

Fecha de recibido: 08-02-2025

Fecha de aceptado: 31-05-2025

DOI: 10.22490/21456453.9133

# ANÁLISIS GEOESPACIAL DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL CORREDOR MINERO DEL CESAR, COLOMBIA

## GEOSPATIAL ANALYSIS OF PHYSICOCHEMICAL PARAMETERS OF GROUNDWATER IN THE MINING CORRIDOR OF CESAR, COLOMBIA

Moisés Oswaldo Bustamante Rúa <sup>1</sup>

Cristian Antonio Daza Álvarez <sup>2</sup>

Daniela López Rugeles <sup>3</sup>

Viviana Melo López <sup>4</sup>

Vanessa García Leoz <sup>5</sup>

**Citación:** Bustamante Rúa, M. O., Daza Álvarez, C. A., López Rugeles, D., Melo López, V., García Leoz, V. (2026). Análisis geoespacial de parámetros físicoquímicos del agua subterránea en el corredor minero del Cesar, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(1), 243 – 265. <https://doi.org/10.22490/21456453.9133>

<sup>1</sup> Ph. D. en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Concepción – Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, Colombia. [mobustam@unal.edu.co](mailto:mobustam@unal.edu.co)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1692-991X>

<sup>2</sup> M. C. Ingeniería con énfasis en recursos minerales – Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, Colombia. [cdazaalvarez92@gmail.com](mailto:cdazaalvarez92@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1676-4681>

<sup>3</sup> M. C. Desarrollo Sostenible – Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. [danielalopez216902@correo.itm.edu.co](mailto:danielalopez216902@correo.itm.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2541-5889>

<sup>4</sup> Esp. Recursos Minerales – Fundación Universitaria del Área Andina – Sede Valledupar, Colombia. [vmelo@unal.edu.co](mailto:vmelo@unal.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8825-5245>

<sup>5</sup> M. C. Eng. Ingeniería Ambiental – Instituto Tecnológico Metropolitano – Sede Medellín, Colombia. [vanessagarcia@itm.edu.co](mailto:vanessagarcia@itm.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9232-5408>

## RESUMEN

**Contextualización:** El descenso de los niveles de los cuerpos de agua superficiales y la creciente demanda del consumo en las regiones del norte del Caribe colombiano han generado un aumento significativo en la búsqueda de fuentes de agua subterránea para su abastecimiento y uso, pero la falta de mecanismos de control y vigilancia de la calidad de estas fuentes de agua, ha generado efectos negativos sobre la salud y el bienestar de las comunidades que se benefician del preciado líquido.

**Vacío de conocimiento:** La falta de recursos, planes y metodologías de control y vigilancia de la calidad de las fuentes de agua subterránea en el departamento del Cesar, por parte de las autoridades ambientales, ha generado un desconocimiento del estado actual en muchas de sus regiones, por lo cual, la implementación de nuevas herramientas matemáticas y estadísticas aplicadas al geoprocesamiento de datos existente y de campo podría ayudar a generar nueva información de interés para el control y seguimiento de este recurso.

**Propósito:** El objetivo de esta investigación es generar una estrategia a partir del geoprocesamiento y análisis espacial de datos, utilizando la técnica de krigging simple, utilizando datos de parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica y temperatura) presentes en muestras de agua subterránea, en municipios del corredor minero del departamento del Cesar, con el fin de generar modelos de predicción a través de mapas de calor, que permitan observar las

zonas con mejor potencial de uso de estas fuentes de agua en la región.

**Metodología:** Se tomaron tres muestras *in situ* de manera aleatoria en pozos de agua subterránea en los municipios de Becerril, La Jagua de Ibirico y El Paso, en el departamento del Cesar, para su procesamiento en laboratorio y conocer sus parámetros fisicoquímicos asociados al pH, conductividad y temperatura; posterior a esto, los resultados fueron comparados con los modelos de predicción elaborados a partir de una base de datos de 200 puntos de muestreo en la zona de estudio, con el fin de comparar los resultados de laboratorio frente a los modelos de predicción propuestos.

**Resultados y conclusiones:** Los resultados del análisis geoespacial de los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea en municipios del corredor minero del Cesar revelaron que los municipios de Agustín Codazzi y Becerril cuentan con la mayor cantidad de pozos activos en sus diferentes usos (agrícola, industrial, doméstico y de abastecimiento público), además de tener las mejores condiciones fisicoquímicas en cuanto a los valores del pH (entre 6 y 9), conductividad eléctrica (de 0 a 1000) y temperatura (de 29° a 30,6°), mientras que los municipios de La Jagua de Ibirico y Chiriguaná cuentan con las peores condiciones de acuerdo con las características fisicoquímicas de las muestras de agua analizadas con valores de pH (entre 4,95 y 9,66), conductividad (de 50 a 2159) y temperatura (de 31° a 33°), haciendo que las alternativas de tratamiento sean

mucho más costosas para sus potenciales usos y que, al mismo tiempo, estas fuentes de agua subterránea sean poco apetecidas por las personas para sus diversos usos en estas zonas, por lo cual el seguimiento activo de las características de estas fuentes de

agua es fundamental para conocer sus potencialidades de uso y preferencia por parte de las personas de la región en estudio.

**Palabras clave:** SIG, agua subterránea, físico-química, geoprocesamiento, sostenibilidad.

## ABSTRACT

**Contextualization:** The decrease in the levels of surface water bodies and the growing demand for consumption in the northern regions of the Colombian Caribbean has generated a significant increase in the search for groundwater sources for its supply and use, but the lack of control and monitoring mechanisms for the quality of these water sources has generated negative effects on the health and wellbeing of the communities that benefit from the precious liquid.

**Knowledge gap:** The lack of resources, plans and methodologies for the control and monitoring of the quality of groundwater sources in the department of Cesar by the environmental authorities has generated a lack of knowledge of the current status in many of its regions, so the implementation of new mathematical and statistical tools applied to the geoprocessing of existing and field data could help to generate new information of interest for the control and monitoring of this resource.

**Purpose:** The objective of this research is to generate a strategy based on geoprocessing and spatial analysis of data using the simple krigging technique, using data of physicochemical parameters (pH, electrical conductivity and temperature) present

in groundwater samples in municipalities of the mining corridor of the department of Cesar, in order to generate predictive models through heat maps, which allow observing the areas with the best potential for the use of these water sources in the region.

**Methodology:** Three random in situ samples were taken randomly from groundwater wells in the municipalities of Becerril, La Jagua de Ibirico and El Paso in the department of Cesar for laboratory processing and to determine their physicochemical parameters associated with pH, conductivity and temperature, after which the results were compared with the prediction models developed from a database of 200 sampling points in the study area, in order to compare the laboratory results with the proposed prediction model.

**Results and conclusions:** The results of the geospatial analysis of the physicochemical parameters of groundwater in municipalities of the mining corridor of Cesar, revealed that the municipalities of Agustín Codazzi and Becerril have the largest number of active wells in their different uses (agricultural, industrial, domestic and public supply), in addition to having the best physicochemical conditions in terms of pH values (between 6 to 9) electrical conducti-

vity (0 to 1000) and temperature (between 29° to 30.6°), while the municipalities of La Jagua de Ibirico and Chiriguana have the worst conditions according to the physico-chemical characteristics of the water samples analyzed with pH values (between 4.95 at 9.66) electrical conductivity (50 to 2159) and temperature (31° to 33°), making the treatment alternatives much more expensive for their potential uses, and at the same time the-

se groundwater sources are little desired by people for their various uses in these areas, so the active monitoring of the characteristics of these water sources is essential to know their potential use and preference by the people of the region under study.

**Keywords:** GIS, Groundwater, Physico-chemistry, Geoprocessing, Sustainability.

## RESUMEN GRÁFICO

### ANÁLISIS GEOESPACIAL DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL CORREDOR MINERO DEL CESAR, COLOMBIA.



**Fuente:** autores.

## 1 INTRODUCCIÓN

En el norte de Colombia, las prolongadas temporadas de verano y la disminución de las precipitaciones han limitado la dispo-

nibilidad de agua superficial de ríos, arroyos y lagos, lo que representa un desafío crítico para el desarrollo de las comunidades ur-



banas y rurales. Esta situación ha afectado negativamente algunas actividades productivas, como la agricultura, la ganadería y la piscicultura, las cuales son parte fundamental de las costumbres ancestrales y fuentes de ingresos para estas comunidades en esta región (Corpocesar, 2018).

En municipios del departamento del Cesar, como Agustín Codazzi, Becerril, El Paso, La Jagua de Ibirico y Chiriguaná, se encuentran importantes fuentes hídricas que abastecen a estas poblaciones, como son los ríos Magiriaiimo, Tucuy, Maracas, Fernambuco, Calenturitas y Ariguaní, los cuales, a pesar de presentar volúmenes importantes de agua, no tienen oferta hídrica suficiente durante todo el año para abastecer a toda la población de la región, lo que ha llevado a un incremento en la extracción y aprovechamiento de fuentes de agua como las subterráneas por parte de los habitantes de estas zonas (Corpocesar, 2014; Gómez & Capachero, 2008; Ideam, 2013).

El uso creciente de fuentes de agua subterránea en estas regiones, sin un conocimiento claro de sus características físico-químicas y sin un control adecuado por parte de las autoridades, ha generado riesgos potenciales para la salud pública de las comunidades. Diversos estudios realizados por Corpocesar, 2014; Corpocesar & Fucol-

de, 2019; Gómez & Capachero, 2008, y Paz et al., 2012) han asociado que el consumo de aguas subterráneas sin tratamiento favorece el aumento de enfermedades gastrointestinales, como diarreas o colitis generadas por virus y bacterias en el agua, especialmente en zonas rurales con baja cobertura de sistemas de tratamiento de estas fuentes. Por ello, la evaluación periódica de parámetros físico-químicos y microbiológicos es esencial para el establecimiento de rutas de uso y tratamiento adecuados para estas fuentes de agua subterránea.

Este estudio plantea una estrategia metodológica para abordar la problemática del seguimiento del estado y calidad del agua subterránea en la región, mediante el uso de herramientas matemáticas y estadísticas apoyadas en los sistemas de información geográfica (GIS) y uso de algoritmos de geoprocesamiento, como el Krigging, los cuales permitan de manera aproximada y con un alto grado de precisión, la identificación y seguimiento de potenciales puntos de extracción de agua subterránea, verificados a través de la comparación con datos de campo medidos in situ, con el fin de generar nuevas rutas hacia la sostenibilidad y un abastecimiento seguro en las regiones más necesitadas del departamento del Cesar (Gómez & Capachero, 2008; Ideam, 2015).

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### ZONA DE ESTUDIO

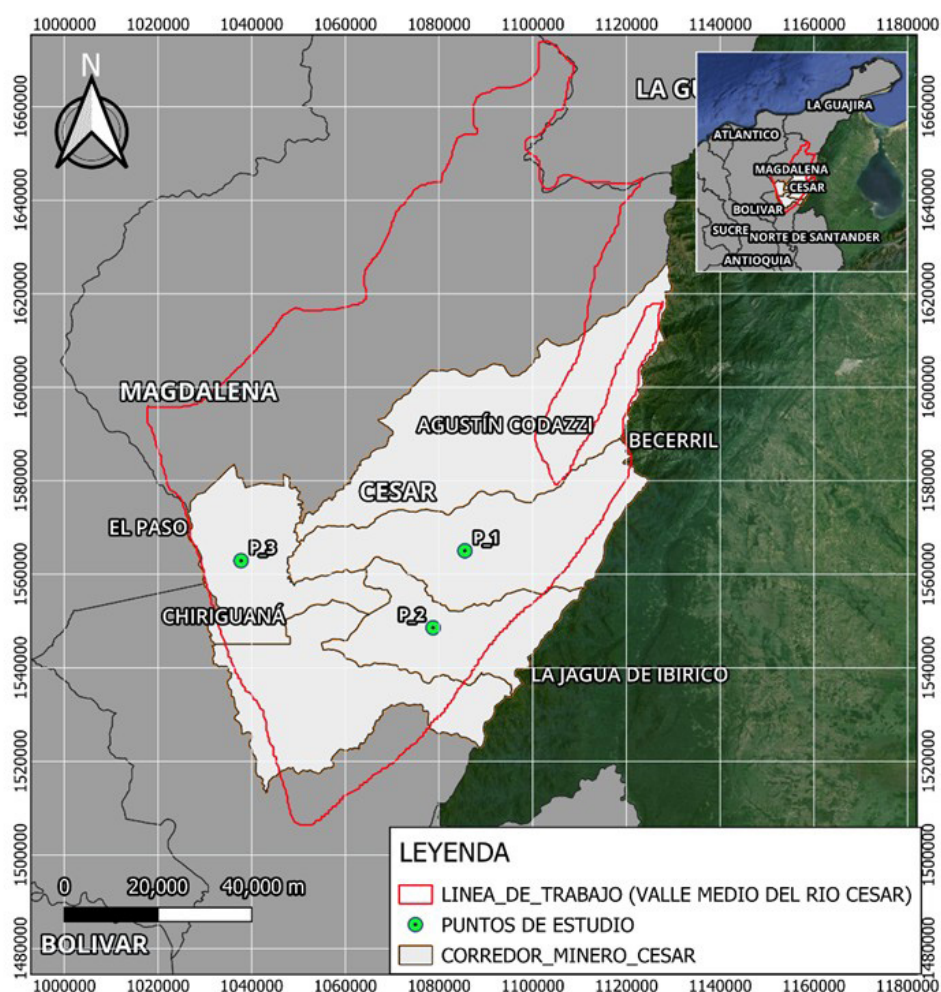
La zona de estudio se localiza en el departamento del Cesar, al norte del territorio

colombiano, específicamente en la cuenca del río Cesar como se observa en el (Mapa 1),

la cual cuenta con una extensión de 18 485 km<sup>2</sup>. Esta cuenca tiene áreas de drenaje en dirección norte-sur, definidas por las micro-cuencas de los ríos Badillo, Seco, Guatapurí, Tocaímo, Magiriaino, Mocho, Fernanbucú, Ariguaní, Tucuy, Casacara, Calenturitas y Maracas, pertenecientes a la gran cuenca del río Cesar (Corpocesar, 2014).

De acuerdo con el Ideam (2013, 2015, en el departamento del Cesar se reconocen tres

sistemas acuíferos principales: El sistema acuífero del Cesar, el sistema acuífero Simití y el sistema acuífero Banco-Mompox. Estos sistemas conforman la región hidrogeológica Cesar-Ranchería (PC4), con una cobertura superficial de 8593 km<sup>2</sup>. Dicha área se encuentra comprendida por los municipios de Valledupar, La Paz, San Diego, Agustín Codazzi, Becerril, La Jagua de Ibirico, El Paso, Chiriguana, Curumaní y Bosconia.



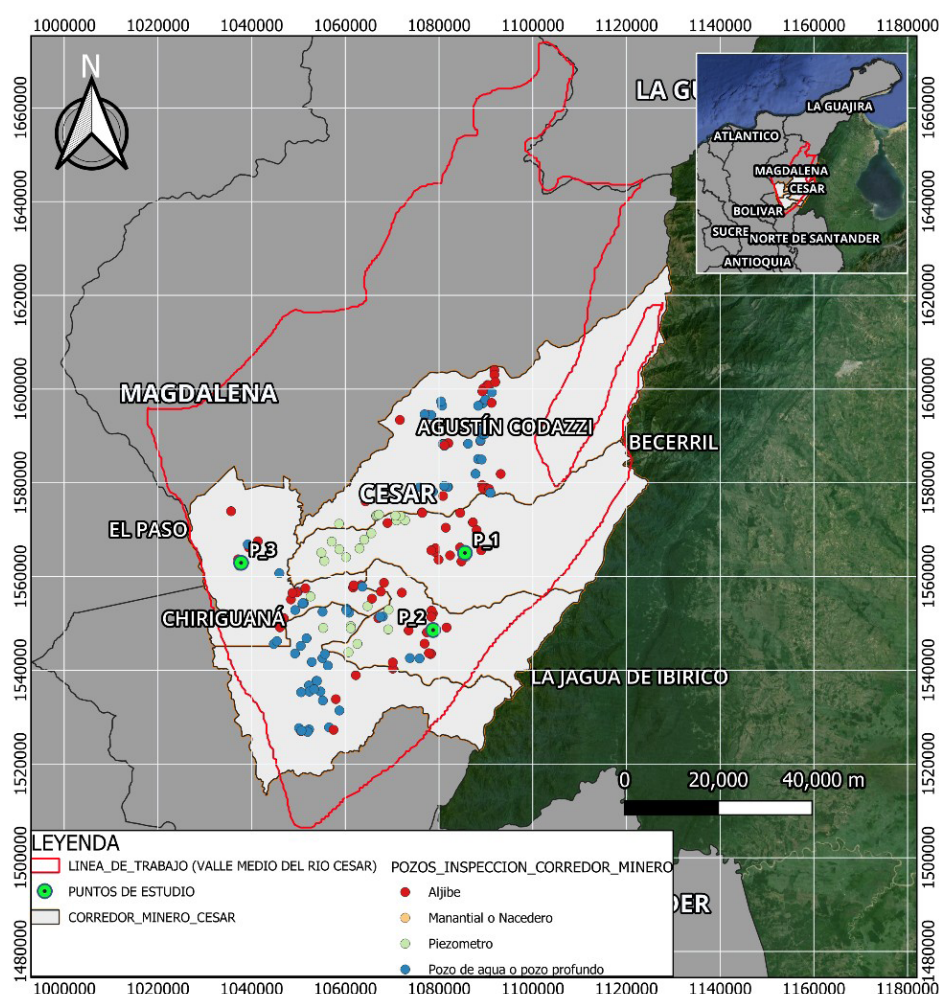
**Mapa 1.** Localización general de la zona de estudio

**Fuente:** autores. (Ideam, 2013, 2015)

## DISEÑO DE MUESTREO

Los puntos de muestreo fueron obtenidos a partir de inventarios hidrogeológicos realizados entre los meses de octubre y noviembre del 2020 en la zona del corredor minero del departamento del Cesar (**Mapa 2**), el cual incluye información de aproximadamente 200 pozos de agua subterránea dentro de la zona en estudio. Los puntos fueron

procesados y georreferenciados dentro del sistema de coordenadas Magna-SIRGAS/ Datum: Colombia Bogotá Zone, además de contener información asociada con datos de parámetros físicoquímicos como pH, temperatura y conductividad eléctrica. (Corpo-cesar & Fucolde, 2019).



**Mapa 2.** Inventario de puntos de agua en la zona de estudio

Fuente: autores.



# MUESTREO DE VALIDACIÓN EN CAMPO

Con el objetivo de contrastar los resultados históricos y evaluar la precisión de los modelos de predicción generados, se realizaron recorridos de campo en julio de 2024. En esta etapa se tomaron tres puntos (P1: Becerril, P2: La Jagua de Ibirico y P3: El Paso) de manera aleatoria siguiendo experiencias y recomendaciones de datos e investigaciones de campo realizadas por Belmonte et al., 2021; Gomez Delgado & Barredo Cano, 2005), con el fin de obtener información asociada a los parámetros fisicoquímicos presentes en el agua subterránea en estos municipios. Estas mediciones se realizaron con equipos de medición multiparamétricos de la marca HACH – Ref: HQ40d para determinar directamente en el agua los valores de pH, temperatura y conductividad eléctrica, además de tomar muestras de estos puntos para ser procesadas en laboratorios acreditados y validar los resultados obtenidos, teniendo en cuenta las guías y recomendaciones emitidas por el Ideam (2018, 2019).

## ANÁLISIS DE GEOPROCESAMIENTO ESTADÍSTICO

El análisis fue desarrollado utilizando ArcGIS 10.8 con la extensión Geostatistical Analyst. Se construyeron variogramas experimentales para cada parámetro, ajustando modelos teóricos para representar la estructura espacial de la semivarianza. Posteriormente, se generaron mapas continuos de pH, temperatura y conductividad eléctrica en el área de estudio.

La interpolación de los valores de los parámetros fisicoquímicos mencionados se definió de acuerdo con Villatoro et al. (2008), quienes sugieren el método de Kriging simple para la distribución espacial de las variables analizadas, mediante el uso de variogramas o semivariogramas. Este método asume que los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor peso o influencia sobre la interpolación, influencia que va disminuyendo conforme la distancia aumenta respecto al punto de interés. El cálculo se establece a partir de la Ecuación 1:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma[d(S_i, S_j)] + m = \gamma[d(S_o, S_i)], \quad i = 1, \dots, n ; \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde n es el número de observaciones, m es el multiplicador Lagrange usado para la minimización de las restricciones,  $\lambda$  es el peso dado a cada una de las observaciones y la suma de todos los  $\lambda$  es igual a uno. Los subíndices i y j denotan los puntos muestreados, el subíndice 0 es el punto en estimación, s simboliza la medición efectuada (variable

medida) y d (S\_i, S\_0) es la distancia entre S\_i y S\_0 a partir del semivariograma, mediante la cual la semivarianza Ecuación 2 calculada es una medida para determinar la similitud entre observaciones, en donde a mayor similitud, menor semivarianza, tal como se muestra a continuación:



$$\gamma[d(S_i, S_0)] = \text{Var}[Z(S_i) - Z(S_0)] \text{ (Ecuación 2)}$$

(Belmonte et al., 2021; Gómez Delgado & Barredo Cano, 2005) (Ideam, 2019)

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### GEOPROCESAMIENTO DE DATOS DE CAMPO

En cuanto al pH, se observan en el mapa 3 valores entre los 4 y 8 en la mayoría de los municipios del corredor minero, con algunos focos de acidez presentes en el municipio de La Jagua de Ibirico en la zona centro y sur, mientras que en la frontera entre los municipios de Becerril y Agustín Codazzi se presentaron valores medios entre los 6 y los 8, siendo aguas con tendencias a la acidez y la alcalinidad.

En el mapa 4 se encuentran los datos de las temperaturas promedio medidas en los pozos, en donde se puede inferir que, dentro de los cinco municipios pertenecientes al corredor minero, durante las fechas de muestreo entre los meses de octubre y noviembre del 2020, se presentaron temperaturas promedio entre los 26 y los 32 °C, con algunos focos marcados con temperaturas superiores a los 32 °C entre los límites de los municipios de La Jagua de Ibirico y El Paso. Mientras que, entre los municipios de Agustín Codazzi y Becerril se presentan temperaturas entre los 25 y los 28 °C, con tendencia a disminuir a medida que se acercan a las zonas de la Serranía del Perijá.

Finalmente, el mapa 5 presenta los valores asociados a la conductividad eléctrica del agua subterránea, con patrones importantes

de baja conductividad entre las fronteras de los municipios de Agustín Codazzi, Becerril, La Jagua de Ibirico y El Paso, con valores promedio entre los 1 y los 1000 (uS/cm), valores que permiten inferir que son zonas de reserva de agua con baja o media presencia de minerales solubles y con características de poca o baja salinidad, que resulta un factor de vital importancia para el uso del agua y su potencial para ser empleada con fines de potabilización, de acuerdo con (Inocencio-Flores et al., 2013). Por su parte, en el municipio de Chiriguaná se aprecian concentraciones por encima de los 1001 (uS/cm), lo cual indica una alta presencia de minerales disueltos en estos puntos de muestreo, asociados a los altos índices de salinidad que se presentan en estas aguas.

### ANÁLISIS DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

A partir de los datos de campo obtenidos de las características físicoquímicas efectuados en los tres puntos de control (P1, P2 y P3) en campo, se elabora la tabla 1, donde se observan los datos promedio de las variables de pH, temperatura y conductividad, con el fin de tener una línea base con datos probados en campo, para luego generar una comparativa con los datos obtenidos en

campo como se observa en la tabla 2, durante el mes de julio del 2024 y los datos proyectados a partir de los mapas de predicción,

elaborados con el total de los datos, como se describe a continuación:

**Tabla 1.**  
 Datos parámetros fisicoquímicos de fuentes de agua subterránea Convenio ANH-Corpo-cesar 2020

Datos monitoreo en municipios del corredor minero (2020)			
Municipio	Temperatura promedio (°C)	pH	Conductividad eléctrica (µs/cm)
Agustín Codazzi	30,18	7,54	507,05
Becerril	30,41	7,78	550,88
Chiriguaná	31,10	7,18	641,17
El Paso	31,66	6,90	328,50
La Jagua de Ibirico	30,86	6,60	449,17
Límite normativo para agua de consumo humano y potable (Resolución 2115 de 2007 y Decreto 475 de 1998)	NA	6,5-9	50-1000

Fuente: Corpocesar & Fucolde, 2019.

**Tabla 2.:**  
 Datos parámetros fisicoquímicos de fuentes de agua subterránea de campo, monitoreo junio de 2024 (Convenio ITM, UPC, UNAL, 2024)

Datos monitoreo en campo y laboratorio (2024)						
Municipio	Temperatura promedio (°C)		pH		Conductividad eléctrica (µs/cm)	
	Campo	Laboratorio	Campo	Laboratorio	Campo	Laboratorio
Becerril	29,6	<26°	7,07	7,09	340	362
El Paso	36,4	<26°	8	7,87	435	449
La Jagua de Ibirico	31,3	<26°	5,38	5,11	66,4	<84
Límite normativo para agua de consumo humano y potable (Resolución 2115 de 2007 y Decreto 475 de 1998)	N/A		6,5-9		50-1000	

Fuente: autores.

Se identifica una correspondencia en la temperatura, a excepción de los datos obtenidos en el municipio de El Paso, en el cual se tienen valores de 31,66 °C, mientras en campo se observan valores de 36,4 °C. Esto puede corresponder a la hora de toma de muestras, dado que los valores obtenidos de la predicción espacial consideran el promedio de los datos logrados para cada municipio, mientras que el dato *in situ* es puntual y fue tomado al medido día, donde el Sol se encuentra en el cenit. Esto es importante, si se considera la relación e influencia que existe entre las variables consideradas.

Por otro lado, los valores de pH muestran mayor variación en los municipios de El Paso y La Jagua de Ibirico, con aumento de 0,97 en el primer caso, y disminución de 0,82 en el segundo. Si bien los cambios de pH se relacionan con aspectos naturales como antrópicos, esta variación no parece ser inusual al tratarse de una comparación entre valores promedio en el municipio con datos *in situ*. En estos casos, suelen considerarse las dinámicas hidroclimáticas de la zona o las coberturas y usos del suelo o la extracción del recurso, ya que una variación de pH menor a la unidad no representa un cambio significativo que permita el reconocimiento de alteraciones en el agua.

En el caso de la conductividad eléctrica, se encontraron diferencias generalizadas entre los municipios que comprenden el comparativo realizado en las tablas 1 y 2. El más significativo de ellos fue el encontrado en La Jagua de Ibirico, ya que el promedio de la conductividad proyectada con los datos del 2020 fue de 449,17  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que

en el 2024 se obtuvo un valor de 66,4  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Igualmente, en el municipio de Becerril se tuvo una disminución de 210,88  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el mismo periodo.

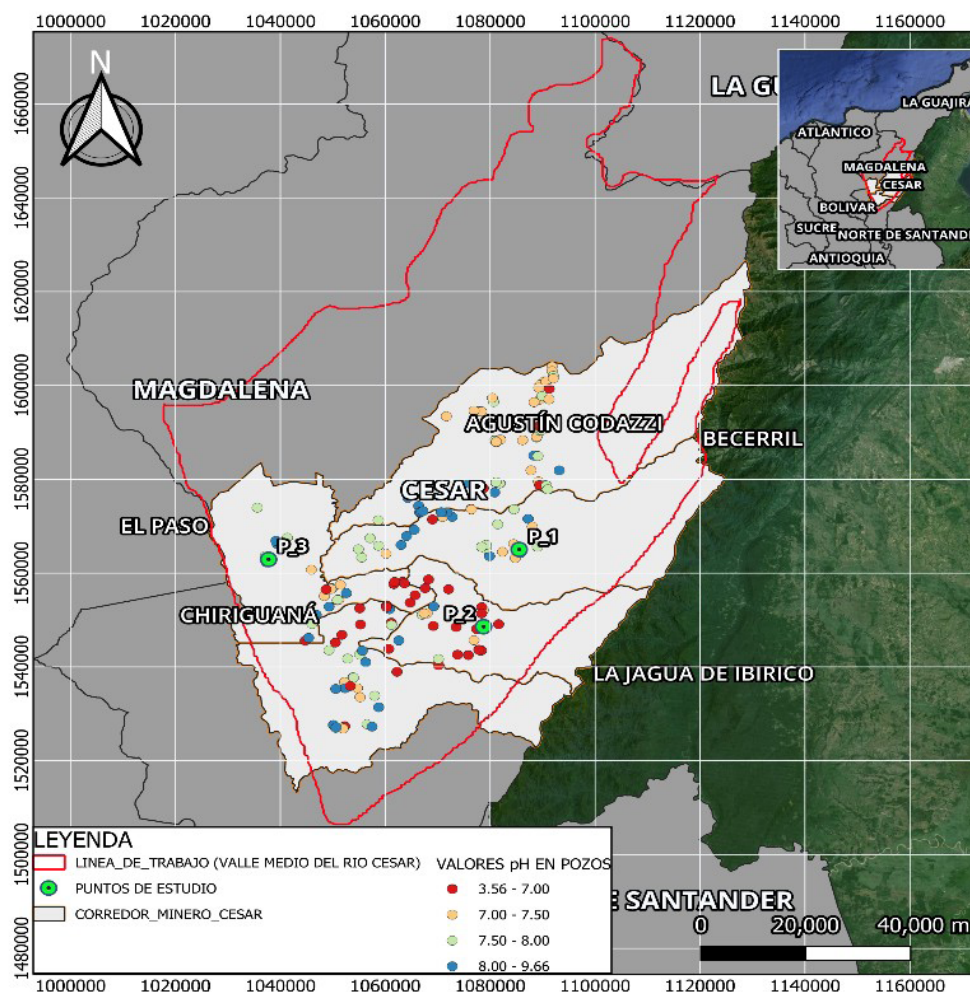
## MODELOS GEOESTADÍSTICOS PREDICTIVOS DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LOS POZOS ESCOGIDOS EN LA ZONA DE ESTUDIO

Posterior a la zonificación espacial de los puntos de muestreo dentro del área de estudio del corredor minero del Cesar, se realizó un análisis geoestadístico predictivo, con el fin de conocer las tendencias de las características físicoquímicas de las fuentes de agua en las zonas a intervenir, esto se hizo mediante la interpolación de tipo kriging simple (Martínez-Vargas & Ramírez-García, 2005; Montero et al., 2015; Rangel Sotter et al., 2002; Villarreal-Macés et al., 2018), con el fin de predecir a partir de las tendencias estadísticas, teniendo en cuenta la ubicación geoespacial de cada punto de muestreo de agua subterránea, las magnitudes de las variables físicoquímicas asociadas al pH, conductividad y temperatura.

En cuanto a las características asociadas a los modelos de geoprosesamiento presentes en el mapa 6, se infieren algunas correlaciones aproximadas de los valores del pH en comparación con los valores reales tomados en campo en la zona de estudio (Tabla 2), en las cuales se pueden observar tendencias marcadas en las muestras de agua con valores poco ácidos a neutros entre los valores

de 6 a 9, con predominancia entre los municipios de Agustín Codazzi y Becerril, mientras que para los municipios del centro del corredor como es el caso de Chiriguaná, El Paso y La Jagua de Ibirico, se observan valores proyectados de pH entre los 3 y 8, con tendencias ácidas a neutras. Esto permite te-

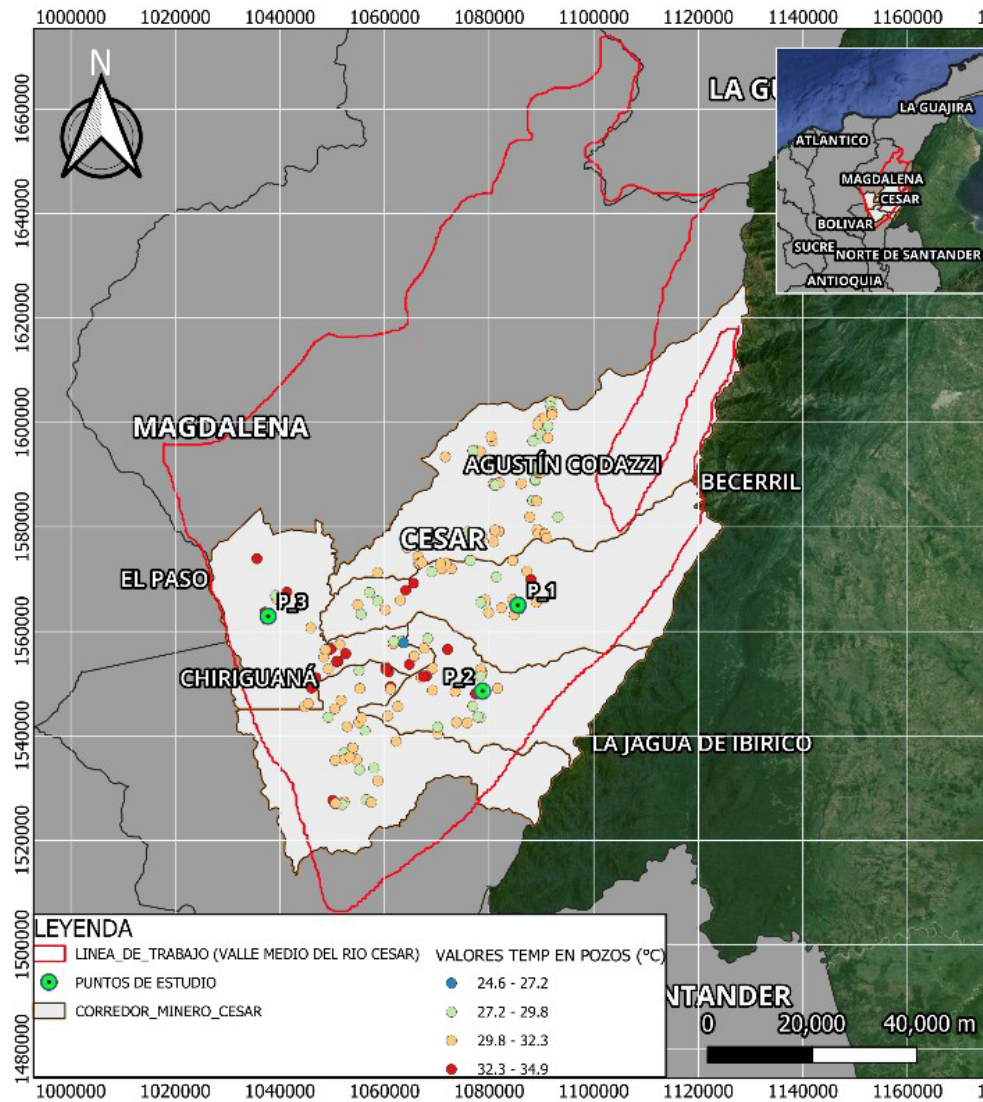
ner un diagnóstico previo de las zonas con presencia de aguas ácidas, neutras y alcalinas, con el fin de optimizar y potencializar futuras zonas de intervención para estudios, análisis y prospección de fuentes de agua subterránea en la zona.



**Mapa 3.** Datos georreferenciados de pH en la zona de estudio

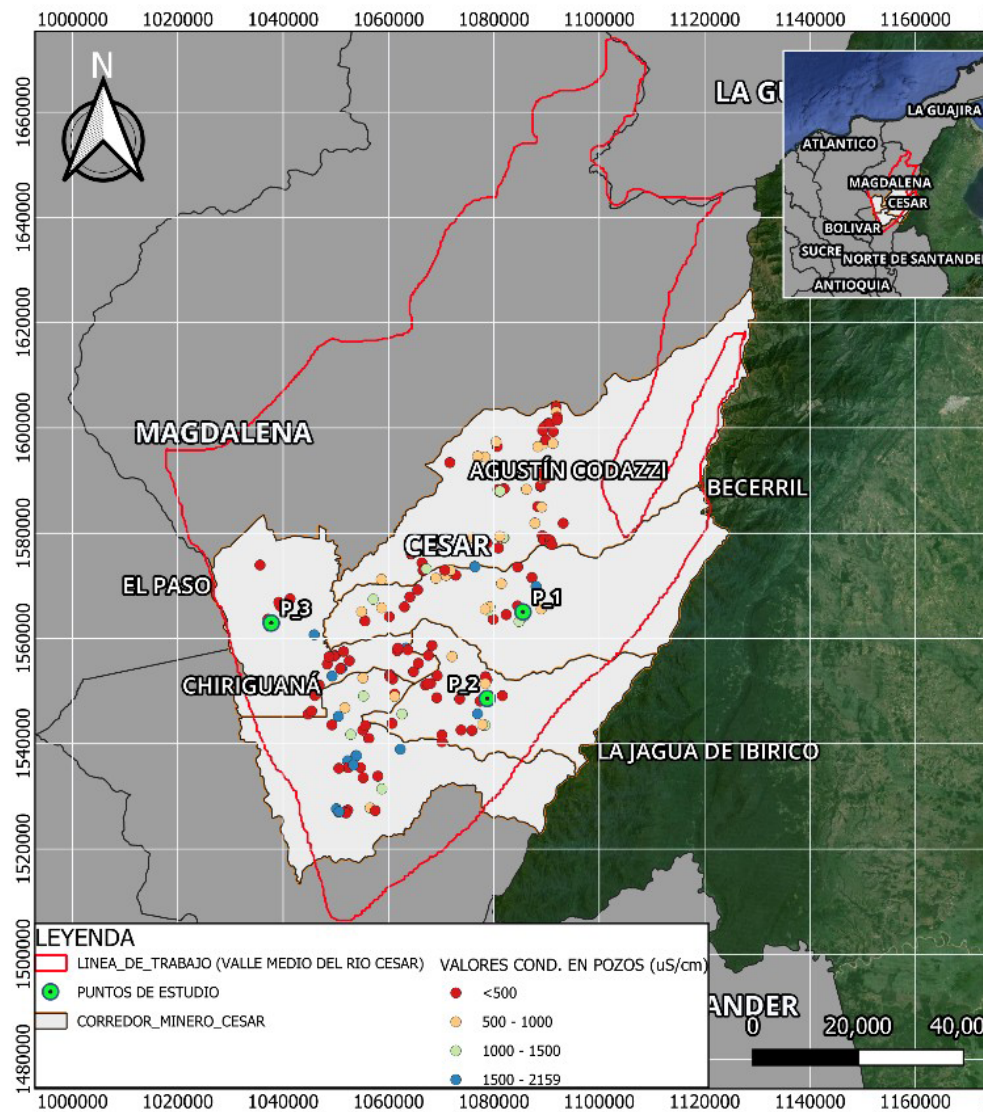
**Fuente:** autores.





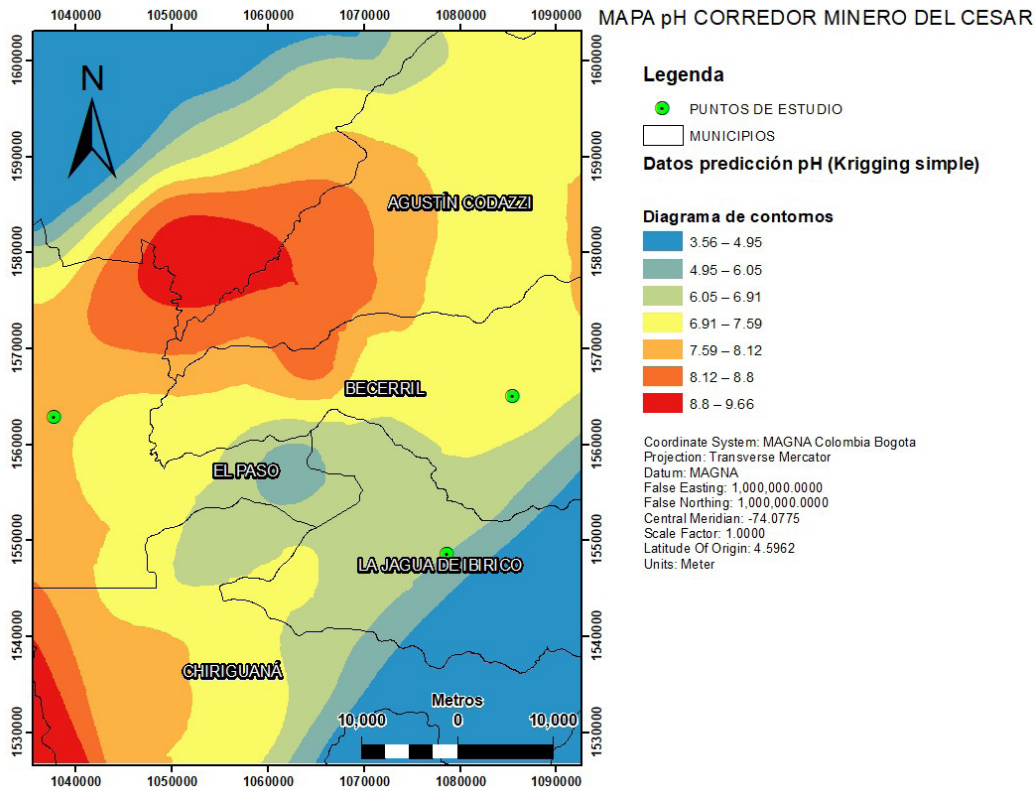
**Mapa 4.** Datos georreferenciados de temperatura (°C) en la zona de estudio

**Fuente:** autores.



**Mapa 5.** Datos georreferenciados de la conductividad eléctrica (uS/cm) en la zona de estudio

**Fuente:** autores.



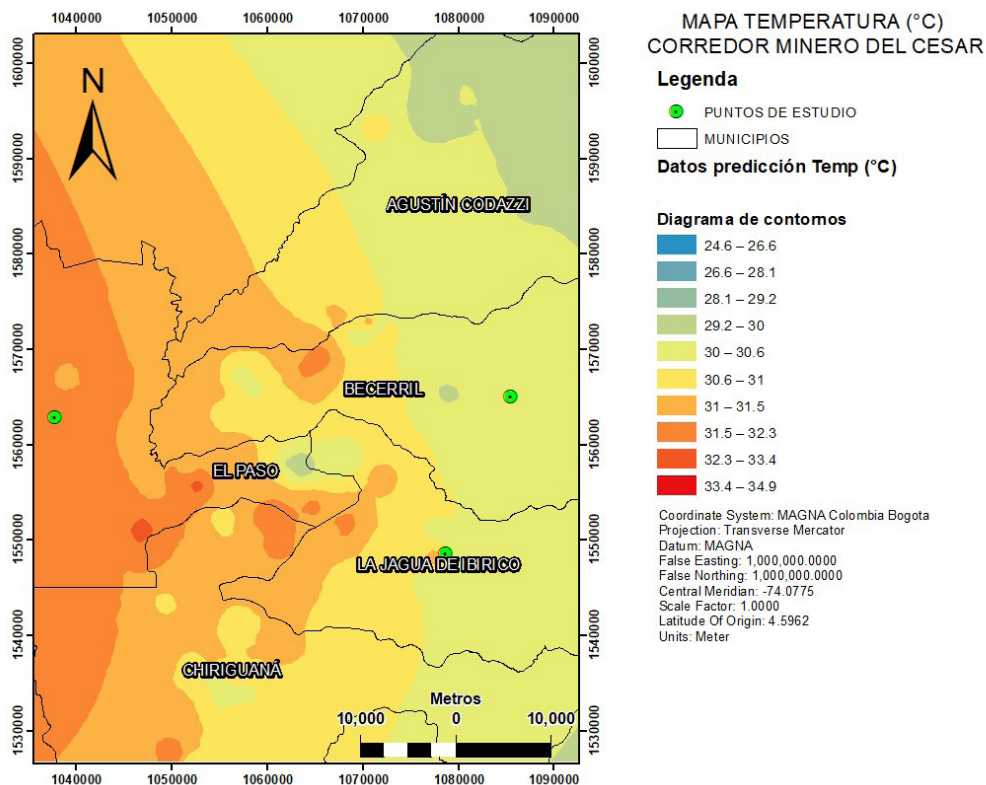
**Mapa 6.** Mapa parámetro pH en corredor minero del Cesar

**Fuente:** autores.

Estos valores de pH, de acuerdo con Appelo & Postma, 2004, podrían estar asociados a reacciones químicas que se presentan al interior de la unidad acuífera, producto de la interacción del agua con el suelo y las rocas. Por ejemplo, la dilución del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), manganeso, hierro y algunos componentes de las arcillas. Estos compuestos, una vez disueltos en el agua, hacen que el pH baje y el agua se acidifique. Igualmente, el aporte de contaminación puntual o difusa, proveniente de las actividades antrópicas que se desarrollan en el territorio, tales como la minería, el mal manejo de las aguas residuales y de las zonas de residuos sólidos, cultivos o ganadería, pueden ocasionar infiltraciones de aguas con bajo pH que alcanzan el acuífero.

Para las condiciones de temperatura promedio del agua, durante el periodo de muestreo en la zona de estudio, se observa en el mapa 7, una tendencia a la disminución de los valores de la temperatura desde el suroeste hacia el noreste de la zona en estudio, con valores proyectados entre los  $34,9^\circ$  y los  $26,6^\circ\text{C}$ , teniendo en cuenta que el aumento significativo de los valores de la temperatura, en los municipios del Chiriguana, El Paso y La Jagua de Ibirico, podrían asociarse a factores de pérdida de cobertura vegetal y actividades de ganadería y minería intensiva, que favorecerían a los procesos de desertificación en la zona en estudio (Corpocesar, 2014, 2018; Ideam, 2013; Pérez Hernández & Pérez Sato, 2023).





**Mapa 7.** Mapa parámetro temperatura (°C) en corredor minero del Cesar

**Fuente:** autores.

Sin embargo, se observa que, en la frontera central de los municipios del Becerril, El Paso y La Jagua de Ibirico, se encuentran zonas puntuales donde los acuíferos subterráneos presentan temperaturas bajas del orden de 26,6°, en comparación con los valores promedio de los datos obtenidos en campo. Una posible explicación de lo anterior estaría asociada con la presencia de cultivos de palmas africanas, que generan condiciones microclimáticas a través de la sombra (Pérez Hernández & Pérez Sato, 2023), mantienen los terrenos con ciertas condiciones específicas para algunos nutrientes (flora y fungas) y las fuentes de agua fresca.

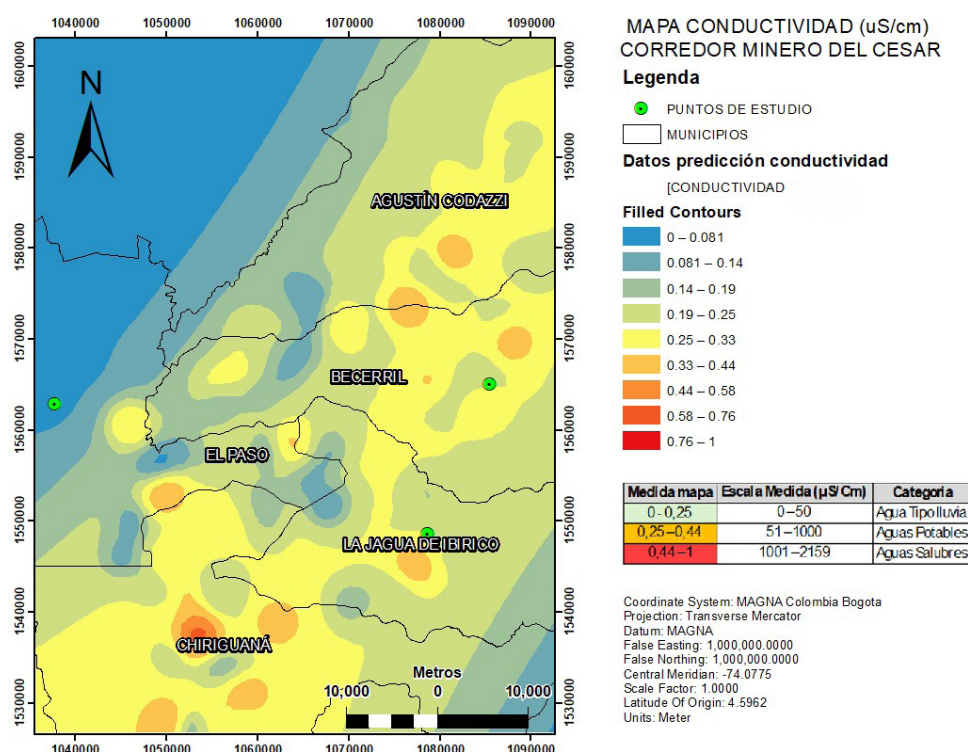
Teniendo en cuenta las consideraciones de Stumm & Morgan, 1996, la temperatura puede influir en el comportamiento del pH y la conductividad eléctrica, dado que, cuando hay un incremento en la temperatura, el pH disminuye, y viceversa. Esto debido a que cuando la temperatura aumenta, la molécula del agua tiende a separarse en sus elementos constituyentes: hidrógeno y oxígeno. Asimismo, cuanto mayor es la temperatura del agua, mayor será su capacidad para conducir la carga eléctrica.

Con respecto a las proyecciones de conductividad eléctrica, en el mapa 8 se observan varios aspectos de interés. El primero de ellos es que en los modelos de predicción



se presenta una fuerte tendencia de los valores reales de conductividad en el municipio de Chiriguana, los cuales se encuentran asociados a una mayor cantidad de minerales disueltos en la zona de estudio, cuyas características le generan una mayor salinidad a estas muestras de agua, descartando el consumo por parte de las comunidades, sin un previo procesamiento (Paz et al., 2012), mientras que para la región central del corredor minero, comprendido por los mu-

nicipios de El Paso y La Jagua de Ibirico, se presentan zonas con muy bajos valores de conductividad eléctrica, las cuales podrían catalogarse como zonas viables para el estudio, análisis y prospección de nuevas fuentes de agua con potencial uso y/o aprovechamiento, por sus bajos contenidos de minerales disueltos asociados a una baja salinidad y, al mismo tiempo, por sus niveles neutros de pH, que facilitarían los procesos de potabilización y otros potenciales usos.



**Mapa 8.** Mapa parámetro conductividad (uS/cm) en corredor minero del Cesar

**Fuente:** autores.

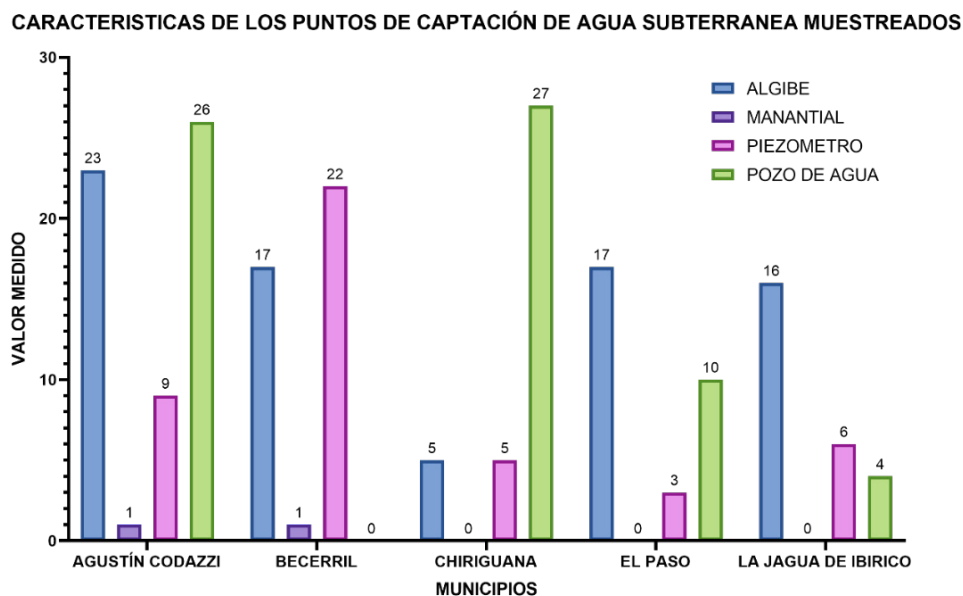
De acuerdo con Hounslow, 2018, los altos valores de conductividad eléctrica podrían estar relacionados a varios factores, entre ellos, una elevada concentración de sales o sólidos disueltos en el agua, provenientes de disolución de materiales presentes en el sue-

lo o meteorización de rocas, la infiltración de agua residual y lixiviados o altas tasas de evapotranspiración y extracción del recurso, lo que hace que se concentren las sales disueltas en el medio acuífero por disminución del nivel freático.

## ANÁLISIS DEL USO Y RECOMENDACIONES PARA EL MANEJO DE LAS FUENTES HÍDRICAS SUBTERRÁNEAS

Mediante los trabajos de campo efectuados por la zona de estudio se logró reconocer algunas características importantes en lo

relacionado con el uso y manejo del recurso hídrico subterráneo, entre ellas, el tipo de captación y el uso del agua en los municipios del corredor minero, lo cuales se presentan en las figuras 1 y 2. Según esta información, el tipo de captación que predomina son los aljibes y los pozos profundos, principalmente en los municipios de Agustín Codazzi y La Jagua de Ibirico.

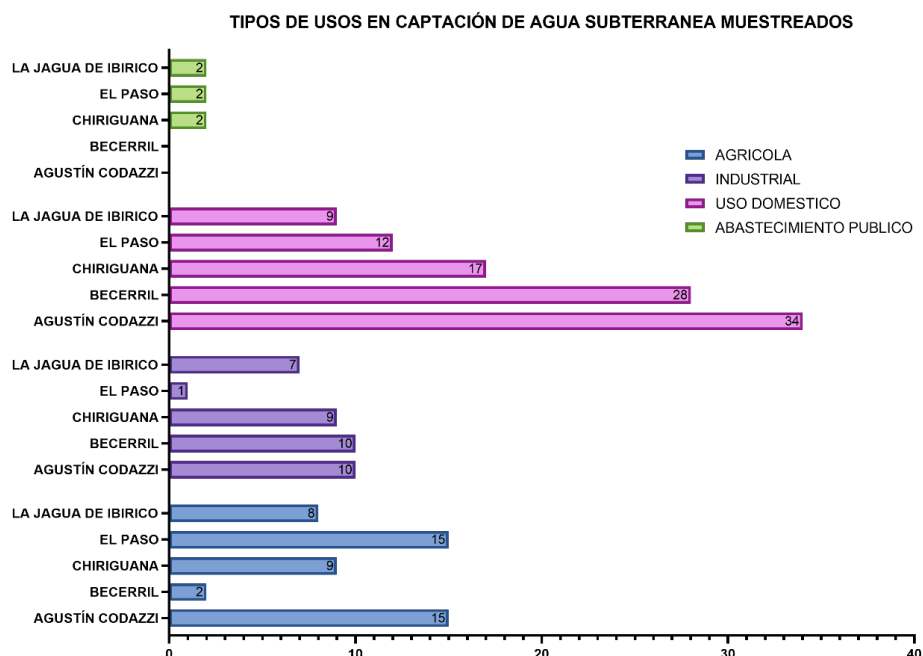


**Figura 1.** Tipos de captación de fuentes de agua subterránea en municipios del corredor minero del Cesar

**Fuente:** autores.

Respecto al uso del agua, se encontró que el uso principal es el de consumo humano, principalmente en los municipios de Agustín Codazzi, Becerril y Chiriguana, lo cual se debe a la escasez del recurso hídrico superficial en el territorio y a la población asentada en esos municipios. Es importante considerar que los resultados logrados en el moni-

toreo de variables fisicoquímicas revelan algunas características de interés sanitario, ya que, en algunos sectores de estos municipios de Becerril, Chiriguana y La Jagua de Ibirico, se encontraron valores de pH y conductividad eléctrica por fuera del valor que establece la norma colombiana (Resolución 2115 de 2007) para el agua de consumo humano.



**Figura 2.** Usos del agua subterránea en puntos de muestro de municipios del corredor minero

**Fuente:** autores.

En todos los casos, es recomendable efectuar jornadas de monitoreo periódicas que permitan conocer la evolución espaciotemporal de las variables fisicoquímicas que se relacionan con la calidad del agua y formular

planes de manejo ambiental y del acuífero que apunten a la protección y sostenibilidad del recurso hídrico en la región del corredor minero del Cesar.

## 4 CONCLUSIONES

La aplicación de herramientas de análisis geoespacial y el uso de algoritmos aplicados al geoprocesamiento, como el kriging simple, permitieron generar modelos predictivos de los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea en el corredor minero del departamento del Cesar, con resultados útiles para la zonificación y priorización de aguas según su calidad.

Los municipios de Agustín Codazzi y Becerril presentan las condiciones fisicoquímicas de acuerdo con los resultados históricos y medidos en campo con mayor favorabilidad, con valores de pH cercanos a la neutralidad, baja conductividad eléctrica y temperatura dentro de los rangos óptimos deseables, lo que los posiciona como zonas con alto potencial para el uso y la sostenibilidad del recurso.

En contraste, se observó que los municipios de La Jagua de Ibirico y Chiriguaná registraron niveles críticos de acidez y conductividad, lo que puede llegar a implicar que para su uso y tratamiento sean necesarios mayores requerimientos, con el fin de lograr su potencial potabilización.

Se observaron zonas donde los niveles de pH son bajos y los niveles de conductividad son altos, como es el caso de los municipios de La Jagua de Ibirico, Chiriguaná y El Paso. Estas fuentes de agua, de acuerdo con la información de campo, suelen ser empleadas para el consumo humano y otros usos, como los industriales, pecuarios y agrícolas, sin tener en consideración los límites permisibles según la normatividad nacional para su uso.

Las diferencias detectadas entre los datos históricos del 2020 y las muestras de validación con resultados medidos en campo y laboratorio en 2024, evidencian la necesidad de implementar programas de monitoreo periódicos, que permitan detectar cambios en la calidad del agua, teniendo en cuenta las distintas épocas del año en la región, con el fin de tomar decisiones informadas con respecto a la gestión de los acuíferos en la zona.

Esta investigación demuestra que el uso de métodos de interpolación espacial puede ser una herramienta eficaz para apoyar la toma de decisiones frente a las limitaciones de los muestreos intensivos, siempre y cuando se valide con información de datos de campo y la rigurosidad de los resultados obtenidos.

## CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

**Autor 1:** metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, revisión, borrador original.

**Autor 2:** investigación, conceptualización, análisis de datos, escritura, revisión y edición. **Autor 3:** logística, revisión y edición.

**Autor 4:** análisis de datos, revisión y edición.

**Autor 5:** metodología, investigación, escritura, revisión y edición.



## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencias, Tecnología e Innovación (Min-ciencias) y al Icetex por el apoyo económico recibido en la convocatoria N.º 890 - Convocatoria para el fortalecimiento de CTel en Instituciones de Educación Superior, y a las

universidades (Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, Instituto Tecnológico Metropolitano y Universidad Popular del Cesar), por los recursos académicos, técnicos y logísticos para el desarrollo del proyecto.

## FINANCIAMIENTO

Este artículo es producto de los recursos destinados para el desarrollo de actividades investigativas dentro de la convocatoria N.º 890 - Convocatoria para el fortalecimiento de CTel en Instituciones de Educación Superior, del proyecto “Estrategias para el

estudio y monitoreo de aguas subterráneas, mediante el uso de herramientas técnicas y tecnológicas integradas a sistemas IoT en zonas de influencia del corredor minero del departamento del Cesar”

## USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica.

## CONFLITO DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## LITERATURA CITADA

- Appelo, C.A.J. & Postma, D. (2004). Geochemistry, groundwater and pollution, second edition. *Geochemistry, Groundwater and Pollution, Second Edition*, 1-649. <https://doi.org/10.1201/9781439833544/GEO-CHEMISTRY-GROUNDWATER-POLLUTION-APPELO-DIEKE-POSTMA>
- Belmonte, S., López, E. de las M., & García, M. de los Á. (2021). Identificación de áreas prioritarias para la gestión del agua en el Chaco salteño, Argentina. *Agua y territorio = Water and Landscape*, 17, 7-32., <https://doi.org/10.17561/at.17.4868>
- Corpocesar. (2014). *Plan de ordenamiento del recurso hídrico del río Cesar*.
- Corpocesar. (2018). *Formulación del plan de manejo ambiental del sistema acuífero Cesar*.
- Corpocesar & Fucolde. (2019). *Actualización y caracterización de inventario de puntos de agua en áreas priorizadas en zonas potenciales para el desarrollo de proyectos de exploración y producción de Hidrocarburos en la Jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del César - Corpocesar, en la cuenca Cesar – Ranchería*.
- Gómez, A. y Capachero, C. (2008). *Evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación en el departamento del cesar, aplicando la metodología Drastic. Valledupar, Colombia*.
- Gómez Delgado, M. & Barredo Cano, J. (2005). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio* (RA-MA, Ed.; 2a ed.).
- Hounslow, A. W. (2018). Water quality data: Analysis and interpretation. *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*, 1-398. <https://doi.org/10.1201/9780203734117/WATER-QUALITY-DATA-ARTHUR-HOUNSLOW/ACCESSIBILITY-INFORMATION>
- Ideam. (2013). *Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas*. Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/MEMORIAS-MAPA-ZONIFICACION-HIDROGRAFICA.pdf>
- Ideam. (2015). Estudio Nacional del Agua - 2014. . [https://www.andi.com.co/Uploads/ENA\\_2014.pdf](https://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2014.pdf)
- Ideam. (2018). *Guía para la Toma de Muestras de Agua. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Colombia*. [https://corpouraba.gov.co/wp-content/uploads/2.-PROTOCOLO\\_MONITOREO\\_AGUA\\_IDEAM.pdf](https://corpouraba.gov.co/wp-content/uploads/2.-PROTOCOLO_MONITOREO_AGUA_IDEAM.pdf)
- Ideam. (2019). *Guía para la Acreditación de Laboratorios de Monitoreo de Calidad del Agua..* <https://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/acreditacion-laboratorios>
- Inocencio-Flores, D., Velázquez-Machuca, M. A., Pimentel-Equihua, J. L., Montañez-Soto, J. L. y Venegas-González, J. (2013). Hidroquímica de las aguas subterráneas de la cuenca del río Dueño y normatividad para uso domés-

- tico. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(5), 111-126. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222013000500008&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000500008&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Martínez-Vargas, A. & Ramírez-García, J. (2005). Present development of geostatistics in the world. *Minería y Geología*, 21(4), 1-22. <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223516052001.pdf>
- Montero, J. M., Fernández-Avilés, G. & Mártil, P. (2015). Functional Kriging Prediction of Pollution Series: The Geostatistical Alternative for Spatially-Fixed Data. *Estudios de Economía Aplicada*, 201533(1), 145-174. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5117531&info=resumen&idioma=ENG>
- Paz, L., Diego, S., Liliana Vence Márquez, C., Rivera González, M., Osorio Bayter, Y. y Beatriz Castillo Sarabia, A. (2012). Caracterización microbiológica y físico-química de aguas subterráneas de los municipios de La Paz y San Diego, Cesar, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 3(2), 27-35. <https://doi.org/10.22490/21456453.953>
- Pérez Hernández, H. & Pérez Sato, M. (2023). Does the oil palm (*Elaeis guineensis*) generate a negative impact on the soil? A review. *Agronomía Mesoamericana*, 34(1), 50301-50301. <https://doi.org/10.15517/AM.V34I1.50301>
- Rangel Sotter, A. P., Alber Hamersson Sánchez Ipia, Willington Libardo Siabato Vaca y John William Cely Pulido. (2002). Geoestadística aplicada a estudios de contaminación ambiental. *Ingeniería*, 7(2), 31-38. <https://doi.org/https://doi.org/10.14483/23448393.2815>
- Stumm, Werner. & Morgan, J. J. (1996). *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters* (3a. ed.). Wiley. <https://search.worldcat.org/title/31754493>
- Villarreal-Macés, S. G. y Díaz-Viera, M. A., (2018). Estimación geoestadística de la distribución espacial de la precipitación media mensual y anual en Nuevo León, México (1930-2014). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(5), 106-130. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2018-05-05>
- Villatoro, M., Henríquez, C. y Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW Y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 95-105. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43632109>

**Conflicto de intereses**

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



**Licencia de Creative Commons**

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

