



**Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas del sistema acuífero del golfo de Urabá-  
Colombia**

Yesenia González Cano

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ecológico de Zonas Costeras

Asesor

Carlos Arturo Orrego Montoya, Magíster (MSc) en Ingeniería Ambiental

Universidad de Antioquia  
Corporación Académica Ambiental  
Ecología de Zonas Costeras  
Turbo, Antioquia, Colombia  
2023

---

(González Cano, 2023)

---

González Cano, Y. (2023). *Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas del sistema acuífero del golfo de Urabá-Colombia* [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia.

---



**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## Tabla de contenido

### RESUMEN 1

#### 1. INTRODUCCIÓN 2

1.1. Pregunta de investigación .....5

1.2. Hipótesis .....5

1.3. Objetivos.....5

1.3.1. Objetivo general 5

1.3.2. Objetivos específicos 5

#### 2. MATERIALES Y METODOS 6

2.1. Área de estudio.....6

2.1.1. Geología e hidrogeología 7

2.2. Metodología .....7

2.2.1. Objetivo específico 1: caracterización hidrogeoquímica del sistema acuífero del golfo de Urabá 8

2.2.1.1. Selección de las muestras .....8

2.2.1.2. Análisis estadístico .....8

2.2.1.3. Análisis gráficos.....8

2.2.2. Objetivo específico 2: evaluar la calidad del agua subterránea para consumo humano y uso agrícola 9

2.2.2.1. Selección del índice calidad de agua para consumo humano y riego .....9

2.2.2.2. Caracterización hidroquímica del agua para riego..... 11

2.2.3. Objetivo específico 3: identificar las zonas aptas del acuífero para ser fuentes de abastecimiento de los sistemas de riego. 12

#### 3. RESULTADOS 14

3.1. Caracterización hidroquímica ..... 14

3.2.	Análisis de componentes principales .....	14
3.3.	Índice de calidad de agua para consumo humano .....	19
3.4.	Índices de calidad para agua de riego.....	20
3.5.	Relación de absorción de sodio (SAR).....	22
3.6.	Riesgo de Sodio (Na%) .....	24
3.7.	Carbonato de sodio residual (RSC) .....	27
3.8.	Bicarbonato de sodio residual (RSBC).....	28
3.9.	Salinidad potencial (SP) .....	29
3.10.	Peligro de magnesio (MH) .....	30
3.11.	Relación de Kelley (KR).....	31
3.12.	Índice de permeabilidad (PI) .....	32
4.	DISCUSIÓN	33
5.	CONCLUSIONES	40
6.	BIBLIOGRAFÍA	42

## Índice de tablas

Tabla 1.	Pesos asignados a los parámetros del agua para consumo humano y riego.	10
Tabla 2.	Índices o indicadores para determinar la calidad del agua para uso agrícola.	12
Tabla 3.	Indicador de riesgo en agua subterránea para uso agrícola basados en índices.	13

Tabla 4.	Estadística descriptiva de los 69 puntos de muestreo del acuífero.	14
Tabla 5.	Resultados del Análisis de Componentes Principales y Varianza explicada. En negrilla se resaltan los pesos de las variables (parámetros) mejor representados por cada componente principal.	15
Tabla 6.	Estándares de los parámetros fisicoquímicos para consumo humano y su impacto en la salud humana (Sutradhar & Mondal, 2021).	20
Tabla 7.	Clasificación del WQI para consumo humano (Raychaudhuri et al., 2014).	20
Tabla 8.	Categorías del índice de calidad de agua para riego con relación a el tipo de restricción que requiere para su uso.	22
Tabla 9.	Análisis de los índices de calidad de agua subterránea.	24

## Índice de figuras

Figura 1.	Ubicación del área de estudio, correspondiente al acuífero del Golfo de Urabá.	6
Figura 2.	Análisis gráfico de los componentes principales y su distribución.	16
Figura 3.	Diagrama de Piper con la distribución de los puntos de monitoreo y las zonas del área de estudio.	16
Figura 4.	Diagrama de Schoeller, se interpretan las concentraciones de iones presentes en la zona de estudio.	18
Figura 5.	Mapa del índice de calidad WQI para consumo humano, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación.	21
Figura 6.	Mapa del índice de calidad WQI para riego, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación.	22
Figura 7.	Mapa del índice de calidad SAR, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación.	24

- Figura 8. Diagrama de salinidad con la representación de todos los puntos de muestreo.  
25
- Figura 9. Diagrama de Wilcox con representación de los puntos de muestreo. 26
- Figura 10. Mapa del índice de calidad Na%, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación. 26
- Figura 11. Mapa del índice de calidad RSC, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación. 27
- Figura 12. Mapa del índice de calidad RSBC, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación. 28
- Figura 13. Mapa del índice de calidad PS, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación. 29
- Figura 14. Mapa del índice de calidad MH, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación. 30
- Figura 15. Mapa del índice de calidad KR, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación. 31
- Figura 16. Mapa del índice de calidad PI, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación.  
33

## RESUMEN

La contaminación de origen natural y antrópico de las fuentes de agua limita su aprovechamiento, principalmente para el consumo humano. Sobre el agua subterránea se debe tener de manera constante un seguimiento que permita determinar su calidad; herramientas de diagnóstico rápidas y representativas como los índices de calidad del agua (WQI) garantizan una evaluación integral, estos son instrumentos importantes en la toma de acciones para manejo y control del riesgo presente de acuerdo con la destinación del recurso. En el presente estudio se analizó información existente del agua subterránea del acuífero del golfo de Urabá y se hizo hincapié en la calidad del agua para dos usos que corresponden a riego y consumo humano, para ello se analizaron un total de 69 muestras de agua las cuales fueron recolectadas en toda el área de estudio que corresponde a su vez a los 11 municipios presentes en esta. A través de WQI para consumo humano se determinó que el 13% de las muestras presentan calidad excelente, 47,8% calidad buena, 33,3% pobre y en menor porcentaje muy pobre calidad con un 4,3%; lo que indica a nivel general que la calidad del agua del acuífero presenta agua con buena calidad, sin embargo, no debe descartarse el uso de tratamientos antes de su consumo. Los índices de WQI para riego, relación de absorción de sodio (SAR), porcentaje de sodio (Na%), carbonato de sodio residual (RSC), bicarbonato de sodio residual (RSBC), peligro de magnesio (MR), salinidad potencial (PS), relación de Kelly (KR) e índice de permeabilidad (PI), se utilizaron para investigar en detalle la calidad del agua, se identificó que el recurso presenta buena calidad y no genera consecuencias trascendentales en la permeabilidad del suelo, además, se definió que el 82,6% del total de muestras analizadas no requieren restricción en su uso para este fin. Para entender el carácter hidroquímico de las muestras, se utilizaron los diagramas de Piper, Schoeller y el diagrama de Wilcox con los cuales se determinó que el agua de la zona corresponde a las familias bicarbonatadas sódicas seguido de la familia bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, por otra parte, las concentraciones de iones más bajos corresponden a los  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{CO}_3^-$ , mientras que las más altas corresponden a los  $\text{HCO}_3^-$ , coincidiendo con el tipo de agua que presenta la zona.

**Palabras clave:** Aguas subterráneas, Acuífero de Urabá, Caracterización hidrogeoquímica, Índices de calidad del agua.

## 1. INTRODUCCIÓN

El 97% del agua dulce disponible del planeta corresponde a aguas subterráneas (Rey, 2010). Estas constituyen una fuente complementaria para el desarrollo de actividades económicas, de abastecimiento público de poblaciones urbanas, rurales (Rodríguez, 2022) y de sostenimiento de los ecosistemas. Conocer la disponibilidad de las aguas subterráneas en cuanto a cantidad y calidad permite su uso, planificación y gestión.

La calidad de las aguas subterráneas depende del origen, formación geológica (i.e propiedades geoquímicas) y tiempo de permanencia en el subsuelo donde ocurren procesos químicos y múltiples reacciones que modifican las propiedades fisicoquímicas del agua. (Cardona, & Hernández, 1995),

En el proceso evolutivo del agua subterránea es importante considerar la zona de recarga, tránsito y descarga del agua dentro de la unidad hidrogeológica que ocupa, para entender esto es importante comprender la infiltración del agua en el suelo (Romanelli *et al.*, 2010), esta influye de manera directa en efectos oxidantes que se traducen en la disolución del dióxido de carbono presente en la atmósfera y en el proceso de descomposición de la materia orgánica por parte de los microorganismos presentes en el suelo, la infiltración del agua ocasiona una circulación activa generando el lavado de minerales solubles e incrementando la disolución de iones tales como  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  (Vélez, 2017).

La distancia que recorre el agua infiltrada cambia los procesos de oxido-reducción que condicionan las concentraciones de iones ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  entre otros) y están directamente relacionadas con el proceso de intercambio iónico, adquiriendo una mayor mineralización e interfiriendo en la química natural del agua (Cardona & Hernández, 1995).

La gestión inadecuada de este recurso puede conducir a la contaminación y escasez. En los últimos años, varios investigadores han estudiado las características químicas de las aguas subterráneas y cómo afectan la salud humana y la producción de cultivos, ya sea con índices de calidad de agua (WQI) o algunas medidas estadísticas diferentes (Acharya *et al.*, 2018, Adimalla & Venkatayogi, 2018, Annapoorna & Janardhana, 2015, Huerfano-Moreno, 2023, Perez *et al.*, 2018, Salman & Elnazer, 2015).

La variación de la calidad del agua subterránea se ve altamente influenciada en función de los parámetros físicos y químicos, que a su vez, están intervenidos por cambios hidrológicos provenientes de agente naturales o artificiales, esta es alterada de manera natural como consecuencia del lavado de minerales en las rocas, la composición del suelo de la zona y la vegetación, de manera artificial está sujeta a la influencia de actividades humanas, derivadas de las actividades agrícolas, desarrollo forestal, urbano e industrial (Foster, *et al.*, 2003 & Villegas *et al.*, 2013). Cuando algunos iones y minerales están presentes en el agua más allá del límite permisible, esta se vuelve inadecuada, limitando el uso para consumo humano y riego, estos límites están determinados en cada país y por diversas organizaciones que rigen los temas ambientales (Resolución 2115 de 2007, Decreto 076 de 2015 y la Organización Mundial de la Salud OMS) (Párraga-Lema & Galarza-Villamar, 2016).

El aumento de la población y las industrias ha ocasionado problemas ambientales, causando contaminación en el aire, el suelo y los recursos hídricos (Rosas-Zambrano, 2021), constituyendo un factor desfavorable en el agua subterránea, en el que a diferencia del agua superficial, la contaminación es difícil de detectar, esto se debe a que está oculta y una vez contaminada, puede permanecer así durante décadas o incluso cientos de años debido al tránsito relativamente lento del agua (Caraballo & Xavier, 2012). Por lo tanto, existe una necesidad urgente de desarrollar estrategias de gestión eficientes para el monitoreo y la evaluación efectiva de la calidad del agua subterránea, que a su vez pueda servir como una herramienta eficaz para mejorar la gestión y el desarrollo del recurso (Jha *et al.*, 2020).

El agua subterránea tiende a ser la principal fuente de suministro de agua en la mayoría de los países en desarrollo (Wester & van Dijk, 2009). En Colombia, el 75% del territorio presenta potencialidades hidrogeológicas para el almacenamiento de aguas subterráneas (Campillo-Pérez, 2021), esta condición se debe a la ubicación geográfica, la variedad

topográfica y el régimen climático que predomina en el país (Restrepo-Gesamá, 2014); estas características se manifiestan en su extensa red fluvial superficial, la existencia de cuerpos de agua lénticos y la presencia de enormes extensiones de humedales, factores que generan condiciones favorables para el almacenamiento de aguas subterráneas (Jiménez-Cisneros & Galizia-Tundisi, 2012), sin embargo la oferta hídrica no está distribuida de una manera homogénea a lo largo y ancho de su territorio (Restrepo-Gesamá, 2014).

En la zona nororiental se encuentra la región de Urabá, en ella hace presencia uno de los acuíferos más importantes del país (Bastidas-Osejo, 2019 & Betancur-Vargas *et al.*, 2017), el cual presenta una capacidad de recarga de 29.1 millones de m<sup>3</sup>/año, constituye la base fundamental para el suministro de agua de la población y el sector productivo, y proporciona una reserva para riego de cultivos y lavado de fruta (42.287 ha de banano y 11.555 de plátano), además de ser la principal fuente de abastecimiento de 34 comunidades rurales y de las cabeceras urbanas de la región (Villegas, 2013).

Este acuífero forma parte del abastecimiento público, doméstico e industrial. En la zona existen 678 pozos profundos, 550 (81%) activos, 27 (4%) inactivos y 101 (15%) abandonados (Yepes & Vargas, 2013). Es así como se evidencia a partir de lo previamente descrito y teniendo en cuenta los diversos usos que se dan al reservorio, que la demanda de agua subterránea ha aumentado, ascendiendo su consumo a 22 millones de m<sup>3</sup>/año, alcanzando casi el mismo nivel de recarga del acuífero (Villegas & Vivas, 2009), situación que se relaciona con un efecto negativo tanto en la cantidad como en la calidad del agua subterránea.

En este contexto, el acuífero de Urabá presenta alta susceptibilidad a la contaminación, tanto por las actividades que se realizan en la zona, cómo por la alta demanda del recurso (Taborda *et al.*, 2008), por esta razón, ante las problemáticas que amenazan la calidad y la cantidad del agua contenida en el acuífero, se han venido adelantando desde distintos entes ambientales actividades encaminadas en la búsqueda de instrumentos legales que puedan implementarse con el fin de proteger este recurso, siendo importante para tal fin el establecer mecanismos de análisis ambientales como los índices de calidad de agua (WQI) y otros índices significativos (Aly *et al.*, 2015).

## **1.1. Pregunta de investigación**

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, surge la siguiente pregunta de investigación ¿cuál es la calidad de las aguas subterráneas del sistema acuífero del golfo de Urabá Colombia?

## **1.2. Hipótesis**

Los índices de calidad de agua permiten conocer el estado del recurso hídrico, es así como a partir de índices propuestos se determinará con gran precisión que la calidad del agua que se encuentra presente en el sistema acuífero del golfo de Urabá es adecuada para diversos usos, incluyendo los de consumo humano y riego.

## **1.3. Objetivos**

### ***1.3.1. Objetivo general***

Evaluar la calidad del agua subterránea del sistema acuífero del golfo de Urabá a través de índices de calidad.

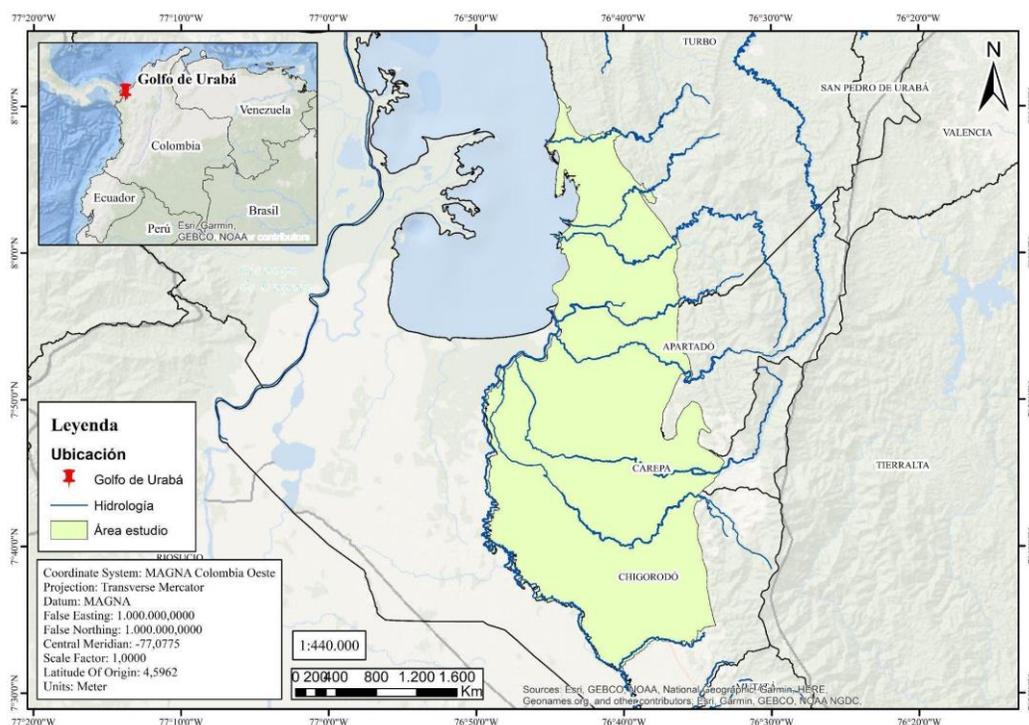
### ***1.3.2. Objetivos específicos***

- Realizar caracterización hidrogeoquímica del sistema acuífero del golfo de Urabá.
- Determinar la calidad del agua subterránea para consumo humano y uso agrícola.
- Identificar las zonas aptas como fuentes de abastecimiento del acuífero para los sistemas de riego.

## 2. MATERIALES Y METODOS

### 2.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la región de Urabá, localizada en la costa norte del departamento de Antioquia, cubre aproximadamente 1.030 km<sup>2</sup>; limita al oriente con las Serranías de Abibe y Las Palomas, al norte con el litoral del mar Caribe (Figura 1) y al occidente y sur con el departamento del Chocó. En la zona existen alrededor de 550 pozos activos, la mayoría de ellos destinados a cubrir la demanda del sector bananero (Villegas & Vivas, 2009).



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio, correspondiente al acuífero del Golfo de Urabá.

De acuerdo con Zúñiga et al (2010), Urabá presenta clima cálido semi húmedo, la precipitación promedio anual registrada en la zona aumenta en el sentido noreste-suroeste desde 2.200 mm hasta los 3.800 mm, alcanzando una recarga de 29.1 millones de m<sup>3</sup>/año; es así como las conductividades hidráulicas calculadas son variables y oscilan entre 2 m/día (Noreste de la región) hasta los 20 m/día (en el sur), con un coeficiente de almacenamiento del orden de 10<sup>-4</sup> que indica el confinamiento del acuífero, y caudales de hasta 150 L/s.

### **2.1.1. Geología e hidrogeología**

La región de Urabá posee un acuífero multicapa formado por depósitos aluviales del Cuaternario, a la vez se encuentra constituido por una serie de capas alternadas entre permeables, semipermeables e impermeables, predominando hacia el norte espesores arcillosos y hacia el centro y sur, capas más permeables (Ossa, 2017). El acuífero está situado en sedimentos geológicamente jóvenes y en áreas bastante planas y bajas, por lo que se ve altamente influenciado por procesos importantes como la disolución de carbonatos, evaporitas y silicatos (Zúñiga *et al.*, 2010), que a su vez tienen un efecto directo en la composición química del agua, influenciando significativamente los procesos hidrológicos del acuífero; el sistema hidrogeológico está formado por un nivel somero con características de acuífero libre, y un acuífero confinado formado por una intercalación de capas permeables y semipermeables que le confieren el carácter de multicapa (Duque *et al.*, 2020), presentando un espesor aproximado de entre 5 y 298 m (Campillo-Pérez, 2021). El acuífero cubre aproximadamente 1.030 km<sup>2</sup> y se caracteriza por ser continental y poseer una línea costera con influencia marina (Zúñiga *et al.*, 2010).

### **2.2. Metodología**

El proceso de investigación consistió en la recopilación de información fisicoquímica del agua subterránea de la zona de estudio, esta información fue obtenida a través de la Corporación para el Desarrollo Sostenible de Urabá (CORPOURABA). Se solicitaron los datos y posteriormente se verificó la calidad de estos, considerando los errores analíticos en el balance iónico con resultados menores o iguales al 20%. El análisis de los datos se realizó utilizando métodos gráficos, estadísticos descriptivos y multivariados (ACP) con los cuales se determinó la composición química del agua.

Para la determinación de los índices de calidad de agua se incluyó la información relacionada con datos de medición de variables, la base principal para el desarrollo de la investigación consistió en tres partes: la primera corresponde a la caracterización hidroquímica a través de índices y diagramas, la segunda corresponde a la identificación y selección del índice de calidad para evaluar la idoneidad del agua para consumo humano y riego, y por último la

representación gráfica mediante diagramas y mapas, utilizando software de libre acceso Arcgis y Diagrammes.

### **2.2.1. Objetivo específico 1: caracterización hidrogeoquímica del sistema acuífero del golfo de Urabá**

#### **2.2.1.1. Selección de las muestras**

Inicialmente se recopiló la información disponible en CORPOURABA en cuanto a la calidad fisicoquímica del agua de 69 pozos del acuífero del Golfo de Urabá; los datos analizados corresponden al periodo comprendido entre los años 2017 hasta el 2022, exceptuando el año 2021 (debido a la carencia de datos por el periodo de pandemia). Para el análisis estadístico se analizaron los datos y la calidad de estos a través del cálculo del error analítico del balance iónico, de manera que la suma de las concentraciones en miliequivalentes de cationes fuera igual a la suma de las concentraciones en miliequivalentes de aniones (análisis de iones mayoritarios) a través de la ecuación 1.

$$Error[\%]: \frac{\sum Cationes - \sum Aniones}{\sum Cationes + \sum Aniones} * 100$$

**Ecuación 1:** Balance iónico.

#### **2.2.1.2. Análisis estadístico**

El análisis se realizó utilizando tanto el programa Excel como el paquete estadístico IBM SPSS Statistics, a partir de este los datos fueron normalizados para posteriormente realizar un análisis de componentes principales (ACP), técnica utilizada para la reducción de datos y la interpretación de patrones dentro del conjunto de estos (Farnham *et al.*, 2003).

#### **2.2.1.3. Análisis gráficos**

La exploración y análisis de la información hidroquímica del agua subterránea se realizó a través de métodos gráficos utilizando los diagramas de Piper, Scholler y Wilcox, empleando para ello el software Diagrammes. El diagrama de Piper combina la composición catiónica

(Ca<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> y Mg<sup>+</sup>) y aniónica (Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) principal en un diamante central identificando e interpretando procesos químicos; el diagrama de Schoeller representa las concentraciones iónicas comparando la hidroquímica del agua (Moreno-Merino *et al.*, 2021). Finalmente, se utilizó el diagrama de Wilcox, esta herramienta se basa en la relación del porcentaje de sodio y la conductividad eléctrica, este se divide en cinco áreas (excelente, buena, admisible, mediocre y mala) que a su vez, permiten la clasificación de la calidad y el tipo de agua (Lara-Mena, 2022).

**2.2.2. Objetivo específico 2: evaluar la calidad del agua subterránea para consumo humano y uso agrícola**

**2.2.2.1. Selección del índice calidad de agua para consumo humano y riego**

Tras el procesamiento de los datos se realizó la evaluación de la idoneidad del agua subterránea para consumo humano y riego, la cual se hizo en base al índice de calidad de agua (WQI), y se calculó en función de la influencia de actividades naturales y antropogénicas de acuerdo con la química del agua subterránea (Vasanthavigar *et al.*, 2010). Este se analizó a partir de 12 parámetros: pH, Conductividad Eléctrica (CE), Dureza Total (TH), Calcio (Ca<sup>+</sup>), Magnesio (Mg<sup>+</sup>), Sodio (Na<sup>+</sup>), Potasio (K<sup>+</sup>), Bicarbonatos (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Cloruros (Cl<sup>-</sup>), Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) y Fluoruro (F<sup>-</sup>) y fue evaluado en cuatro pasos de acuerdo con la metodología descrita por Sutradhar & Mondal (2021).

**Paso 1:** Se asignó peso a cada uno de los 12 parámetros dependiendo de su impacto en la zona y la importancia relativa en la calidad general del agua para consumo humano, el peso asignado varió entre 1 y 5, siendo el peso máximo equivalente a 5 para CE, 4 para HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, un peso de 3 para TH, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 2 para Ca<sup>+</sup>, Mg<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> y 1 para pH, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y F<sup>-</sup>. Para riego los pesos corresponden a 1 para pH, TH, Ca<sup>+</sup>, Mg<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y F<sup>-</sup>, 2 para CE, 3 para NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y el peso más elevado que corresponde a 5 se asignó al K<sup>+</sup> (Tabla 1).

Parámetros	Consumo humano	Riego
	Peso (Wi)	Peso (Wi)
pH	1	1

CE	5	2
TH	3	1
Ca <sup>2+</sup>	2	1
Mg <sup>2+</sup>	2	1
Na <sup>+</sup>	2	1
K <sup>+</sup>	3	5
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	4	1
Cl <sup>-</sup>	1	1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3	3
SO <sub>4</sub> 2 <sup>-</sup>	1	1
F <sup>-</sup>	1	1

**Tabla 1.** Pesos asignados a los parámetros del agua para consumo humano y riego.

**Paso 2:** Determinar el peso relativo de cada parámetro mediante la ecuación:

$$Rwi: \frac{Wi}{\sum_{i=1}^n Wi}$$

Donde,

*Rwi*: peso relativo

*wi*: peso de cada parámetro

*n*: número de parámetros.

**Paso 3:** Establecer una escala de valoración de la calidad para cada parámetro, para ello, se dividió la concentración resultante de cada muestra de agua analizada por su respectivo límite máximo permisible (Resolución 2115 de 2007 y Decreto 076 de 2015) y el resultado se multiplicó por 100.

$$Qi: \frac{Ci}{Si} * 100$$

*Qi*: calificación de la calidad

*Ci*: Concentración de cada parámetro químico en cada muestra de agua en mg/L

$S_i$ : valor estándar de agua potable en mg/L.

**Paso 4:** por último, se calculó el índice de calidad de agua (WQI) con la siguiente fórmula.

$$WQI: \sum_{i=1}^n (Rw_i * q_i)$$

Donde

$WQI$ : Índice de calidad del agua

$Rw_i$ : peso relativo de cada parámetro hidroquímico.

$q_i$ : calificación de calidad.

#### 2.2.2.2. Caracterización hidroquímica del agua para riego

La caracterización del agua subterránea para el uso agrícola se adelantó basándose en el estudio descrito por Sutradhar & Mondal (2021), este se desarrolló a partir de varios índices: Relación de absorción de Sodio (SAR), Porcentaje de Sodio (Na%), Carbonato de Sodio residual (RSC), Bicarbonato de sodio residual (RSBC), Peligro de magnesio (MR), Salinidad potencial (PS), Relación de Kelly (KR) e Índice de permeabilidad (PI).

Los índices relacionados son especializados para aguas subterráneas y se desarrollan empleando diversas ecuaciones (Tabla 2), con estas ecuaciones y a partir de las concentraciones determinadas se puede clasificar la calidad del agua y sus posibles efectos en el suelo (Tabla 3).

Índices	Formula
Relación de absorción de sodio (SAR)	$SAR: \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca^2 + Mg^2}{2}}}$
Porcentaje de sodio (Na%)	$Na: \left( \frac{Na + K}{Ca^2 + Mg^2 + Na + K} \right) * 100$
Carbonato de Sodio Residual (RSC)	$RSC: (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$

---

Bicarbonato de Sodio Residual (RSBC)

$$RSBC: HCO_3 - Ca_2 +$$

Peligro de Magnesio (MH)

$$MH: \left( \frac{Mg_2 +}{Ca_2 + Mg_2} \right) * 100$$

Salinidad potencial (PS)

$$PS: Cl - + \frac{1}{2} SO_4 -$$

Relación de Kelly (KR)

$$KR: \frac{Na}{Ca_2 + Mg_2}$$

Índice de permeabilidad (PI)

$$PI: \left( \frac{Na + \sqrt{HCO_3 -}}{Ca_2 + Mg_2 + Na} \right) * 100$$

---

**Tabla 2.** Índices o indicadores para determinar la calidad del agua para uso agrícola.

**2.2.3. Objetivo específico 3: identificar las zonas aptas del acuífero para ser fuentes de abastecimiento de los sistemas de riego.**

Los índices calculados en el objetivo 2, fueron transformados a partir de la aplicación de técnicas de interpolación empleando para ello el software geoespacial Arcgis 10,7, con el cual se elaboraron diversos mapas que permitieron sectorizar la zona de estudio de acuerdo con su calidad.

Parámetros	Rango	Clasificación	Referencias
SAR	0-10	Excelente	(US Salinity Laboratory 1954)
	10-18	Bueno	
	18-26	Dudoso	
	>26	Inadecuado	
Na%	<20	Excelente	(Wilcox 1955)
	20-40	Bueno	
	40-60	Permisible	

	60-80	Dudoso	
	>80	Inseguro	
RSC	<1,25	Bueno	(Nishanthiny et al., 2010)
	1,25-2,5	Dudoso	
	>2,5	Inadecuado	
RSBC	<5	Satisfactorio	(Sutradhar & Mondal,2021)
	5-10	Marginal	
	>10	Insatisfactorio	
PS	<5	Excelente	(Doneen,1964)
	5-10	Bueno	
	>10	Nocivo	
MH	<50	Adecuado	(Acharya et al., 2018)
	50,00	Inadecuado	
KR	<1	Apropiado	(Acharya et al., 2018)
	1-2	Adecuado	
	>2	Inadecuado	
PI	<80	Clase I	(Doneen,1964)
	80-100	Clase II	
	100-120	Clase III	

**Tabla 3.** Indicador de riesgo en agua subterránea para uso agrícola basados en índices.

Con el fin de minimizar errores se definió la técnica más apropiada, la cual consistió en validación cruzada con la cual se determinó el menor error y representó mejor la naturaleza de los datos, de este modo se identificaron cuáles son las zonas más aptas del acuífero para el uso agrícola y se determinó a partir de la información obtenida, cuáles son las condiciones actuales en cuanto a la calidad.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Caracterización hidroquímica

Se identificaron los posibles procesos hidroquímicos que controlan la calidad y composición química del agua subterránea de la región de Urabá. Con base en las concentraciones medias de los parámetros analizados se determinó que la composición química está dominada por cationes de  $Mg^{2+}$  y  $Na^{+}$  y por aniones de  $HCO_3^{-}$  y  $Cl^{-}$  (Tabla 4).

Parámetros	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Desviación
pH	6,2	8,1	7,1	7,1	0,3
CE	117,0	5330,0	1140,8	936,7	1055,4
TH	42,6	1013,4	239,0	223,1	137,0
$Ca^{2+}$	5,3	123,4	34,1	29,9	20,9
$Mg^{2+}$	5,0	229,4	<b>37,9</b>	31,5	32,8
$Na^{+}$	5,9	1087,2	<b>175,4</b>	150,5	187,7
$K^{+}$	0,6	68,9	6,2	3,0	9,8
$HCO_3^{-}$	104,0	1744,6	<b>618,1</b>	553,7	299,6
$Cl^{-}$	0,5	1263,4	<b>81,9</b>	9,2	243,5
$NO_3^{-}$	0,2	10,1	2,4	2,1	2,0
$SO_4^{2-}$	0,4	549,8	12,1	1,0	68,7
$F^{-}$	0,1	16,2	1,4	0,3	3,0

**Tabla 4.** Estadística descriptiva de los 69 puntos de muestreo del acuífero.

#### 3.2. Análisis de componentes principales

Se tomaron los cuatro primeros componentes principales con valores propios mayores a 1, los cuales explican el 79,5% de la varianza total del conjunto de datos (Tabla 5). El componente principal 1 explica la mayor varianza con un 43,6% y se caracteriza por pesos positivos altos en los cationes  $Na^{+}$  y  $Mg^{2+}$  y en aniones el  $Cl^{-}$ .

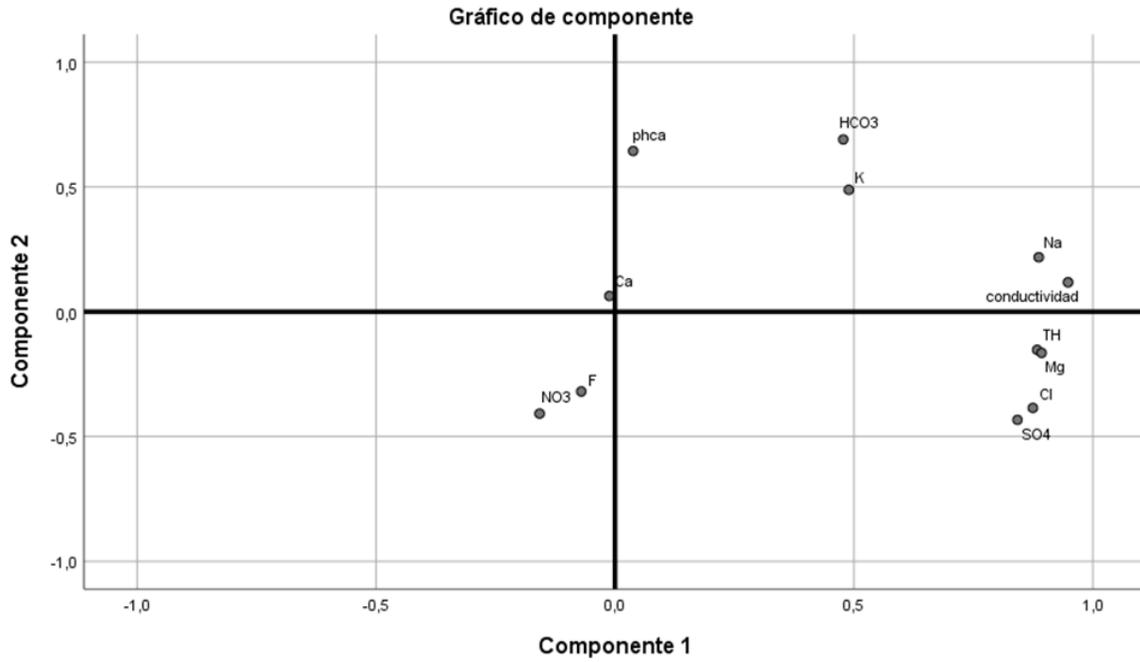
El componente 2 explica el 15,4% de la varianza total y presenta valores negativos en la mitad de los componentes, presentando el valor más alto en los  $HCO_3^{-}$ , el componente 3 explica el 11,2% de la varianza y está dominado por los  $NO_3$ . Por último, el componente principal 4 explica el 9,3% de la varianza y está dominado por el  $Ca^{+}$  (Figura 2).

Parámetro	Componente 1	Componente 2	Componente 3	Componente 4
pH	,007	,348	-,180	,158
CE	,181	,064	,063	-,081
TH	,169	-,083	,025	,259
Ca <sup>2+</sup>	-,002	,034	,221	<b>,777</b>
Mg <sup>2+</sup>	<b>,171</b>	-,089	-,045	,055
Na <sup>+</sup>	<b>,169</b>	,118	,102	-,178
K <sup>+</sup>	,093	,264	,170	-,164
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	,091	<b>,373</b>	,311	-,072
Cl <sup>-</sup>	<b>,167</b>	-,208	-,134	,005
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-,030	-,221	<b>,424</b>	-,329
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>,161</b>	-,234	-,156	,033
F <sup>-</sup>	-,014	-,173	,549	,131
Valor propio	5,234	1,851	1,339	1,117
Varianza (%)	<b>43,618</b>	<b>15,423</b>	<b>11,155</b>	<b>9,306</b>
Acumulado	43,618	59,041	70,196	79,502

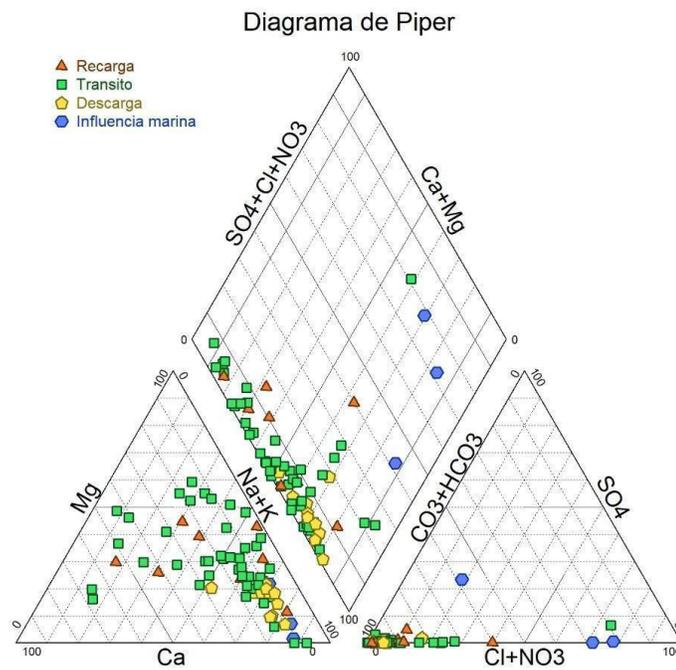
**Tabla 5.** Resultados del Análisis de Componentes Principales y Varianza explicada. En negrilla se resaltan los pesos de las variables (parámetros) mejor representados por cada componente principal.

Con base en el diagrama de Piper (Figura 3) se determinó que según la composición catiónica todas las aguas se subdividen en dos tipos: sódica potásica y magnésica, mientras que la composición aniónica está predominada por iones bicarbonatos, dicho esto se identificó que las muestras que corresponden a la zona de recarga y tránsito se encuentran dispersas en todo el triángulo de cationes, sin embargo, presenta dominancia en el área del tipo sódica, mientras que en el triángulo de aniones el mayor porcentaje están concentradas en el tipo bicarbonatada.

Para el total de las muestras que corresponden a la zona de descarga, ubicadas en la parte izquierda del triángulo de cationes, estas corresponden a la clasificación de tipo sódico; así mismo se puede observar que en el triángulo de los aniones la totalidad de las muestras se encuentran ubicadas en la parte derecha, correspondiendo a aguas de tipo bicarbonatada.

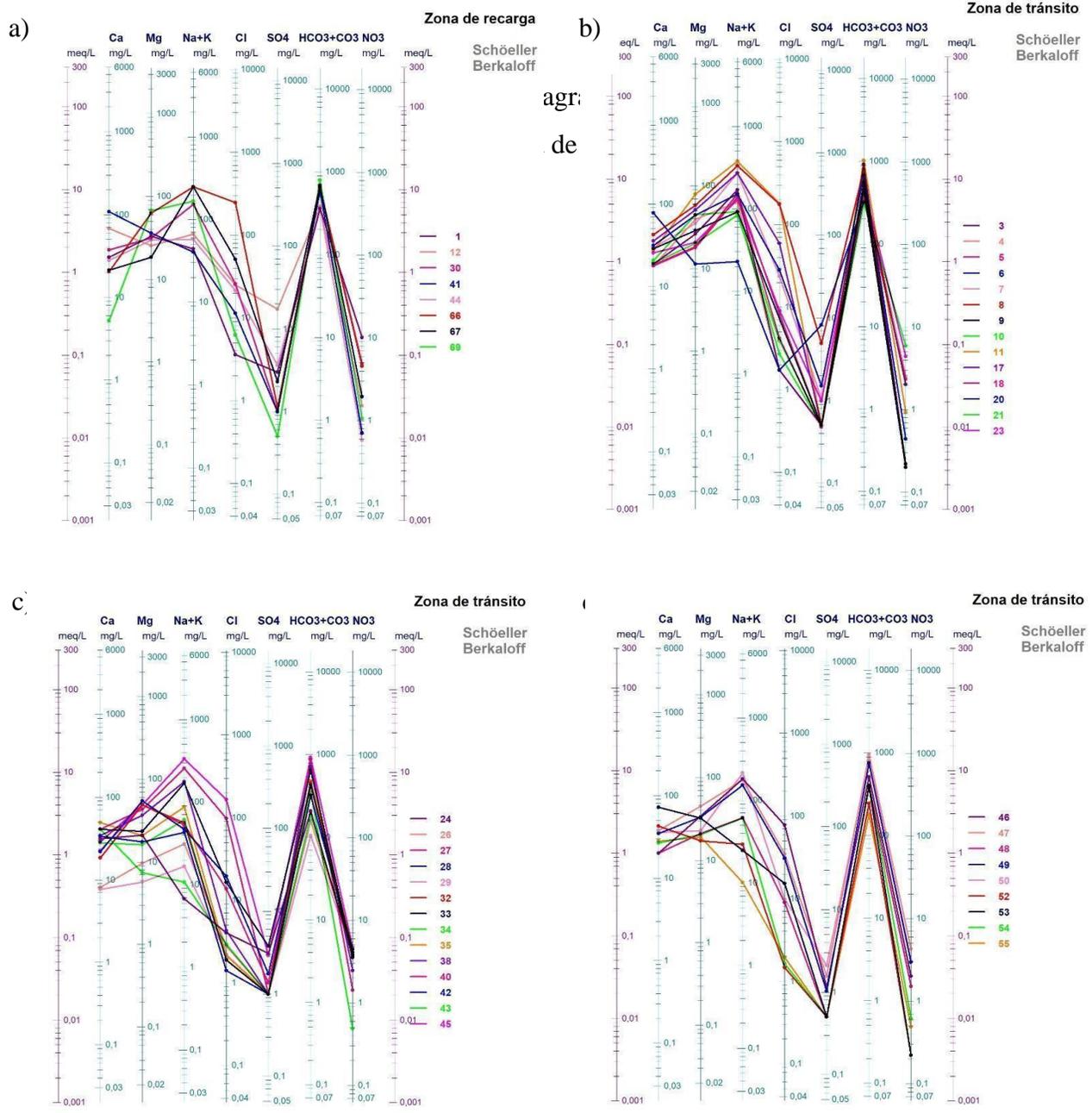


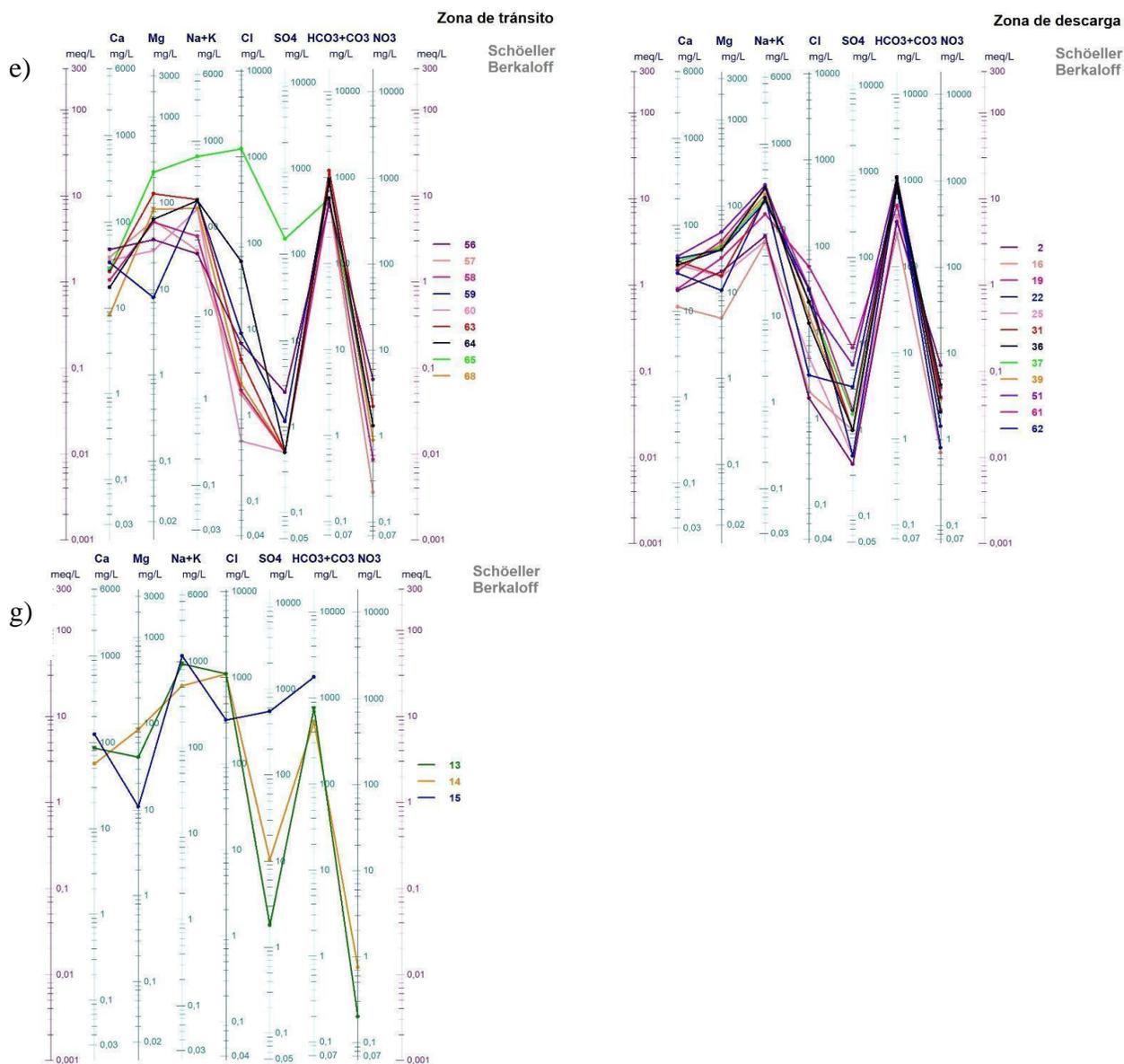
**Figura 2.** Análisis gráfico de los componentes principales y su distribución.



**Figura 3.** Diagrama de Piper con la distribución de los puntos de monitoreo y las zonas del área de estudio.

Dicho lo anterior, se puede definir a través de la ubicación de las muestras que la clasificación del tipo de agua está dominada por la familia bicarbonatadas sódicas seguido de la familia bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, además, se define a través del diagrama que en los triángulos tanto de cationes como aniones el mayor porcentaje de las muestras que corresponden a la zona de influencia marina se encuentran ubicados en la parte izquierda, perteneciendo al tipo sódica y tipo clorurada, lo que ubica estas muestras en la familia de tipo cloruradas y/o sulfatadas sódicas.





**Figura 4.** Diagrama de Schoeller, se interpretan las concentraciones de iones presentes en la zona de estudio.

La gráfica que corresponde a la zona de recarga presenta las concentraciones más bajas, las cuales corresponden a  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{CO}_3^{3-}$  por otra parte, hay predominancia por los iones  $\text{Na}^{2+}\text{K}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$ ; las figuras b, c, d y e corresponden a la zona de tránsito, el análisis en esta zona se comportó similar a la anterior, presentando las mismas condiciones en las figura b, c y d, exceptuando la figura e, en la cual se observó que los iones con mayor predominancia corresponden al Mg,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$  sin embargo no hubo variación en los iones con menor concentración ya que estos también corresponden a  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{CO}_3^{3-}$ , por otra parte las figuras f

y g que corresponden a zona de descarga y zona de influencia marina presentan el mismo comportamiento que la zona de recarga, con las concentraciones más bajas en los iones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{CO}_3^{3-}$  y las concentraciones más altas en los iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ .

### 3.3. Índice de calidad de agua para consumo humano

Los datos fisicoquímicos obtenidos fueron comparados con las concentraciones máximas permisibles del agua para consumo humano, las cuales están señaladas en la resolución 2115 de 2007 (Tabla 6), en la que se decretan los límites y criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso, lo que a su vez permite establecer cómo el exceso de algunas concentraciones afecta la salud humana.

<b>Parámetro</b>	<b>Estándar</b>	<b>Unidades</b>	<b>% de muestras que superan el límite permisible</b>	<b>Efectos en la salud humana</b>
pH	6,5-9,0	Unidades de pH	0	Irritación en la piel y los ojos, irritación en la piel.
CE	1000	$\mu\text{S}/\text{cm}$	44	Desordenes gastrointestinales
TH	300	mg/L	18	Problemas en el estómago y riñones.
$\text{Ca}^{2+}$	60	mg/L	8	Cálculos renales, problemas en el corazón y el cerebro.
$\text{Mg}^{2+}$	36	mg/L	37	Hipermagnesemia.
$\text{Na}^+$	150	mg/L	52	Hipertensión.
K	12	mg/L	15	Hiperpotasemia.
$\text{HCO}_3^-$	500	mg/L	91	Acidosis metabólica y acidosis respiratoria
$\text{Cl}^-$	250	mg/L	5	Dermatitis, enfermedades del corazón, asma.
$\text{NO}_3^-$	10	mg/L	1	Metahemoglobina.
$\text{SO}_4^{2-}$	250	mg/L	1	Efecto laxante.

F <sup>-</sup>	1	mg/L	23	Fluorosis dental.
----------------	---	------	----	-------------------

**Tabla 6.** Estándares de los parámetros fisicoquímicos para consumo humano y su impacto en la salud humana (Sutradhar & Mondal, 2021).

A partir de estas concentraciones se analizó el WQI y se determinó la calidad del agua con base en cinco clases diferentes establecidas por Raychaudhuri *et al* (2014), estas corresponden a excelente, buena, pobre, muy pobre e inadecuada.

La distribución de las muestras de acuerdo con la calidad del recurso, se distribuyen de la siguiente manera: el 13% cuentan con una excelente calidad, un 47,8% cuentan con calidad buena, seguido de una calidad pobre para un 33,3%, un 4,3% es muy pobre a este nivel, y el 1,4% resulta inadecuada (Tabla 7). Luego de analizar el WQI se realizó el mapeo espacial utilizando el software ArcGIS 10.7 en el cual se limitan las zonas de buena calidad para consumo humano (Figura 5).

Valores WQI	Calidad de agua	% de muestras de agua
<50	Excelente	13,0434783
50-100	Bueno	47,826087
101-200	Pobre	33,3333333
200-300	Muy pobre	4,34782609
>300	Inadecuada	1,44927536

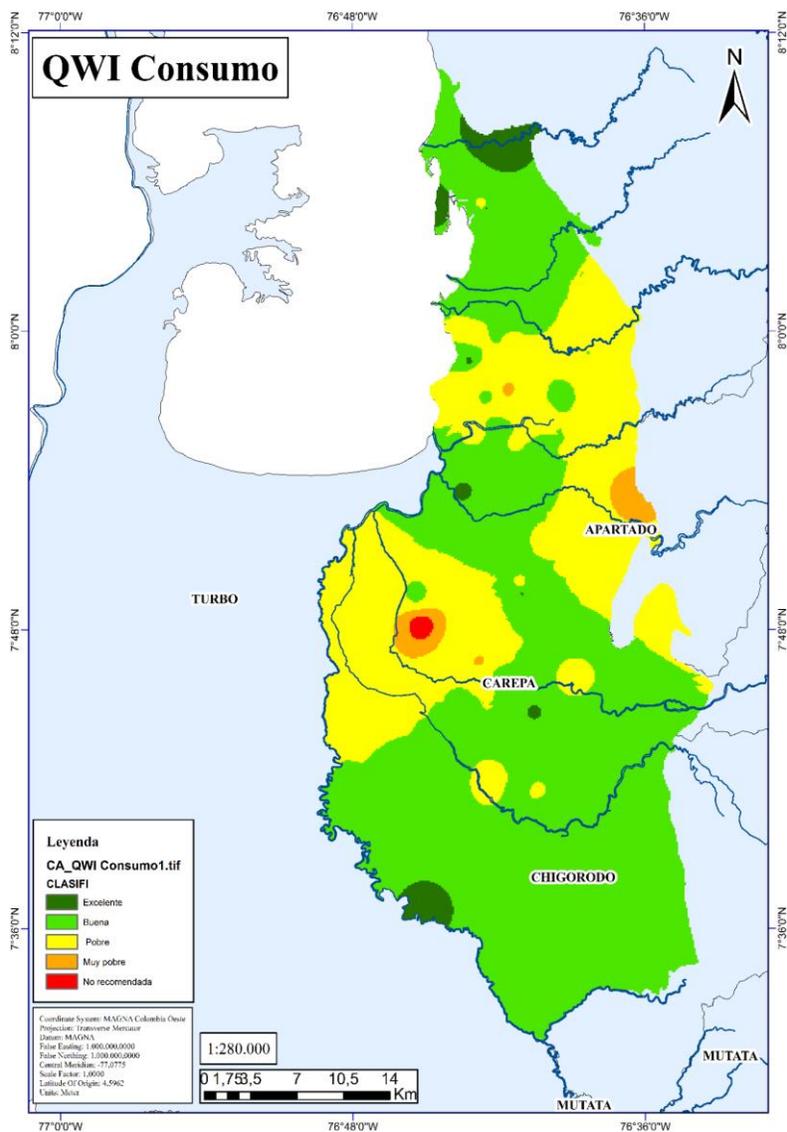
**Tabla 7.** Clasificación del WQI para consumo humano (Raychaudhuri et al., 2014).

La figura 5 muestra que el 47,8% del área de estudio presenta buena calidad, presentando dominancia en la parte norte y sur del área, por otra parte, se analiza que la calidad pobre también tiene dominancia en la zona y se ubica en los márgenes orientales y occidentales.

### 3.4. Índices de calidad para agua de riego.

La calidad del agua para riego puede afectar la fertilidad y productividad del suelo, siendo así, se consideró un índice general WQI que permitió determinar la calidad y la restricción del agua para riego de la zona mediante clasificaciones, estas se dividieron en cuatro categorías de acuerdo con la restricción que pueda presentar (Tabla 8), a través de estas clasificaciones se realizó el análisis de los índices y se determinó que la mayoría de las muestras analizadas (82,6%) no requieren restricción para el uso agrícola. Por otra parte, la calidad del agua se evaluó críticamente por medio de otros indicadores, los cuales fueron clasificados en categorías dependiendo del índice (Figura 6).

En la figura 6 se observa que la calidad del recurso que no requiere restricción se encuentra distribuida desde la zona norte central a la zona sur, no obstante, en esta se encuentran algunos puntos de monitoreo que, si requieren restricción leve, por otra parte, se puede analizar que cerca del 5% del recurso del área requiere restricción severa, esta calidad se encuentra centrada en la zona norte que limita con el litoral del mar Caribe.

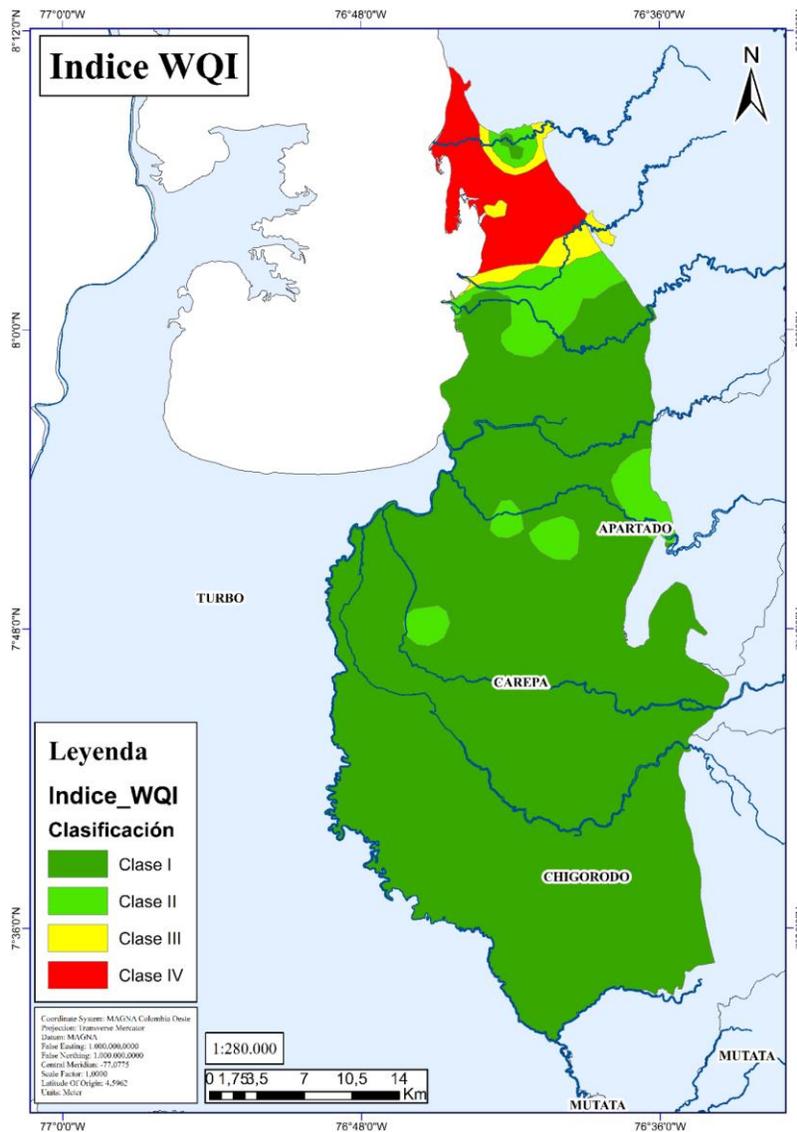


**Figura 5.** Mapa del índice de calidad WQI para consumo humano, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación.

Valores WQI	Clase	Restricción	% de muestras de agua
<150	I	Ninguna	82,6086957
150-300	II	Leve	10,1449275

301-450	III	Moderada	2,89855072
>450	IV	Severa	4,34782609

**Tabla 8.** Categorías del índice de calidad de agua para riego con relación a el tipo de restricción que requiere para su uso.



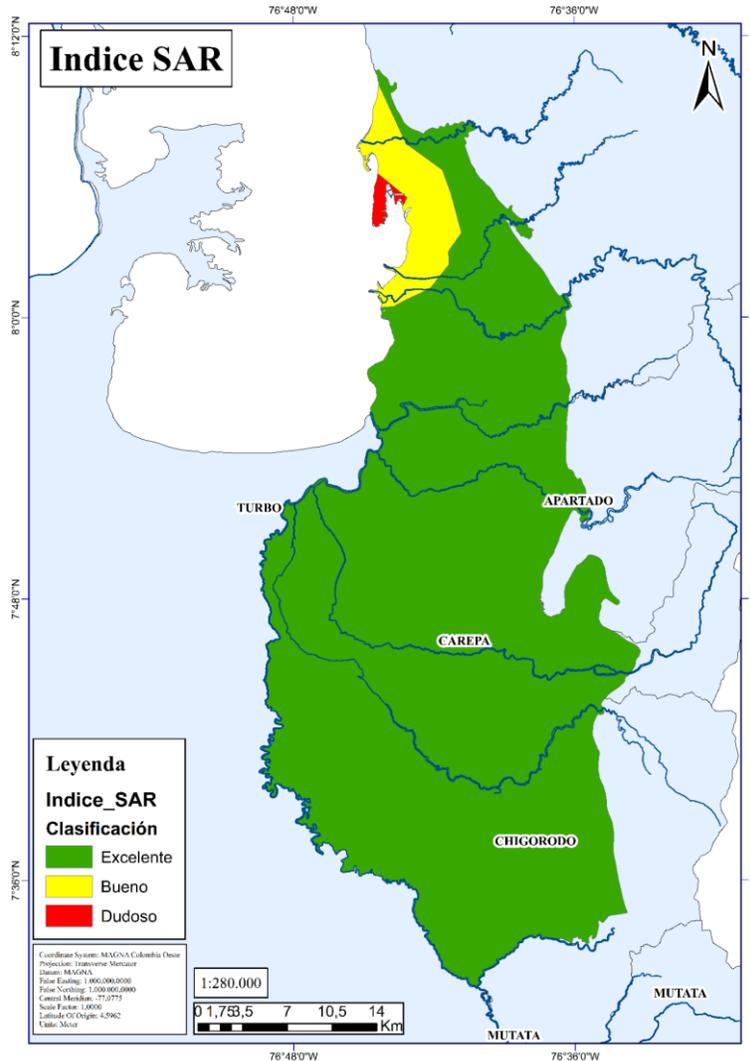
**Figura 6.** Mapa del índice de calidad WQI para riego, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación.

### 3.5. Relación de absorción de sodio (SAR)

La aplicación del índice de Relación de absorción de sodio se representa en la figura 7, a partir de este se estableció que el 94,2% del total de las muestras tienen una calidad excelente,

la cual se extiende desde la zona oriental hasta la zona baja occidental y el sur. De otra parte, se presenta un 1,4% con una calidad buena, un 4,3% clasificado como de calidad dudosa que se encuentran en el sector norte, el cual tiene influencia del litoral del mar Caribe y un 0% para una calidad inadecuada, esta información se relaciona en la tabla 9.

De otra parte, el diagrama de salinidad se puede observar en la figura 8, este se encuentra trazado en categorías (Allison & Richards 1954), es así como la primera categoría C1S1 representa un tipo de agua adecuado para usarse en todo tipo de suelos, en el diagrama se puede observar que en esta categoría se ubican tres puntos de muestreo los cuales corresponden a un punto en zona de recarga y dos puntos de la zona de tránsito; la segunda categoría C2S1 presenta aguas con concentraciones bajas de sodio lo que indica que el tipo de cultivo en el cual se utilice esta agua debe presentar tolerancia media a la salinidad.



**Figura 7.** Mapa del índice de calidad SAR, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación.

Mediante el diagrama también se puede determinar que el tipo de cultivo que debe usarse en las categorías C3S2 o superiores debe corresponder a cultivos con alta tolerancia a la sal y en suelos de textura gruesa con buena permeabilidad.

Índices			
	94,2028986		8,695652174
	1,449275362		15,94202899
	4,347826087		28,98550725
SAR	0	Na%	37,68115942
			8,695652174
	14,49275362		26,08695652
	14,49275362		36,23188406
RSC	71,01449275	RSCB	37,68115942
	89,85507246		27,53623188
	4,347826087		72,46376812
PS	5,797101449	MH	
	37,68115942		30,43478261
	31,88405797		50,72463768
KR	30,43478261	PI	14,49275362

**Tabla 9.** Análisis de los índices de calidad de agua subterránea.

### 3.6. Riesgo de Sodio (Na%)

Las aguas subterráneas para riego se han clasificado en función del porcentaje de sodio y conductividad eléctrica, que está representada en el diagrama de Wilcox (Figura 9) en el cual se identifican cinco clasificaciones (Excelente, buena, admisible, mediocre y mala).

La mayoría de las muestras se encuentran presentes en las tres primeras categorías que corresponden a excelente, buena y admisible, de otra parte se observó que sólo cuatro

muestras se encontraron en la clasificación que corresponde a una mala calidad del agua, estas muestras corresponden a puntos de monitoreo que presentaban influencia marina y un punto de la zona de tránsito, indicando altos niveles de sodio.

La interpretación numérica de los datos arrojó como resultado que un 8,6% de las muestras presentó calidad excelente, un 15,9% corresponde a una calidad buena, el 28,9% a admisible, un 37,6 indica que es dudosa y finalmente, el 8,6% de ellas se clasifica como de insegura (Tabla 9).

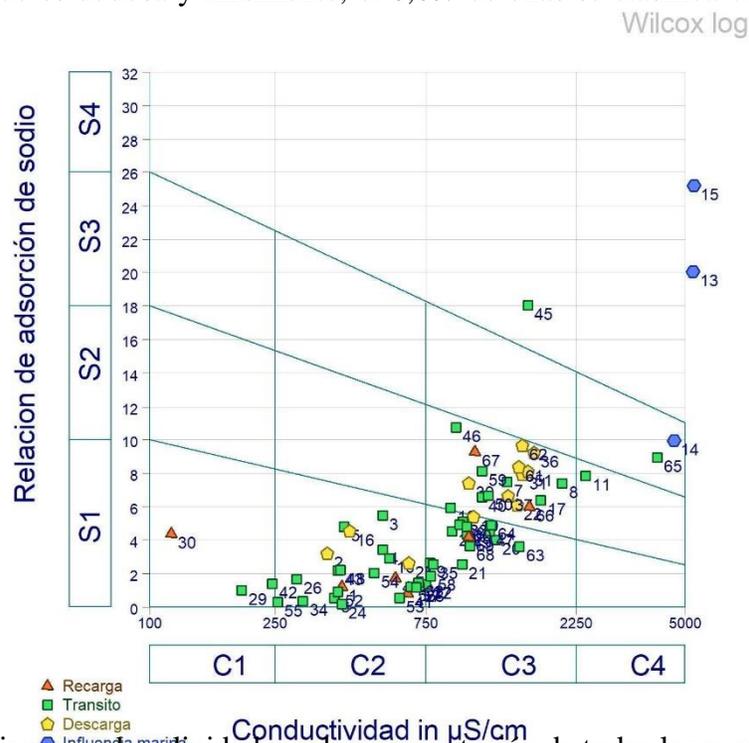
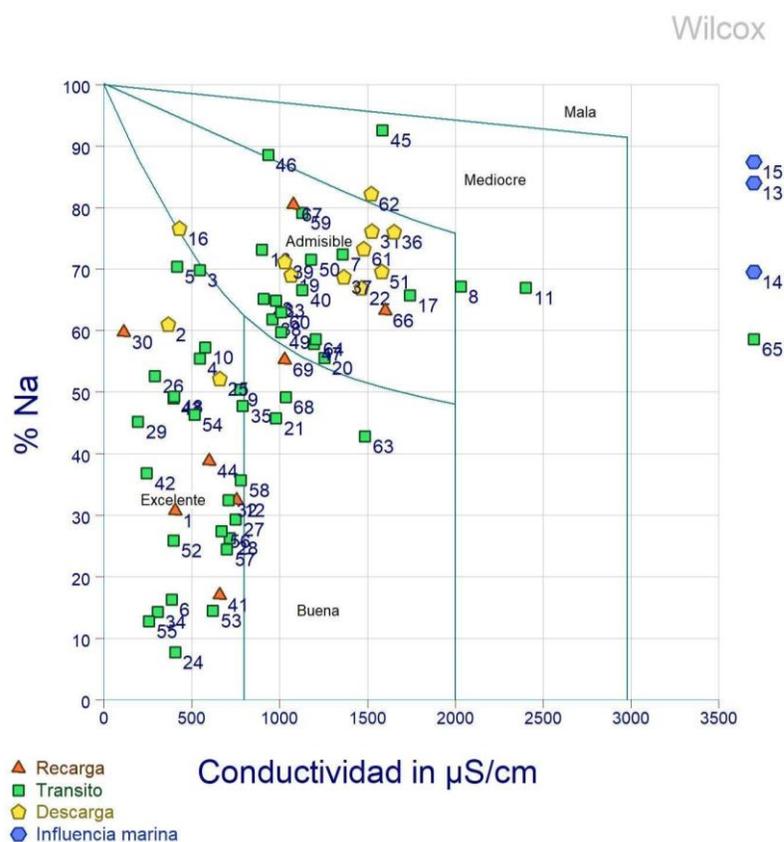
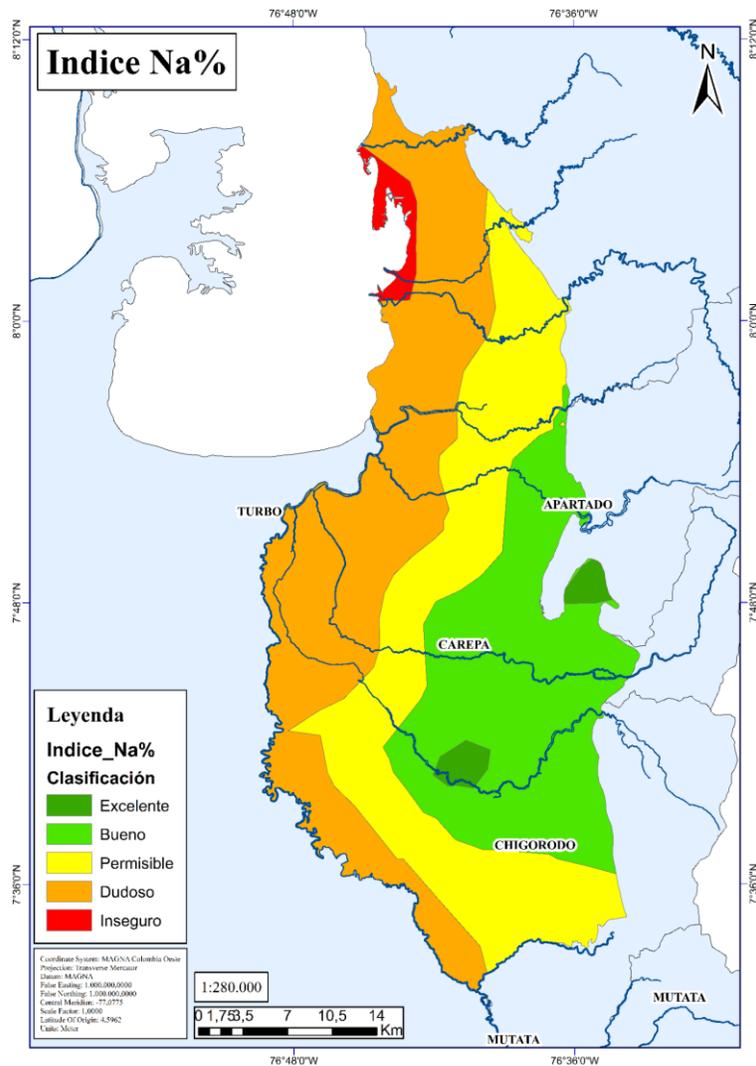


Figura 8. Diagrama de salinidad con la representación de todos los puntos de muestreo.



**Figura 9.** Diagrama de Wilcoxon con representación de los puntos de muestreo.

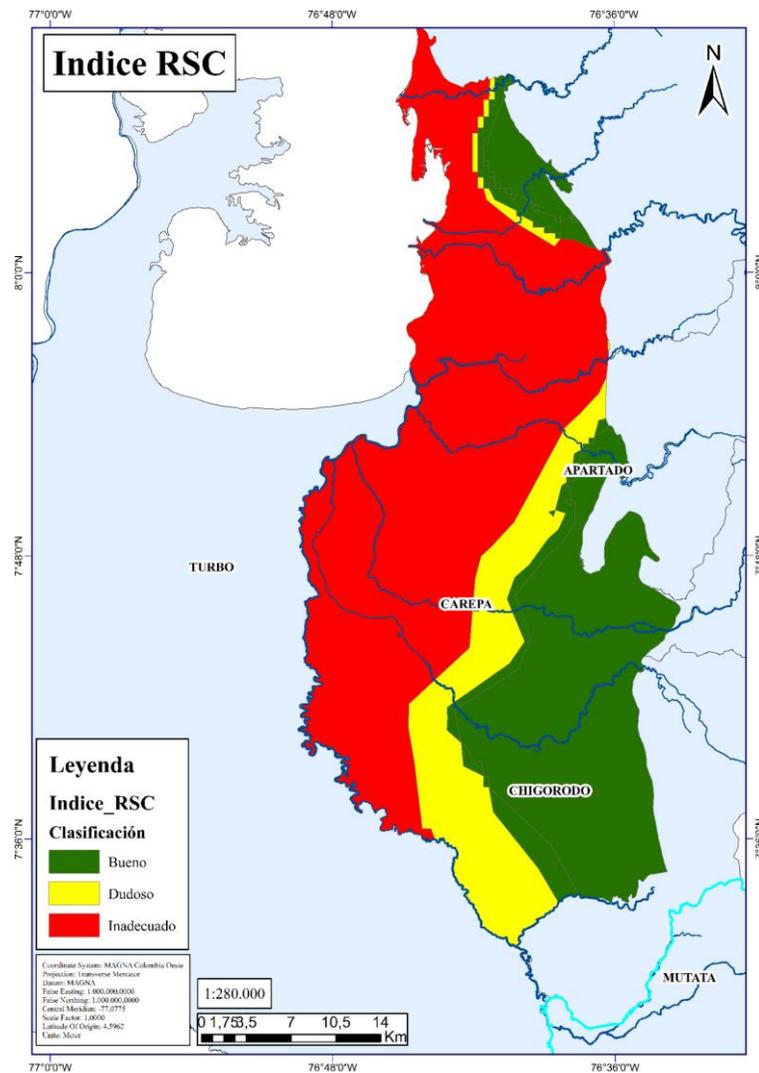
Las condiciones admisibles predominaron en la mayoría de puntos de monitoreo, lo cual se observa en el mapa, en el que se determinan las clasificaciones (Figura 10), y a partir del mismo se pudo interpretar que se presenta una clara sectorización de acuerdo con la calidad. Es así como la calidad excelente y buena se limitó a la zona del oriente central, mientras que las calidades permisibles y dudosas tuvieron dominancia desde la zona norte hasta la zona sur; también se puede identificar que la calidad insegura se limita a una pequeña zona de norte.



**Figura 10.** Mapa del índice de calidad Na%, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación.

### 3.7. Carbonato de sodio residual (RSC)

El índice RSC reflejó de acuerdo con su contenido que el 14,4% de los puntos presentaron condiciones buenas, un 14,4% dudosas y el mayor porcentaje, correspondiente al 71% presentó condiciones inadecuadas (Tabla 9), indicando que la mayoría del agua del área de estudio presenta concentraciones elevadas de bicarbonato como se puede observar en la figura 11, en la que se evidencia una clara dominancia por calidades inseguras que se extienden desde la zona norte, cubriendo casi en su totalidad el costado occidental.

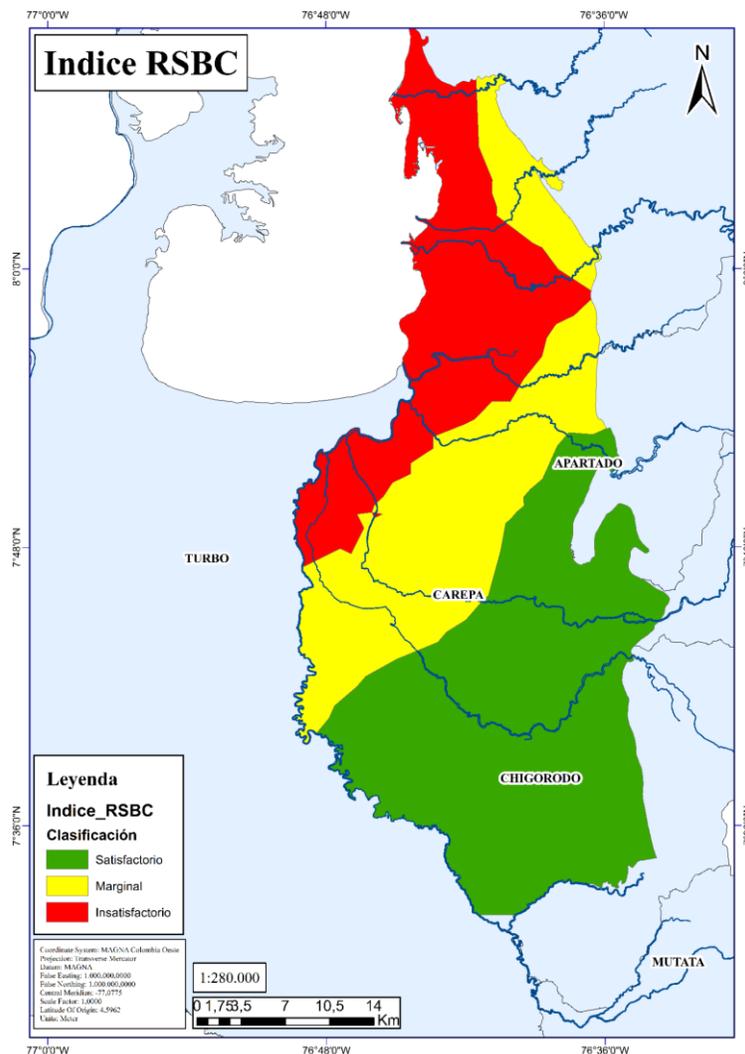


**Figura 11.** Mapa del índice de calidad RSC, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación.

### 3.8. Bicarbonato de sodio residual (RSBC)

A través del índice de Bicarbonato de sodio residual se pudo evidenciar que el agua subterránea del área de estudio no presentó condiciones adecuadas para uso de riego (Tabla 9), pues solo un 26% de las muestras registró condiciones satisfactorias, mientras que el 37,6% de ellas estuvo dominado por aguas con calidad inadecuada.

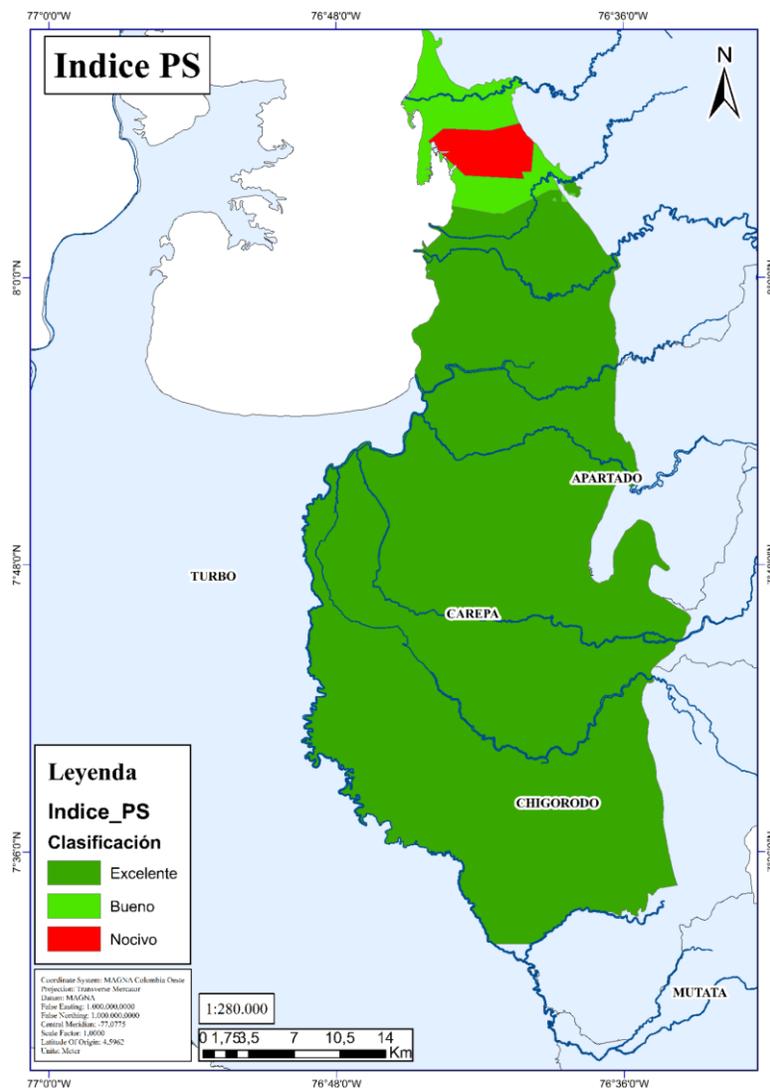
En la figura 12 se observa la dominancia en la zona de una calidad insatisfactoria en gran porcentaje de la zona norte y occidental, mientras que la calidad excelente se concentró en la zona sur oriente.



**Figura 12.** Mapa del índice de calidad RSBC, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación.

### 3.9. Salinidad potencial (SP)

El índice SP señala que el 89,8% de las muestras analizadas presentaron una excelente calidad, el 4,3% corresponde a una calidad buena, mientras que el 5,7% es clasificada en una calidad nociva (Tabla 9); esto indica que los niveles de sal presentes en el agua fueron bajos, lo que a su vez se relaciona con que el agua de la zona presenta buenas condiciones para el uso agrícola, tal y como se puede observar en la figura 13, evidenciando como la calidad excelente se extiende por aproximadamente el 90% del área de estudio, la cual abarca la zona occidental hasta la zona sur, limitando así la calidad nociva a un pequeño sector de la zona norte.

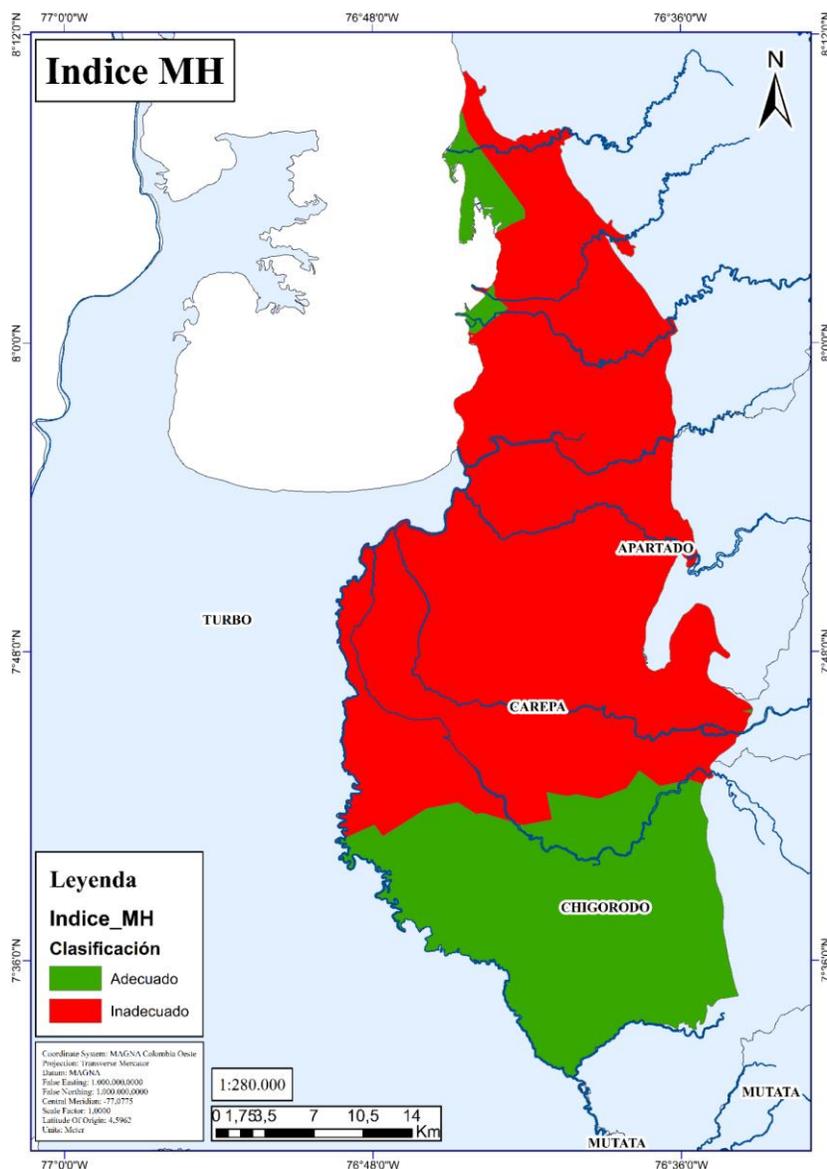


**Figura 13.** Mapa del índice de calidad PS, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación.

### 3.10. Peligro de magnesio (MH)

El índice reflejó que para el 27,5% de las muestras la condición del agua resultó adecuada para el uso de riego, mientras que el mayor porcentaje 72,4% presentó una calidad inadecuada para este fin (Tabla 9).

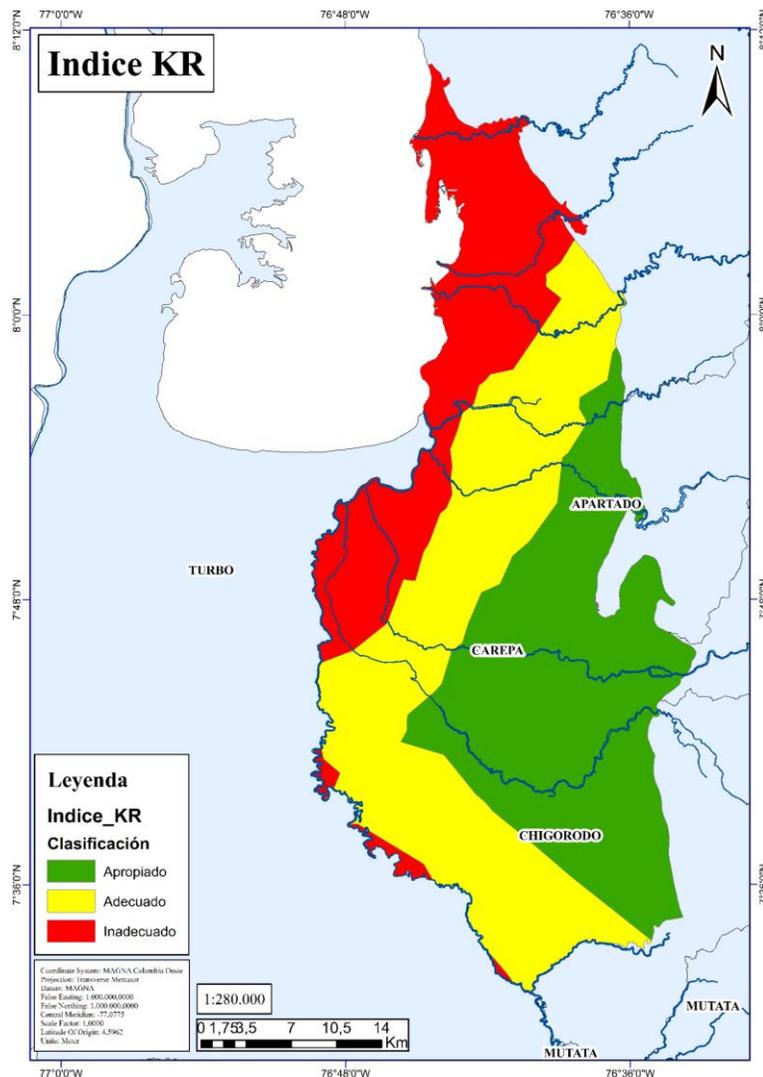
Lo anterior se traduce en altas concentraciones de  $Mg^{+}$  tal y como se observa en la figura 14, en la que es evidente la dominancia en el acuífero de una calidad inadecuada que se extiende desde la zona oriental hasta la zona del sur central. De otra parte, la calidad adecuada se limita en gran proporción a la zona sur, que limita con el río León.



**Figura 14.** Mapa del índice de calidad MH, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación.

### 3.11. Relación de Kelley (KR)

Los resultados obtenidos al aplicar este índice indican que el 37,6% de las muestras analizadas presentaron una calidad de agua excelente, un 31,8% correspondió a una calidad adecuada, mientras que el restante 30,4% correspondió a una calidad inadecuada (Tabla 9). En la figura 15 se puede observar como la calidad excelente se limita a la zona oriental, mientras que la calidad inadecuada se extiende desde el norte, cubriendo casi en su totalidad el costado occidental.

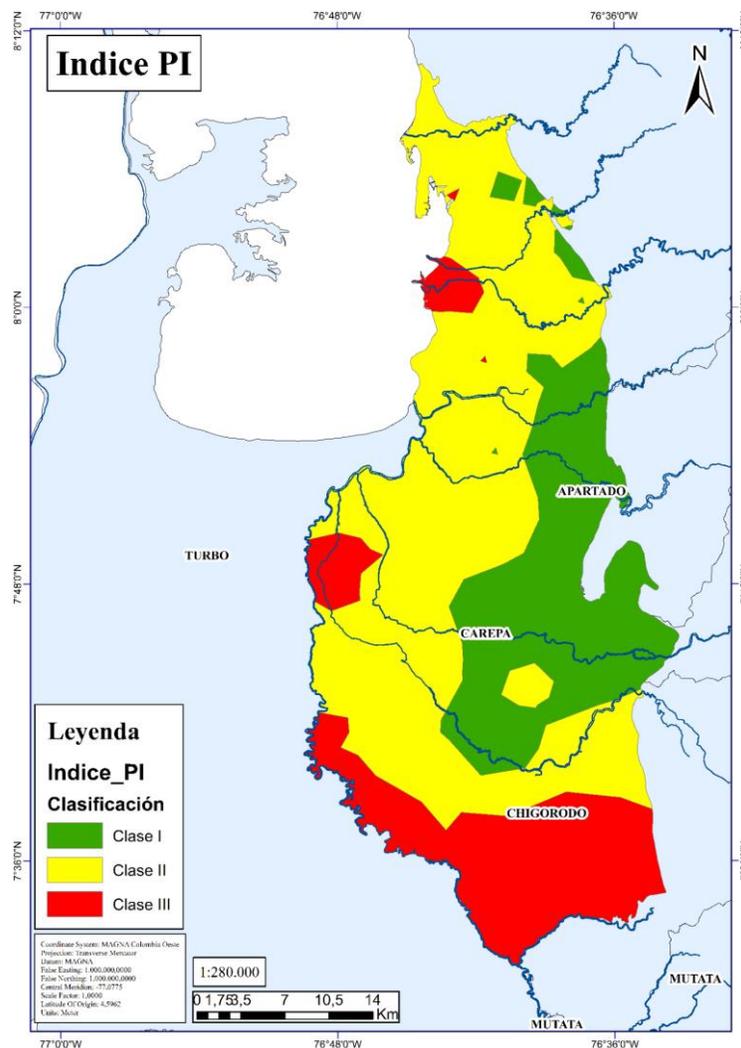


**Figura 15.** Mapa del índice de calidad KR, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación.

### 3.12. Índice de permeabilidad (PI)

De acuerdo con el índice de permeabilidad, el 30% de las muestras analizadas fueron identificadas como clase I que indica que estas son apropiadas para el riego; un 50,7% de las muestras fueron clasificadas en la clase II, siendo ligeramente apropiadas para el riego y en menor proporción, con un 14,4% en clase III, correspondientes a aguas no aptas para el riego (Tabla 9).

En la figura 16 se representa la clasificación a partir de este índice, es así como en la misma se evidencia que la clasificación III se encuentra en pequeñas proporciones en la zona norte y en el sector centro occidental, sin embargo, no presenta dominancia y se limita en gran proporción a la zona sur, por otra parte, la calidad de clase II tiene mayor extensión y tiene presencia desde la zona norte hasta la zona sur central, además, se observa que la calidad excelente está limitada a la zona oriental del área.



**Figura 16.** Mapa del índice de calidad PI, con sectorizaciones de acuerdo con su clasificación.

#### 4. DISCUSIÓN

Las aguas del tipo bicarbonatada sódica corresponden a aguas más mineralizadas, se encuentran asociadas a pozos profundos y presentan esta composición debido al tiempo de contacto que tiene el agua con el material del acuífero, este tipo de agua se encuentra ubicada en su mayoría en depósitos de llanura aluvial, en los cuales se presentan procesos de disolución de silicatos; por otra parte, el tipo de agua bicarbonatada cálcica y/o magnésica corresponde en su mayoría a pozos poco profundos y se encuentran asociadas a depósitos Cuaternarios (Malagón-Navarro 2017; Moralez *et al.*, 2009).

El análisis estadístico adelantado a través del ACP determinó que hay alta dominancia de iones de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , los cuales pueden estar asociados a procesos de alteración de silicatos presentes en la zona y procesos de intercambio iónico (Besoain, 1985), de otra parte, se pudo identificar que la zona presenta concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  las cuales, según lo indicado por Madrigal-Solís *et al* (2017) reflejan la influencia de los fertilizantes y el uso de suelo predominantemente agrícola y urbano.

El análisis del índice general para consumo humano empleado en el presente trabajo permitió identificar cuáles son los parámetros que representan mayor importancia en la zona de estudio y cómo afectan la hidroquímica del agua tanto positiva como negativamente indicando a su vez el impacto que estos generan en la salud humana tras su consumo.

El pH resulta ser un parámetro muy importante de la calidad del agua, según Pérez-López (2016) mide la acidez y/o alcalinidad que esta presenta, y dependiendo de su concentración puede afectar negativamente la salud humana. El pH en las aguas varía dependiendo de su naturaleza y puede ser afectada artificialmente, Whelton *et al* (2017) y Zamora (2009) describen este parámetro como uno de los más importantes para determinar la calidad del agua, por lo cual se recomienda que sus valores oscilan entre 6,5 y un máximo admisible de 8,5.

De otra parte, la conductividad eléctrica (CE) determinada para el agua del área de estudio indica que el 66% de las muestras se encuentran dentro del rango aceptable y oscilan entre los 117 y 981  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; Etim *et al* (2013) describen la CE como la medida de la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica. De otra parte Cantillo & Corpus (2018) indican que este es un parámetro relacionado con la cantidad de sales o minerales disueltos en el agua, de modo que, se pueden encontrar concentraciones cercanas a 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en cuerpos de agua naturales. Así mismo, Rodríguez *et al* (2010) señalan que este parámetro está condicionado por las precipitaciones, el uso del suelo y sus modificaciones, así como los focos de contaminación presentes en el área.

La CE aumenta en sentido a las líneas de flujo, es decir, la zona de recarga presenta menor conductividad en comparación a la zona que tiene influencia marina, llegándose a determinar valores de hasta 5400  $\text{uS}/\text{cm}$  en comparación con la mayoría de valores de la zona de recarga, tránsito y descarga que oscilaron entre 120 y 1000  $\text{uS}/\text{cm}$ ; estas variaciones se deben a que en el tránsito del agua éstas empiezan a sufrir un proceso de mineralización, lo que genera un aumento en la conductividad, dicho esto se puede identificar que el 44% de las muestras analizadas en el área, presentan alteraciones en la química natural del agua ya sea por la naturaleza del terreno o por el uso que se le atribuye a este.

En cuanto a la dureza total, esta es descrita como la suma de las durezas individuales debidas a los iones de  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Mg}^+$ , y es expresada como  $\text{mg}/\text{L}$  de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) de acuerdo con Reyes-Tineo (2019); en aguas de consumo humano las altas concentraciones de estos iones indican efectos negativos en la salud humana, principalmente a las vías urinarias, teniendo como consecuencia un incremento en los casos de litiasis urinaria; una persona puede tolerar una concentración máxima de 500  $\text{mg}/\text{L}$  de  $\text{CaCO}_3$  como dureza (Reyes-Tineo, 2019), razón por la cual se establecen límites de calidad de acuerdo con el uso del recurso, por ello la normativa colombiana (Resolución 2115 de 2007) establece que el límite máximo para la dureza es de 300  $\text{mg}/\text{L}$  (Corredor & Ramírez, 2015), indicando a partir del análisis realizado que el 18% de las muestras sobrepasan este límite.

Pese a que la mayoría de sitios evaluados no sobrepasan para el acuífero el límite establecido en cuanto a dureza total, el agua presenta una naturaleza dura, pues el 66,7% de las muestras superan la concentración de 180  $\text{mg}/\text{L}$ , nivel que de acuerdo con Gálvez-Ayala (2021) no influye significativamente en la salud renal, no obstante, se recomienda tener medidas para prevenir los daños en la salud.

Por otra parte, el calcio actúa como cofactor en muchas reacciones enzimáticas, interviene en el metabolismo del glicógeno y regula la contracción muscular, sin embargo, este mineral no se encuentra libre en la naturaleza y por lo general, se encuentra en las rocas como  $\text{CaCO}_3$  (Zamora 2009), constituyendo un nutriente esencial y necesario para el organismo, pese a ello, es importante considerar que el consumo excesivo puede generar incrementos en la presión sanguínea, fallas cardíacas y enfermedades renales (Caballero, 2011). En este

contexto, los análisis realizados determinaron que las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  obtenidas en la zona representan en su mayoría una calidad aceptable, ya que solo el 8% de las muestras superaron el límite máximo permisible el cual, según Cárdenas-López & Romero-Perdomo (2017) corresponde a 60 mg/L, indicando que en términos generales la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  en la zona es baja.

Respecto al magnesio, Pérez-López (2014) indica que las concentraciones para el consumo de este mineral están establecidas en la Resolución 2115 de 2007 de la normativa colombiana, y corresponde a 36 mg/L, dicho esto, se identificó que el 37% de las muestras analizadas sobrepasan el límite establecido con concentraciones que variaron entre 37 y 230 mg/L, de las cuales el mayor porcentaje corresponde a las muestras analizadas en la zona de tránsito mientras que, las zonas de recarga, descarga e influencia marina presentaron concentraciones más bajas que oscilaron entre los 3,9 y 36 mg/L. Dicho esto, se analizó según lo descrito Comino *et al* (2009) que este ion en exceso puede ocasionar alteraciones en la piel y/o cabello e incluso generar anomalías en el sistema nervioso o provocar varios tipos de cáncer, sin embargo, Montoya Chávez (2021) determinó a través de la OMS que el agua debería contener un mínimo de entre 25-50 mg/L de  $\text{Mg}^{2+}$  para prevenir enfermedades como la osteoporosis o eventos cardiovasculares.

Rout & Sharma (2011) indican que las concentraciones elevadas de  $\text{Na}^+$  en el agua para consumo humano pueden causar problemas cardíacos, por lo cual se establecen límites máximos, que de acuerdo con la normativa colombiana corresponde a 150 mg/L. El contenido de  $\text{Na}^+$  en el área de estudio registró una variación de 5,8 a 1087 mg/L, es así como el 52% de las muestras superaron el límite máximo permisible prescrito, indicando que las concentraciones de  $\text{Na}^+$  son muy elevadas y por tanto, el agua del acuífero no presenta las condiciones adecuadas para el consumo humano. De acuerdo con lo descrito en un estudio realizado por Espinoza *et al* (2017) las concentraciones de  $\text{Na}^+$  de más de 50 mg/l hace que el agua no sea apta para uso doméstico sin que se realice un tratamiento previo.

Con respecto al  $\text{K}^+$ , este es un elemento esencial para los seres vivos y procede de la alimentación, principalmente de la vegetación, según lo descrito por Deshpande & Aher (2012) las principales fuentes de  $\text{K}^+$  en el agua subterránea incluyen agua de lluvia, meteorización de minerales de silicato potásico, uso de fertilizantes potásicos y uso de agua superficial para riego. Rout & Sharma (2011) indican que el  $\text{K}^+$  es un catión importante y juega un papel vital en el metabolismo, sin embargo, la ingestión de cantidades excesivas puede resultar perjudicial para los seres humanos. Los criterios de la Resolución 2115 de 2007 determinan que los contenidos de  $\text{K}^+$  deben estar en concentraciones menores a 12 mg/L, premisa que se cumple en el 84% de las muestras analizadas, indicando que el área de estudio presenta condiciones aceptables.

Para el bicarbonato, se sabe que en las aguas subterráneas procede de las capas superiores del suelo, formados por la reacción de dióxido de carbono con agua en rocas carbonatadas y la interacción roca-acuífero (Vogel & Ehhalt, 1963). Garbagnati *et al* (2005) describen que este valor puede llegar a 600 mg/L, no obstante, de acuerdo con Khosravi *et al* (2017), el valor de los bicarbonatos recomendable por la OMS corresponde a 500 mg/L, indicando que el 62% de las muestras del acuífero de estudio sobrepasan el límite establecido, por tanto, la alcalinidad del agua es elevada y puede generar problemas en la salud humana asociados al consumo de esta.

En cuanto al cloruro, este es un anión que se encuentra en las aguas subterráneas y sus concentraciones fluctúan dependiendo de las condiciones del área. Este se puede encontrar naturalmente en las aguas subterráneas y puede tener su origen en diversas fuentes, como la meteorización, lixiviación de rocas sedimentarias e infiltración de agua de mar (Rout & Sharma, 2011). Este parámetro actúa como indicador de la calidad del agua subterránea y su concentración aumenta si se mezcla con aguas servidas o agua con influencia marina (Deshpande & Aher, 2012).

En Colombia, las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  no deben exceder los 250 mg/L de acuerdo con lo establecido en la normativa nacional (Muñoz-Guerrero, 2016), partiendo de esta referencia los resultados obtenidos indican que el 5,7% de las muestras presentaron valores mayores superiores a los establecidos, y estos corresponden a las muestras que tienen influencia marina, no obstante también se encontraron altas concentraciones en algunos puntos de monitoreo correspondientes a la zona de tránsito, indicando que la intrusión salina se limita en gran porcentaje a las muestras cercanas a la costa.

Altas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  generalmente se encuentran en el agua en zonas rurales por la descomposición de la materia orgánica y los fertilizantes (Hidalgo-Castro, 2020), este compuesto se encuentra raramente en el agua subterránea como resultado de la disolución de rocas o por la oxidación bacteriana de materia orgánica, indicando que se presenta en mayor medida debido a la contaminación antropogénica (Miguel-Fernández & Vázquez-Taset, 2006).

Miguel-Fernández & Vázquez-Taset (2006) indican que la concentración de  $\text{NO}_3^-$  en aguas subterráneas no contaminadas raramente excede los 10 mg/L, concentración establecida en la normativa colombiana, en la que corresponde al máximo permisible; en este sentido se pudo determinar que los niveles de contaminación de la zona de estudio son bajos, ya que solo el 1,0% de las muestras analizadas presentaron concentraciones superiores a lo establecido en la normativa, muestra que corresponde a la zona de recarga, por otra parte los análisis presentaron valores muy bajos que oscilaron entre los 0,2 y 7,2 mg/L.

El azufre de acuerdo con Muñoz-Guerrero (2016), es un ion que se libera al agua a través de residuos industriales y mediante precipitación desde la atmósfera; no obstante, las concentraciones más altas suelen encontrarse en aguas subterráneas y provienen de fuentes naturales. En aguas naturales no contaminadas, comúnmente las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  disuelto varían de 2,0 mg/L a 80,0 mg/L  $\text{SO}_4^{2-}$  (Beita-Sandí & Barahona-Palomo, 2011), no obstante, Villegas Yepes (2013) describe que el acuífero de la zona se encuentra en condiciones reductoras, lo que genera una disminución en la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$ .

De acuerdo con la OMS, las fuentes de agua para consumo humano no deben rebasar los 500 mg/L, de ahí que en Colombia el nivel máximo para este ion de acuerdo con la normativa vigente equivale a 250 mg/L (Muñoz-Guerrero, 2016), por tanto, el área de estudio presenta buenas condiciones para el consumo ya que solo el 1,0% presenta valores superiores a lo establecido en una muestra correspondiente a un punto de monitoreo de la zona de influencia marina, de modo que, se puede determinar que la contaminación por  $\text{SO}_4^{2-}$  es mínima.

El flúor es un ion abundante en la corteza terrestre; comúnmente se encuentra asociado y forma fluoruros ( $\text{F}^-$ ) en rocas (Galicia-Chacón et al., 2011). Cuando el agua atraviesa los suelos por infiltración disuelve diversos compuestos, entre ellos los de flúor, resultando en concentraciones de  $\text{F}^-$  en los acuíferos (Ortega-Guerrero, 2009). De acuerdo con la OMS (Tovar et al., 2016) el límite máximo en la concentración de  $\text{F}^-$  es de 1,0 mg/L, aunque dicho valor depende de las características de cada lugar, de modo que Colombia determinó la misma concentración como límite máximo permitido.

Los niveles de  $\text{F}^-$  de la zona de estudio son elevados ya que el 23% de las muestras presentaron concentraciones superiores a las establecidas, estas corresponden a todas las muestras analizadas en la zona de influencia marina y algunos puntos en la zona de tránsito; en gran medida según lo descrito por Ortega-Guerrero (2009) debido a un mayor tiempo de residencia del agua en la unidad hidrogeológica.

El Índice de SAR es un indicador importante para determinar la calidad del agua para riego, esta es medida en relación con el peligro que presentan los cultivos ante la alcalinidad y el sodio; el contenido excesivo de  $\text{Na}^+$  reemplaza el  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Mg}^+$  lo que a su vez reduce la permeabilidad del suelo, inhibiendo el suministro de agua necesario para los cultivos (Bhunja et al., 2018; Sarath Prasanth et al., 2012; Sposito, Mattigod 1977; Suarez, 1981; Kumar et al., 2007). El análisis de este índice describe que la zona presenta excelente calidad con bajo peligro sódico, indicando que los niveles de  $\text{Na}^+$  no sobrepasan las concentraciones de  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Mg}^+$  y por lo tanto, la permeabilidad del suelo no se ve afectada (Acosta-García & Salvadori Verón, 2020; Rodríguez et al., 2022).

El índice de Na% se analiza en base a las altas concentraciones de Na<sup>+</sup> en el agua para riego, los cuales incrementan el nivel de salinidad en el suelo, esto se debe a que al haber presencia de Na<sup>+</sup> este es intercambiado por otros iones provocando la dispersión y degradación de este, volviéndose duro y compacto en condiciones secas y reduciendo la infiltración de agua y aire a través de los poros que conforman el suelo (Bonilla, 2015). En este mismo sentido se analizó el índice de Na% el cual refleja las concentraciones de Na<sup>+</sup> presentes en el área de estudio, este indica que el exceso de Na<sup>+</sup> combinado con CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> conduce a la formación de suelos alcalinos, mientras que con Cl<sup>-</sup> forma suelos salinos, lo que genera como resultado suelos con permeabilidad reducida, afectando el crecimiento de los cultivos (Hem 1985; Rao & Latha 2019).

De acuerdo con Camacho-Ballesteros *et al* (2023) este índice también ha sido definido por Wilcox y describe que el Na% es la relación que existe entre la concentración del ión Na<sup>+</sup> y la concentración catiónica total del agua, Camacho-Ballesteros *et al* (2023) indican que un valor alto en el índice denota agua blanda y un valor bajo advierte agua dura, dicho esto se puede determinar que la calidad del agua de la zona es considerada dudosa ya que, sus concentraciones predominaron entre valores de 60 y 80 mg/L por lo cual, se podría considerar como agua blanda y se describe como agua con bajas concentraciones de sales disueltas.

El valor del índice de RSC considera el contenido de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> del agua, las altas concentraciones de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> conducen a un aumento en el valor de pH, provocando la disolución de la materia orgánica, lo que a su vez genera toxicidad, afectando la nutrición mineral de las plantas; un aumento en el RSC conduce también a la precipitación del Ca<sup>+</sup> y el Mg<sup>+</sup> ocasionando un aumento en el contenido de Na<sup>+</sup> del suelo, disminuyendo la permeabilidad de este (Singaraja, 2017). Los análisis describen la calidad del agua del acuífero como inadecuada para el uso agrícola, lo cual está asociado a con los altos niveles de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el agua, lo que a su vez ocasiona la precipitación de Ca<sup>+</sup> y Mg<sup>+</sup> en forma de CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, lo que genera que estos iones se vayan reduciendo, aumentando así la proporción relativa de Na<sup>+</sup> (Eaton, 1950).

El RSBC corresponde a otro índice crucial para determinar la calidad del agua, esto se debe a que rara vez los iones de CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> se encuentran en concentraciones significativas mientras que por el contrario, cuando se registran concentraciones de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> más elevadas se inhibe la precipitación de Mg y por ende, genera infertilidad en el suelo (Eaton, 1950; Obiefuna &

Sheriff, 2011). Es así como el análisis determinó que la calidad del recurso es insatisfactoria ya que, de acuerdo con Alarcón & Menéndez (2015) los efectos de este índice en las propiedades del suelo definidos por Beatty & Loveday (1974), las altas concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{HCO}_3^-$  en el agua y su uso en el riego de los cultivos influye en que estos se precipiten con  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Mg}^+$ , lo que favorece la absorción del  $\text{Na}^+$ , afectando considerablemente las plantas debido al exceso de este ion.

El índice de PS se define como la suma de  $\text{Cl}^-$  y la mitad del ion  $\text{SO}_4^{2-}$  con concentración en aguas subterráneas, analizando el nivel de sales solubles presentes en el suelo (Rabindranath & Pattanayak, 2019; Panneerselvam, 2021). Palacio *et al* (2010) indican que de acuerdo con lo descrito por Miguel (2008), este índice considera que se produce la precipitación de las sales menos solubles, quedando en solución los  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , con lo que aumenta considerablemente la presión osmótica; esta es una característica importante en la solución nutritiva, ya que una alta presión osmótica disminuye la energía libre del agua y por lo tanto, restringe su absorción y la de algunos nutrimentos (Ehret & Ho, 1986). Es así como se pudo establecer que la zona de estudio presenta excelente calidad, pues el 80% de las muestras analizadas presentan concentraciones de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  menores a 5 mg/L (Sutradhar & Mondal, 2021).

Las altas concentraciones de Mg y el aumento de otros minerales incrementan la alcalinidad del suelo a medida que avanzan, dificultando las propiedades físicas de este, afectando directamente el rendimiento de los cultivos y disminuyendo la producción agrícola (Ghalib, 2017). Los análisis determinaron que la concentración excesiva de iones de  $\text{Mg}^+$  en el agua pueden reorganizar las propiedades del suelo y cambiar a una naturaleza alcalina, lo que podría reflejar un bajo rendimiento de los cultivos (Balamurugan *et al.*, 2020).

El índice de KR se basa en la concentración de iones de  $\text{Na}^+$  en comparación con iones de  $\text{Ca}^+$ , el cual se analiza con la premisa de que las altas concentraciones de  $\text{Na}^+$  reemplazan el  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Mg}^+$ , iones que juegan un papel importante en la nutrición mineral de las plantas (González-Acevedo *et al.*, 2016). El índice determina qué análisis con valores de  $\text{KR} < 1$  se consideran aptas para riego, mientras que las que presentan valores más elevados son consideradas inadecuadas (Bhat *et al.*, 2016).

La permeabilidad del suelo se ve muy afectada por el uso prolongado de nutrientes ricos en minerales, este reduce la aireación en el suelo y dificulta el arado, además de retardar el

crecimiento de la plántula (Khanoranga & Khalid, 2018). El IP revela la susceptibilidad del suelo a la pérdida de permeabilidad con respecto a la calidad del agua, teniendo en cuenta los iones disueltos que pueden precipitar fácilmente (Camacho-Ballesteros *et al.*, 2023), es así como el PI permite clasificar el agua como Clase I, II y III, siendo las aguas de clase I y II clasificadas como buenas para riego con 75% o más de permeabilidad máxima y agua de clase III como inadecuada con 25% de permeabilidad máxima (Bhat *et al.*, 2016; Karakuş & Yıldız, 2019).

## **5. CONCLUSIONES**

De acuerdo con los resultados el índice WQI para consumo humano indica que el recurso presenta dominancia por calidad buena (47,8), la cual se distribuye en la zona norte y sur del

área de estudio, mientras que la calidad pobre (33,3%) se encuentra presente en el sector occidental y en los márgenes orientales, presentando baja dominancia por la calidad muy pobre y no recomendaba que se encuentra en algunos parches presentes en el sector centro occidental y centro oriental.

A partir de los índices empleados para evaluar la calidad del agua, se identificaron los tipos de restricción para uso de riego, de este modo se determinó que el mayor volumen del recurso (82,6%) no requiere restricción y se encuentra ubicado desde la zona norte central a la zona sur, en menor proporción (10,1%) requiere restricción leve, restricción moderada con una proporción más reducida (2,8%) y restricción severa con un 4,3% centrada en la zona norte que limita con el litoral del mar Caribe.

Los iones de sodio presentaron dominancia en el acuífero, sin embargo, los efectos de este en el suelo varían dependiendo de su asociación con otros iones; las concentraciones de  $\text{Na}^+$  aunque presentan dominancia no están afectando los niveles de  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Mg}^+$  por tal motivo, la alcalinidad del suelo es baja, por otra parte debido a las bajas concentraciones de  $\text{Cl}^-$  se puede determinar que el agua asociada con  $\text{Na}^+$  no está alterando la salinidad de los suelos.

El contenido de  $\text{HCO}_3^-$  corresponde al ion con mayor predominancia entre todos los minerales presentes en el agua. Sus altos niveles están asociados a las bajas concentraciones de  $\text{Mg}^+$  el cual es un mineral clave en la fertilidad del suelo, sin embargo, el pH que representa un papel fundamental en las concentraciones  $\text{HCO}_3^-$  y en la disolución de la materia orgánica presenta valores neutros, lo que indica que el  $\text{HCO}_3^-$  no está afectando la alcalinidad del suelo, por otra parte el acuífero presenta insuficiencia de magnesio, lo cual podría afectar la productividad de los cultivos que empleen esta agua para riego.

Los iones de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{F}^-$  presentaron bajas concentraciones en la zona de estudio, por lo que a nivel general el acuífero no presenta dominancia de contaminantes generados por actividad antrópica, esto indica que la influencia del tipo de economía y el uso del suelo que se presenta en la zona aún no genera efectos representativos en la química del agua y por consiguiente en su calidad.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Acharya, S., Sharma, S. K., & Khandegar, V. (2018). Assessment of groundwater quality by water quality indices for irrigation and drinking in Southwest Delhi, India. *Data in brief*, 18, 2019-2028.

García, J. C. A., & Verón, J. A. S. (2020). Evaluación de la calidad de agua para riego mediante el empleo de criterios actualizados. *Semiárida*, 30(2), 82-82.

Adimalla, N., Li, P., & Venkatayogi, S. (2018). Hydrogeochemical evaluation of groundwater quality for drinking and irrigation purposes and integrated interpretation with water quality index studies. *Environmental Processes*, 5, 363-383.

Alarcón, N. M., & Menéndez, J. P. (2015). Calidad de los suelos y aguas para riego en áreas cacaoteras de Manabí. *La técnica*, (14), 6-23.

Allison, L. E., & Richards, L. A. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils (No. 60). *Soil and Water Conservative Research Branch, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture*.

Aly, A. A., Al-Omran, A. M., & Alharby, M. M. (2015). The water quality index and hydrochemical characterization of groundwater resources in Hafar Albatin, Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(6), 4177-4190.

Annapoorna, H., & Janardhana, M. R. (2015). Assessment of groundwater quality for drinking purpose in rural areas surrounding a defunct copper mine. *Aquatic Procedia*, 4, 685-692.

Balamurugan, P., Kumar, P. S., Shankar, K., Nagavinothini, R., & Vijayasurya, K. (2020). Non-carcinogenic risk assessment of groundwater in southern part of Salem District in Tamilnadu, India. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 65(1), 4697-4707.

Bastidas Osejo, B. D. (2019). Modelo conceptual de la recarga de aguas subterráneas en el nivel somero del sistema hidrogeológico golfo de Urabá, evaluando su magnitud y variabilidad espacio-temporal. *Universidad de Antioquia*.

Beita Sandí, W. (2008). Caracterización fisicoquímica de las aguas superficiales de la cuenca del río Rincón en la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica. *Universidad de Costa Rica*.

Beita-Sandí, W., & Barahona-Palomo, M. (2011). Fisico-química de las aguas superficiales de la Cuenca del río Rincón, Península de Osa, Costa Rica. *Uned Research Journal/Cuadernos de Investigación Uned*, 2(2), 157-179.

Belkhiri, L., & Mouni, L. (2012). Hydrochemical analysis and evaluation of groundwater quality in El Eulma area, Algeria. *Applied Water Science*, 2, 127-133.

Besoain, E. (1985). Mineralogía de arcillas de suelos (No. 60). *Bib. Orton Iica/Catie*.

Betancur-Vargas, T., García-Giraldo, D. A., Vélez-Duque, A. J., Gómez, A. M., Flórez-Ayala, C., Patiño, J. E., & Ortiz-Tamayo, J. Á. (2017). Aguas subterráneas, humedales y servicios ecosistémicos en Colombia. *Biota Colombiana*, 18(1), 1-28.

Bhat, M. A., Grewal, M. S., Ramprakash, R., Wani, S. A., & Dar, E. A. (2016). Assessment of groundwater quality for irrigation purposes using chemical indices. *Indian Journal of Ecology*, 43(2), 574-579.

Bhunja, G. S., Keshavarzi, A., Shit, P. K., Omran, E. S. E., & Bagherzadeh, A. (2018). Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and irrigation using GIS and geostatistics techniques in semiarid region of Neyshabur, Iran. *Applied Water Science*, 8, 1-16.

Bonilla, M. N. (2015). Calidad fisicoquímica del agua del distrito de riego 030" Valsequillo" para riego agrícola. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, 2(4).

Caballero, L. (2011). Efectos adversos de una elevada ingesta de sodio y proteína. Altos niveles de excreción urinaria de calcio. Breve revisión. *Revista Electronica de PortalesMedicos*. <http://www.portalesmedicos.com/publicaciones>.

Camacho-Ballesteros, A., Ortega-Escobar, H. M., Sánchez-Bernal, E. I., Flores-Magdaleno, H., Gardezi, A. K., Mendoza-Saldivar, I & Avelar-Roblero, J. U. (2023). Hidroquímica y

calidad del agua para riego de las Rh 21 y 23 costa de Oaxaca y costa de Chiapas, México. *Revista terra latinoamericana*, 41.

Campillo Pérez, A. K. (2021). Usando múltiples trazadores para comprender el funcionamiento de acuíferos freáticos heterogéneos en zonas húmedas tropicales: caso del Golfo de Urabá, Colombia. *Doctoral dissertation, Université Montpellier; Universidad de Antioquia (Medellin)*.

Cantillo, S. P., & Corpus, W. (2018). Diseño e implementación de un filtro para tratamiento de aguas grises en la aplicación de un sistema de riego para una huerta casera en San Andrés Islas, Colombia. *Loginn Investigación Científica y Tecnológica*, 2(1).

Caraballo, M. P. C., & Xavier, J. M. (2012). Manual de agua Subterránea. Montevideo, Uruguay. *Denad Internacional Sa*. P-34.

Cárdenas López, J. J., & Romero Perdomo, N. M. (2017). Análisis de contaminantes en el agua para consumo humano de la población urbana del municipio de Coello (Tolima, Colombia). *Doctoral dissertation*.

Cardona, A., & Hernández, N. (1995). Modelo geoquímico conceptual de la evolución del agua subterránea en el Valle de México. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(3), 71-90.

Comino, I., Segura, V., Ortigosa, L., Espín, B., Castillejo, G., Garrote, J. A. & Sousa, C. (2019). Prospective longitudinal study: use of faecal gluten immunogenic peptides to monitor children diagnosed with coeliac disease during transition to a gluten-free diet. *Alimentary Pharmacology & Therapeutics*, 49(12), 1484-1492.

Corredor, Y. & Ramirez, L. (2015). Validación de técnicas de análisis para dureza total y turbiedad en el laboratorio de control de calidad de la empresa de acueducto y alcantarillado del municipio de Ibagué Ibal S.A E.S.P. [Proyecto aplicado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD]. *Repositorio Institucional UNAD*.

Deshpande, S. M., & Aher, K. R. (2012). Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and agriculture use in parts of Vaijapur, District Aurangabad, MS, India. *Research Journal of Chemical Sciences Issn*, 2231, 606X.

Duque, J. C. D., Zuñiga, V. P., Yepes, P. P. V., Uribe, C. M., Vargas, T. B., & Giraldo, D. G. (2020). Delimitación de las potenciales zonas de recarga-caso de estudio: acuífero multicapa del eje bananero del Urabá Antioqueño-Colombia. *Revista Politécnica*, 16(32), 41-55.

Eaton, F. M. (1950). Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil science*, 69(2).

EHRET, D. L., & HO, L. C. (1986). Effects of Osmotic Potential in Nutrient Solution on Diurnal Growth of Tomato Fruit. *Journal of Experimental Botany*, 37(9), 1294–1302.

Espinoza, E., Villalobos, R., & Martinez, V. (2017). Evaluación de la calidad del agua de consumo humano de la provincia de Recuay. *Aporte Santiaguino*, ág-65.

Etim, E. E., Odoh, R., Itodo, A. U., Umoh, S. D., & Lawal, U. (2013). Water quality index for the assessment of water quality from different sources in the Niger Delta Region of Nigeria. *Frontiers in science*, 3(3), 89-95.

Farnham, I. M., Johannesson, K. H., Singh, A. K., Hodge, V. F., & Stetzenbach, K. J. (2003). Factor analytical approaches for evaluating groundwater trace element chemistry data. *Analytica Chimica Acta*, 490(1-2), 123-138.

Foster, S., Garduno, H., Kemper, K., Tuinhof, A., Nanni, M., & Dumars, C. (2003). Protección de la calidad del agua subterránea: definición de estrategias y establecimiento de prioridades. (No. 30100, pp. 1-6). *The World Bank*.

Galicia Chacón, L., Molina Frechero, N., Oropeza Oropeza, A., Gaona, E., & Juárez López, L. (2011). Análisis de la concentración de fluoruro en agua potable de la delegación Tláhuac, Ciudad de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(4), 283-289.

Gálvez Ayala, M. (2021). Influencia del consumo de agua dura en la salud renal en pobladores del centro poblado Chancaray y Cedropata de la provincia de Huanta-Ayacucho, 2020. *Repositorio Universidad César Vallejo*.

Garbagnati, M. A., González, P. S., Antón, R. I., & Mallea, M. A. (2005). Características físico-químicas, capacidad buffer y establecimiento de la línea base ambiental del Río Grande, San Luis, Argentina. *Ecología austral*, 15(1), 59-71.

Ghalib, H. B. (2017). Groundwater chemistry evaluation for drinking and irrigation utilities in east Wasit province, Central Iraq. *Applied Water Science*, 7, 3447-3467.

González-Acevedo, Z. I., Padilla-Reyes, D. A., & Ramos-Leal, J. A. (2016). Evaluación de la calidad de agua para riego relacionada a la salinización del suelo en Tierra Nueva, San Luis Potosí, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 33(3), 271-285.

Hem, J. D. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (Vol. 2254). *Department of the Interior, US Geological Survey*.

Hidalgo Castro, O. (2020). Estudio comparativo de los criterios de calidad de agua para consumo humano, con respecto a los indicadores establecidos en la norma boliviana. *Umss*.

Huerfano-Moreno, G. J., Rojas-Peña, J. I., Zapata-Muñoz, Y. L., Trujillo-González, J. M., Torres-Mora, M. A., García-Navarro, F. J., & Jiménez-Ballesta, R. (2023). Comparative Assessment of the Quality and Potential Uses of Groundwater in a Typical Rural Settlement in Colombia. *Water*, 15(4), 667.

Jha, M. K., Shekhar, A., & Jenifer, M. A. (2020). Assessing groundwater quality for drinking water supply using hybrid fuzzy-GIS-based water quality index. *Water Research*, 179, 115867.

Jiménez Cisneros, B., & Galizia Tundisi, J. (2012). Diagnóstico del agua en las Américas. México: Red Interamericana de Academias de Ciencias; Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC. Recuperado de: <https://www.academiadecienciasrd.org/>

Karakuş, C. B., & Yıldız, S. (2019). (Evaluation for Irrigation Water Purposes of Groundwater Quality in the Vicinity of Sivas City Centre (Turkey) by Using Gis and an Irrigation Water Quality Index. *Irrigation and Drainage*.

Khanoranga, & Khalid, S. (2018). An assessment of groundwater quality for irrigation and drinking purposes around brick kilns in three districts of Balochistan province, Pakistan, through water quality index and multivariate statistical approaches. *Journal of Geochemical Exploration*.

Khosravi, R., Eslami, H., Almodaresi, S. A., Heidari, M., Fallahzadeh, R. A., Taghavi, M., & Peirovi, R. (2017). Use of geographic information system and water quality index to assess groundwater quality for drinking purpose in Birjand City, Iran. *Desalin Water Treat*, 67(1), 74-83.

Kumar, M., Kumari, K., Ramanathan, A., & Saxena, R. (2007). A comparative evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in two intensively cultivated districts of Punjab, India. *Environmental Geology*, 53(3), 553–574.

Lara Mena, A. E. (2022). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos en la Zona de Mulaló. Análisis espacio temporal de los parámetros físicos y químicos del agua. *Bachelor's thesis, Quito: EPN, 2022*.

Madrigal-Solís, H., Fonseca-Sánchez, A., & Reynolds-Vargas, J. (2017). Caracterización hidrogeoquímica de los acuíferos volcánicos Barva y Colima en el Valle Central de Costa Rica. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(1), 115-132.

Malagón Navarro, J. P. (2017). Análisis hidrogeoquímico-multivariado del agua subterránea del sistema acuífero del Valle Medio del Magdalena–Colombia. *Ingeniería Civil*.

Miguel-Fernández, C., & Vázquez-Taset, Y. M. (2006). Origen de los nitratos (NO<sub>3</sub>) y nitritos (NO<sub>2</sub>) y su influencia en la potabilidad de las aguas subterráneas. *Minería y Geología*, 22(3), 9.

Montoya Chávez, L. X. (2021). Influencia de las características litológicas en la composición fisicoquímica de las aguas termales del valle de Languat-districto Celendín-provincia Celendín, 2021. *Repositorio institucional UPN*.

Morales, G. M., Ortigón, G. P., Quintero, M. V., & Taupin, J. D. (2009). Estudio Hidrogeológico con Énfasis en Hidrogeoquímica de los Acuíferos en la Zona Sur del

Departamento del Valle del Cauca (Colombia). *Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 2006*, 47.

Moreno Merino, L., Aguilera Alonso, H., González Jiménez, M., Díaz Losada, E., & Romero Prados, A. (2021). D-Piper (Diagrama Piper de Densidad): representación de grandes conjuntos de datos mediante el Diagrama de Piper: manual de uso. *Hidrogeología y aguas subterráneas*; 39

Muñoz Guerrero, V. (2016). Cloruros en aguas embotelladas para consumo humano. *UAP*, 72.

Nishanthiny, S. C., Thushyanthy, M., Barathithasan, T., & Saravanan, S. (2010). Irrigation water quality based on hydro chemical analysis, Jaffna, Sri Lanka. *Repositorio Dspace*.

Obiefuna, G. I., & Sheriff, A. (2011). Assessment of shallow ground water quality of Pindiga Gombe Area, Yola Area, NE, Nigeria for irrigation and domestic purposes. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 3(2), 131-141.

Ortega-Guerrero, M. A. (2009). Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 26(1), 143-161.

Ossa, J. (2017). Nivel del fondo natural para un sistema acuífero. Caso de estudio: Urabá Antioqueño. [Tesis de pregrado]. Universidad de Antioquia.

Palacio, S. R., Olivera, R. R., Tablada, R. N., & Cruz, V. L. (2010). Evaluación de la salinidad potencial de aguas para riego en la cuenca del Cauto. *Ciencias Holguín*, 16(2), 1-5.

Panneerselvam, B., Muniraj, K., Thomas, M., Ravichandran, N., & Bidorn, B. (2021). Identifying influencing groundwater parameter on human health associate with irrigation indices using the Automatic Linear Model (ALM) in a semiarid region in India. *Environmental Research*, 202, 111778.

Párraga Lema, C. M., & Galarza Villamar, J. A. (2016). Análisis de la actividad agrícola como contaminante del agua, alternativas tecnológicas para la desinfección del agua para consumo humano en comunidades rurales y recursos legislativos para la prevención de su conservación. *Bachelor's thesis, Espol*.

Pérez, J. I., Nardini, A. G., & Galindo, A. A. (2018). Análisis comparativo de índices de calidad del agua aplicados al río Ranchería, La Guajira-Colombia. *Información tecnológica*, 29(3), 47-58.

Pérez-López, E. (2014). Idoneidad del método de análisis de magnesio en agua potable por absorción atómica con curva de calibración cuadrática. *Tecnología en marcha*, 27(4), 22-29.

Pérez-López, E. (2016). Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. *Revista Tecnología en marcha*, 29(3), 3-14.

Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6), 914-928.

Rabindranath, B., & Pattanayak, S. K. (2019). Assessment of groundwater quality for irrigation of green spaces in the Rourkela City of Odisha, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 428-438.

Rao, K. N., & Latha, P. S. (2019). Groundwater quality assessment using water quality index with a special focus on vulnerable tribal region of Eastern Ghats hard rock terrain, Southern India. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1-16.

Raychaudhuri, M., Raychaudhuri, S., Jena, S. K., Kumar, A., & Srivastava, R. C. (2014). WQI to monitor water quality for irrigation and potable use. *Research Bulletin*.

Restrepo Gesamá, Y. A. (2014). Lineamientos estratégicos para la gestión ambiental del recurso hídrico subterráneo en el municipio de Dosquebradas (Risaralda), con base en el concepto de vulnerabilidad global y gestión del riesgo. *Repositorio UTP*.

Reyes Tineo, W. (2019). Influencia del consumo de agua dura de pozo sobre la salud de los pobladores del caserío Nuevo Huancabamba, Moyobamba, 2017. *Universidad Nacional de San Martín*.

Rodríguez, C., Duque, C., Calvache, M. L., & López, M. (2010). Causas de las variaciones de la conductividad eléctrica del agua subterránea en el acuífero Motril-Salobreña, España. *Geogaceta*, 49, 107-110.

Rodríguez, S., Jaramillo, S., Zurita, D., Valdiviezo, A., & Choloquina, C. (2022). Evaluation of the Quality of Irrigation Water from the Tilipulo Enríquez-Cotopaxi Acequia Through the Sodium Absorption Ratio (SAR). *Revista Politécnica*, 49(2), 55-64.

Romanelli, A., Quiroz Londoño, O. M., Massone, H. E., Martínez, D. E., & Bocanegra, E. (2010). El agua subterránea en el funcionamiento hidrológico de los humedales del Sudeste Bonaerense, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 121(4), 373-386.

Rosas Zambrano, N. (2021). Estado, Medio Ambiente y Sociedad Una aproximación sociojurídica a la formación y el funcionamiento de los Tribunales Ambientales en Chile entre 2012 y 2019. *Repositorio Uchile*.

Rout, C., & Sharma, A. (2011). Assessment of drinking water quality: A case study of Ambala cantonment area, Haryana, India. *International journal of environmental sciences*, 2(2), 933-945.

Salman, S. A., & Elnazer, A. A. (2015). Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural uses in SW Qena Governorate, Egypt. *Advances in Natural and Applied Sciences*, 9(5), 16-26.

Sarith Prasanth, S. V., Magesh, N. S., Jitheshlal, K. V., Chandrasekar, N., & Gangadhar, K. J. A. W. S. (2012). Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in the coastal stretch of Alappuzha District, Kerala, India. *Applied Water Science*, 2, 165-175.

Singaraja, C. (2017). Relevance of water quality index for groundwater quality evaluation: Thoothukudi District, Tamil Nadu, India. *Applied water science*, 7, 2157-2173.

Sposito, G., & Mattigod, S. V. (1977). On the Chemical Foundation of the Sodium Adsorption Ratio. *Soil Science Society of America Journal*, 41(2), 323.

Suarez, D. L. (1981). Relation Between pHc and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an Alternative Method of Estimating SAR of Soil or Drainage Waters. *Soil Science Society of America Journal*, 45(3), 469.

Sutradhar, S., & Mondal, P. (2021). Groundwater suitability assessment based on water quality index and hydrochemical characterization of Suri Sadar Sub-division, West Bengal. *Ecological Informatics*, 64, 101335.

Taborda Marín, A., Maldonado Lizarazo, C., Palacio Baena, J. A., & Vásquez Arango, J. G. (2008). Participación comunitaria en el golfo de Urabá: el caso del corregimiento Bocas del Atrato y la vereda El Roto, Municipio de Turbo, Antioquia. *Universidad de Antioquia*.

Tovar, K. I. L., Hernández, I. C., & Li, Y. (2016). Estudio de la contaminación de Flúor en el agua subterránea del acuífero de la cuenca alta del río Laja. *Jóvenes en la ciencia*, 2(1), 1292-1297.

US Salinity Laboratory (1954) Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils. *Handbook No. 60, US Department of Agriculture*, 160

Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Vijayaragavan, K., Rajiv Ganthi, R., Chidambaram, S., Anandhan, P., ... & Vasudevan, S. (2010). Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India. *Environmental monitoring and assessment*, 171(1), 595-609.

Vélez María Stephanía. (2017). Índices de calidad de agua subterránea como base para establecer sus usos potenciales. [Tesis de pregrado]. *Universidad de Antioquia*.

Villegas, P. (2013). Caracterización isotópica del acuífero del golfo de urabá, utilizando  $2\text{H}$ ,  $18\text{O}$ ,  $14\text{C}$ ,  $13\text{C}$ . *Universidad de Antioquia*.

Villegas, P., & Vivas, A. (2009). Hidrogeología del acuífero del eje bananero de Urabá. *IV Congreso Colombiano de Hidrogeología, Bogotá, Colombia*.

Villegas, P., Paredes, V., Betancur, T., & Ribeiro, L. (2013). Assessing the hydrochemistry of the Urabá Aquifer, Colombia by principal component analysis. *Journal of geochemical exploration*, 134, 120-129.

Vogel, J. C., & Ehhalt, D. (1963). The use of the carbon isotopes in groundwater studies. *In Radioisotopes in Hydrology. Proceedings of a Symposium*.

Wester, P., & van Dijk, J. H. (2009). Uso intensivo y despojo del agua subterránea: hacia una conceptualización de los conflictos y la concentración del acceso al agua subterránea. *In Justicia Hídrica: acumulación, conflicto y acción social* (pp. 111-133). Justicia Hídrica, IEP Instituto de Estudios Peruanos, Fondo Editorial PUCP.

Whelton, A. J., Dietrich, A. M., Burlingame, G. A., Schechs, M., & Duncan, S. E. (2007). Minerals in drinking water: impacts on taste and importance to consumer health. *Water Science and Technology*, 55(5), 283–291.

Wilcox, L. (1955). Classification and use of irrigation waters (No. 969). *US Department of Agriculture*.

Yepes, P. P. V., & Vargas, D. T. B. (2013). Caracterización isotópica del acuífero del golfo de urabá, utilizando <sup>2</sup>h, <sup>18</sup>o, <sup>14</sup>c y <sup>13</sup>c. *Universidad de Antioquia*.

Zamora, J. R. (2009). Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto, (ASADAS), de cada distrito de Grecia, cantón de Alajuela, noviembre. *Pensamiento Actual*, 9(12), 125-134.

Zúñiga, V. P., Azofeifa, I. V., Quintero, M. C. V., & Hartig, F. A. (2010). Hidrogeoquímica en el acuífero costero del eje bananero de Urabá. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(17), 51-61.

