurso responde a una interacción compleja entre factores naturales, como la litología del acuífero y sino tenemos dataciones del agua no podemos afirmar esto., y presiones antrópicas, derivadas de actividades agrícolas, industriales, urbanas y de disposición de aguas residuales.

En términos generales, la presencia predominante de facies hidroquímicas bicarbonatadas cálcicas puede atribuirse a la disolución de minerales presentes en el basamento cristalino fracturado del saprolito de Batolito Antioqueño y las facies con predominancia cloruradas o sulfatadas provenientes de en los puntos de muestreo del municipio de La Ceja puede atribuirse a la disolución de minerales presentes en el basamento fracturado de la roca madre metamórfica de Anfibolitas de La Ceja y a la evolución del agua durante su tránsito en el acuífero.

No obstante, los resultados obtenidos en las diferentes campañas de monitoreo (2022–2024) indican una presencia persistente de coliformes totales y *E. coli*, así como concentraciones altas de manganeso, cloruros y sulfatos que superan los niveles establecidos en la normativa colombiana (Resolución 2115 de 2007 para uso de consumo humano y el Decreto 1594 de 1984 para uso agrícola y uso industrial). El crecimiento de estos agentes contaminantes coincide espacialmente con sectores de uso agropecuario intensivo, floricultivos y presencia de vertimientos o infiltración de aguas residuales domésticas directas o indirectas, lo que sugiere una influencia antrópica sobre la calidad del agua subterránea. La presencia de cloruros y sulfatos en las muestras de agua provenientes de los pozos situados en el municipio de La Ceja pueden estar asociados a la geología y la mineralización de la anfibolita de La Ceja, sin embargo es importante realizar estudios futuros donde se pueda determinar con mayor precisión el origen de estos parámetros, pues no se descarta la posibilidad de que provengan de actividades antrópicas debido a que se encuentran ubicados en un sector donde la cobertura del suelo es principalmente agroindustrial en los cuales pueden utilizar fertilizantes o plaguicidas que estén influenciando o contaminando la composición química del agua.

Este patrón se evidencia con mayor claridad en los años 2023 y 2024, donde el deterioro de la calidad, especialmente para uso agrícola y consumo humano, se acentuó. El manganeso se convirtió en el parámetro limitante para uso agrícola en muestras correspondientes a los aljibes de Eurocerámica y Arclad, mientras que los cloruros y

sulfatos podrían estar asociados tanto a infiltración de lixiviados como a aguas residuales domésticas directas o indirectas.

La coexistencia de características químicas propias de la evolución natural con signos evidentes de contaminación antrópica plantea un desafío para la gestión del recurso: ¿hasta qué punto la composición química del agua subterránea refleja únicamente el entorno geológico, y en qué medida está siendo alterada por las actividades humanas?

Para detectar y confirmar si la fuente de un compuesto en el agua obedece a contaminación antrópica se requiere relacionar la composición química del agua subterránea con la naturaleza geológica del medio acuífero, tener un inventario de actividades potencialmente contaminantes, caracterizar los posibles focos de contaminación, la naturaleza química de los suelos y/o vertimientos y efectuar un análisis isotópicos o trazadores específicos, y avanzar hacia modelos hidrogeológicos integrados que contemplen tanto el flujo como la calidad del agua subterránea. Mientras tanto, el presente estudio demuestra que, si bien parte de la composición del agua puede explicarse por su origen geológico, los signos de contaminación microbiológica y química evidencian una creciente vulnerabilidad del acuífero frente a las actividades humanas, lo que exige acciones urgentes de gestión, control de vertimientos y protección de las zonas de recarga.

9. Recomendaciones: Trabajo futuro

- Conservar una red de monitoreo constante donde se mantengan los mismos puntos en el monitoreo que permitan analizar tendencias temporales e identificar cambios en la calidad del agua.
- Realizar el monitoreo dos veces al año, uno en temporada de lluvias y otro en temporada seca, no es necesario realizar monitoreos cada dos meses debido a que en aguas subterráneas los cambios en la calidad y la hidroquímica pueden ser lentos y progresivos y así optimizar recursos técnicos y económicos sin comprometer la calidad de la información.
- Incluir nuevas captaciones a la red de monitoreo considerando las zonas de recarga, tránsito y descarga para realizar un mapa final de direcciones de flujo, con el fin de realizar estudios más precisos y comprender el comportamiento espacial del recurso y su evolución química.
- Actualizar el MHC con los nuevos puntos incluidos en la red de monitoreo para obtener información más real y precisa de las UHG, los flujos subterráneos y los gradientes piezométricos, lo cual es fundamental para orientar la planificación

territorial, la gestión del recurso y el diseño de estrategias de protección y monitoreo.

- Implementar análisis de nivel de fondo químico que posibiliten determinar si para los compuestos presentes en el agua subterránea existe más de una fuente de suministro
- Realizar estudios isotópicos avanzados donde se permita determinar con exactitud las fuentes de recarga y diferenciar procesos de evolución natural o contaminación antrópica y determinar la edad del agua subterránea.

10. Referencias

- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*
- Agua y SIG. (2011, 10 de enero). Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos. <https://aguaysig.com/los-diagramas-mas-usados-para-la-interpretacion-de-analisis-hidroquimicos/>
- Betancur, T. (2023). *Las aguas subterráneas en el departamento de Antioquia*. Universidad de Antioquia.
- Canadian Council of Ministers of the Environment – CCME. (2001). *Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life – CCME water quality index 1.0 technical report*. Winnipeg, Canada.
- Chapman, D. (1996). *Water quality assessments: A guide to the use of biotas, sediments and water in environmental monitoring* (2nd ed.). E & FN Spon.
- Chebotarev, I. I. (1955). *Metamorphism of natural waters in the crust of weathering*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 8(4), 197-211
- Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare – CORNARE. (2015). *Análisis socioeconómico del Oriente Antioqueño. Anexo 1 del Plan de Crecimiento Verde y Desarrollo Compatible con el Clima para el Oriente Antioqueño*.
- Garcés, D. (2018). *Definición de la red de flujo subterránea de la Vega Aluvial de Río Negro mediante modelamiento numérico. Trabajo dirigido de grado*. Universidad EIA. Envigado
- Gómez D.S., (2018) *Determinación de la unidad hidrogeológica y estimación de la recarga potencial del sistema hidrogeológico del Valle de San Nicolás. Trabajo dirigido de grado*. Universidad EIA. Envigado
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). (2022). *Estudio Nacional del Agua 2022*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021a). *Resolución 0699 de 2021, por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas tratadas al suelo*. Diario Oficial No. 51.673. <https://www.minambiente.gov.co>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Resolución 1256 de 2021, por la cual se establecen los requisitos para el uso de aguas residuales tratadas*. Diario Oficial No. 51.868. <https://www.minambiente.gov.co>

Ministerio de Medio Ambiente, República de Colombia. (1984). Decreto 1594 de 1984, por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III - Libro I - del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.

Ministerio de Medio Ambiente, República de Colombia. (2007). Resolución 2115 de 2007, por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

Ministerio de Medio Ambiente, República de Colombia. (2010). Decreto 3930 de 2010, por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI – Parte III – del Decreto – Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

UNESCO-IHP. (2006). Guidelines for the monitoring and assessment of transboundary rivers. International Hydrological Programme, Paris.

Universidad Autónoma Juan Misael Saracho – UAJMS. (s.f.). Evaluación de la calidad de agua mediante macroinvertebrados bentónicos en la cuenca media y baja del río Yesera, Tarija-Bolivia [Trabajo de investigación]. Biblioteca Digital UAJMS.

Universidad EAFIT. (2020). Evaluación de la disponibilidad hídrica subterránea y definición de estrategias de abastecimiento en los valles de San Nicolás y Aburrá, Antioquia. [Informe técnico]. Medellín, Colombia.

Vélez, M. (2017). Indicadores e índice de calidad de agua subterránea como base para establecer sus usos potenciales [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia].