Interpolación espacial del Índice de Calidad del Agua en el departamento del Quindío basada en Kriging Simple y Kriging Ordinario

Juan Sebastián Martínez Cortés

Propuesta de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de

Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Línea de Investigación

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2024

Resumen

Este trabajo de investigación se realizó con base en la necesidad de tener un insumo que permita estimar la calidad del recurso hídrico superficial del departamento del Quindío en su conjunto, teniendo en cuenta la continuidad espacial de los resultados obtenidos del Índice de Calidad del Agua – ICA en las mediciones realizadas en las estaciones de monitoreo de calidad del agua. El departamento cuenta con una red de monitoreo diseñada por la Corporación Autónoma Regional del Quindío, en asociación con la Universidad Tecnológica de Pereira, la cual se compone de 102 estaciones instaladas a lo largo del territorio. Estas estaciones aportan resultados acerca de parámetros de calidad del agua medidos discretamente en la ubicación de las estaciones. Sin embargo, en los informes de seguimiento al cumplimiento de objetivos de calidad, la continuidad de los resultados solo se da de manera unidimensional, a lo largo de los respectivos cauces. El objetivo de este estudio es generar, a partir de la aplicación de los métodos de interpolación de Kriging Simple y Kriging Ordinario, una superficie continua que represente el valor del Índice de Calidad del Agua – ICA en el dominio espacial del departamento del Quindío y comparar los resultados obtenidos por ambos métodos a través del uso de la técnica de validación cruzada de la raíz del error cuadrático medio. El presente estudio considera los resultados obtenidos en las estaciones de monitoreo en el año 2021.

Palabras clave: Recurso Hídrico Superficial, Estaciones de monitoreo, Índice de Calidad del Agua, Kriging Simple, Kriging Ordinario, Continuidad Espacial, Validación Cruzada.

Abstract

This research work was carried out based on the need to have an input that allows estimating the quality of the surface water resource of the department of Quindío as a whole, considering the spatial continuity of the results obtained from the Water Quality Index – WQI in measurements made at water quality monitoring stations. The department has a monitoring network designed by the Regional Autonomous Corporation of Quindío, in association with the Technological University of Pereira, which is made up of 102 stations installed throughout the territory. These stations provide results about water quality parameters measured discretely at the station locations. However, in the monitoring reports on the fulfillment of quality objectives, the continuity of the results only occurs in a unidimensional manner, along the respective channels. The objective of this study is to generate, from the application of the interpolation methods of Simple Kriging and Ordinary Kriging, a continuous surface that represents the value of the Water Quality Index – WQI in the spatial domain of the department of Quindío and to compare the results obtained by both methods using the root mean square error cross-validation technique. The present study considers the results obtained at the monitoring stations in 2021.

Keywords: Surface Water Resource, Monitoring Stations, Water Quality Index, Simple Kriging, Ordinary Kriging, Spatial Continuity, Cross Validation.

Contenido

Pág.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN 7

1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA 8
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 10
1.3 JUSTIFICACIÓN 11

2. OBJETIVOS 14

2.1 OBJETIVO GENERAL 14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 14

3. ANTECEDENTES 15

4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL 19

5. REFERENTE TEÓRICO 21

5.1 CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL 21
5.2 ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA – ICA 22
5.3 INTERPOLACIÓN ESPACIAL 25
5.4 ERROR MEDIO ABSOLUTO – ME 26
5.5 RAÍZ DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO – RMSE 27
5.6 KRIGING 28
5.7 REGLA DE STURGES 29

6. METODOLOGÍA 30

6.1 ENFOQUE METODOLÓGICO 31
6.2 TIPO DE ESTUDIO 32
6.3 PROCEDIMIENTO 32
6.3.1 Fase 1 – Recopilación y normalización de datos 32
6.3.2 Fase 2 – Análisis exploratorio de datos 42
6.3.3 Fase 3 – Aplicación de métodos de interpolación 54

7. RESULTADOS 62

7.1.1 Cartografía generada a partir de la interpolación con Kriging Simple 62
7.1.2 Cartografía generada a partir de la interpolación con Kriging Ordinario 63
7.1.3 Comparación de resultados 63

8. CONCLUSIONES 64

9. RECOMENDACIONES 65

10. BIBLIOGRAFÍA 66

11. ANEXOS 74

Lista de figuras

Pág.

Figura 1 9
Figura 2 11
Figura 3 31
Figura 4 39
Figura 5 40
Figura 6 41
Figura 7 42
Figura 8 43
Figura 9 44
Figura 10 47
Figura 11 49
Figura 12 50
Figura 13 52
Figura 14 53
Figura 15 54
Figura 16 55
Figura 17 56
Figura 18 57
Figura 19 57
Figura 20 58
Figura 21 59
Figura 22 60
Figura 23 60
Figura 24 62
Figura 25 63

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1 23
Tabla 2 25
Tabla 3 34
Tabla 4 45
Tabla 5 46
Tabla 6 48
Tabla 7 61
Tabla 8 62
Tabla 9 64

1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

El agua es fundamental para la vida en el planeta. Todos los organismos vivos necesitan agua para vivir, algunos en mayor o menor proporción que otros. Adicionalmente, el agua es la base del funcionamiento de la civilización humana. No solamente es esencial para la vida de las personas, sino que es la base de todos los procesos que soportan las actividades de sustento diario. La oferta hídrica del planeta está disponible en diferentes formas: océanos, ríos, glaciares, vapor, acuíferos, entre otras. Dependiendo de las condiciones locales, cada grupo poblacional accede a una u otra forma en la que este recurso tiene su oferta. El recurso hídrico superficial es la forma más explotada de todo el recurso hídrico del planeta por parte de los seres vivos que lo habitan. Sin embargo, no basta solamente con tener acceso al agua. El recurso hídrico superficial es susceptible a variar sus condiciones de calidad, tanto por factores naturales como antropogénicos. La calidad del agua se estima a partir de la medición de parámetros físicos, químicos y biológicos que describen la capacidad que tiene una muestra de agua en particular para satisfacer las necesidades de demanda (consumo humano, industrial, agrícola, etc.). Las actividades antropogénicas tienden a afectar, en mayor o menor medida, la calidad de la oferta hídrica superficial disponible en una zona en particular. Por lo anterior, es fundamental que las autoridades ambientales de los distintos países realicen monitoreos constantes del recurso hídrico superficial en sus áreas de jurisdicción. Existen diferentes formas para llevar a cabo estos monitoreos, entre las cuales destaca el uso de estaciones en terreno, las cuales permiten conocer parámetros de calidad en un punto específico, de forma discreta. Sin embargo, en los casos en los

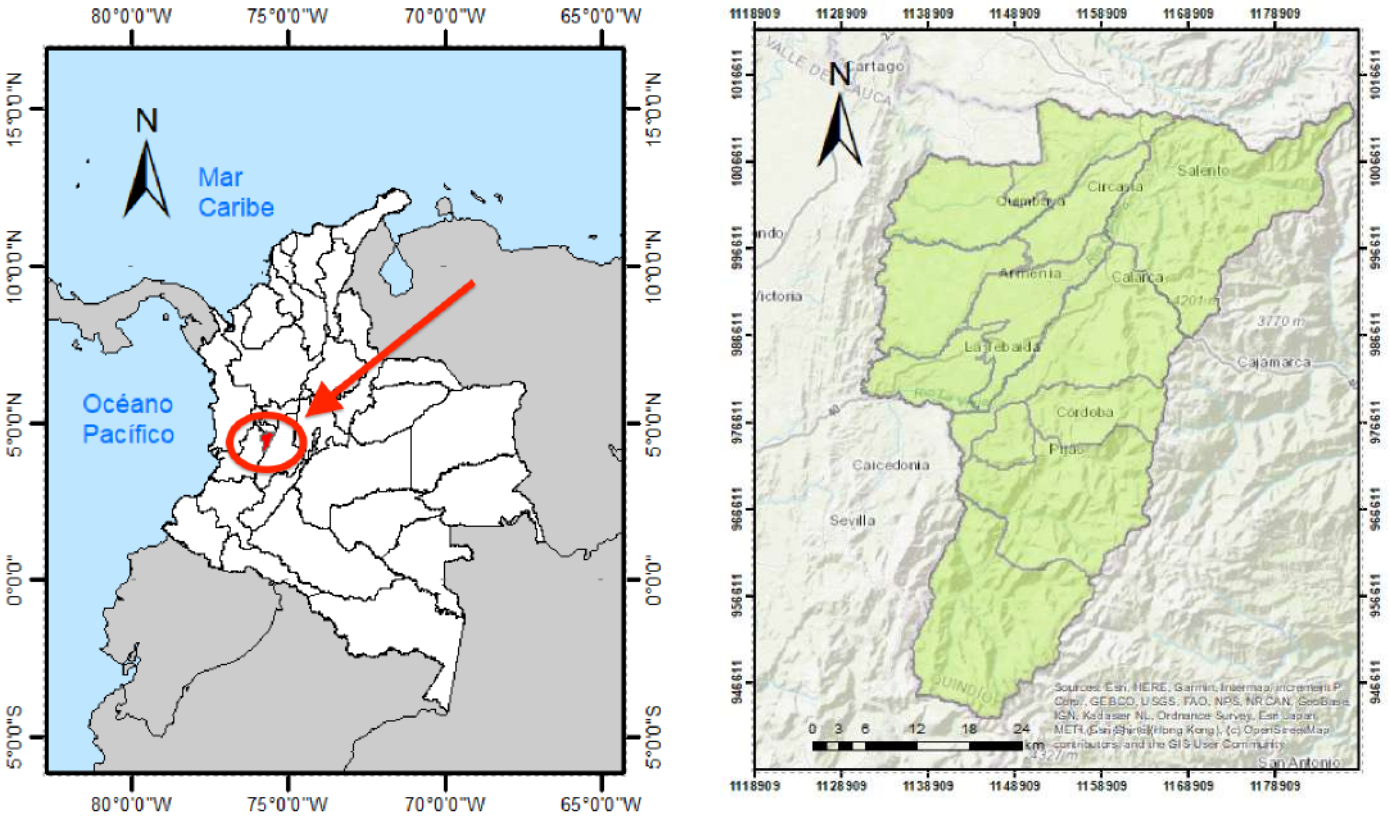
que se desee estimar el valor de uno de estos parámetros en un punto donde no se cuente con una estación de monitoreo instalada, se deberán tener en cuenta los resultados obtenidos en las estaciones existentes y determinar el valor del punto de interés a partir del relacionamiento espacial que existe entre y los puntos con valores conocidos.

1.1 Descripción del área problemática

El departamento del Quindío es una subdivisión administrativa ubicada en la zona centro-occidental de Colombia. Es uno de los 32 departamentos que conforman la República de Colombia. Su capital es el municipio de Armenia. Cuenta con una población aproximada de 543,532 personas, de las cuales el 87 % de la población vive en las cabeceras urbanas y el 13 % en zonas rurales (Gobernación del Quindío, 2024).

Figura 1

Ubicación del departamento del Quindío



Fuente: elaboración propia

El departamento del Quindío, en su conjunto, hace parte de la cuenca hidrográfica del río La Vieja, de la que también hacen parte algunas zonas de los departamentos de Valle del Cauca y Risaralda. Dentro del departamento, existen diversos cuerpos de agua superficiales, de los cuales todos hacen parte de la misma cuenca. Entre los cuerpos de agua superficiales del departamento destacan el río Quindío, el río Roble, el río Santo Domingo y el río Barragán. Se tiene además una serie de drenajes de menor caudal que, en conjunto con los anteriormente mencionados, hacen parte de la cuenca del río La Vieja.

En Colombia, para la gestión y conservación del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, se creó el Sistema Nacional Ambiental – SINA, a partir de la Ley 99 de 1993. En dicha normatividad, se estableció la creación de las Corporaciones Autónomas Regionales como autoridades ambientales encargadas por la ley de administrar, dentro del área de su jurisdicción, el medio ambiente y los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible, de conformidad con las disposiciones legales y las políticas del Ministerio del Medio Ambiente. Para el caso del departamento del Quindío, se creó la Corporación Autónoma Regional del Quindío – CRQ (Ley 99 de 1993).

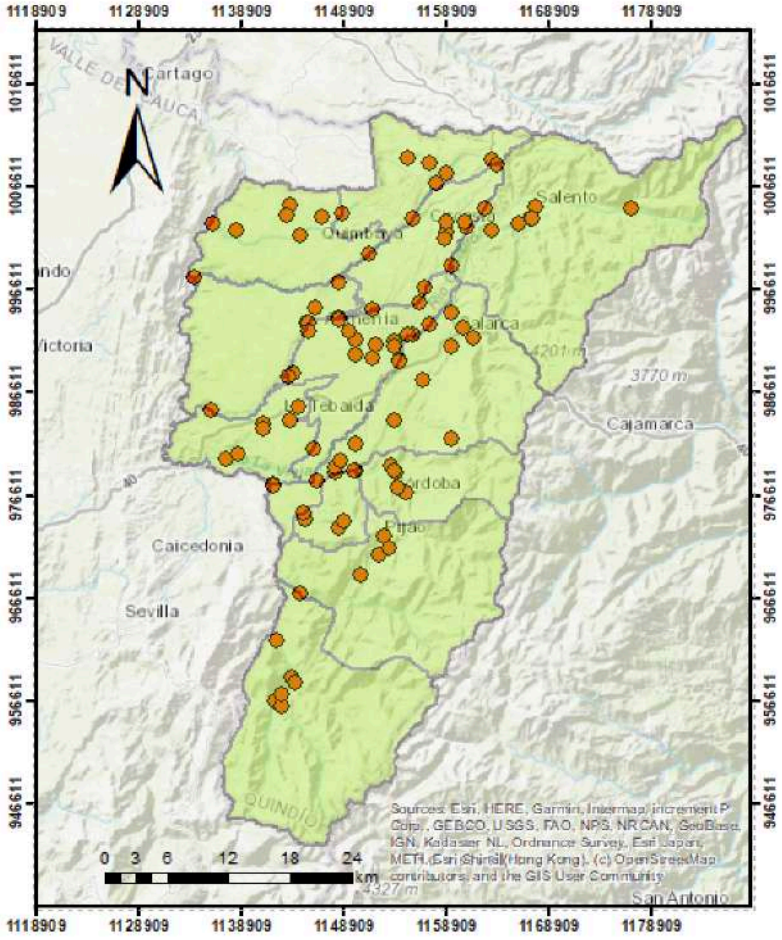
1.2 Formulación del problema

La Corporación Autónoma Regional del Quindío – CRQ, en asociación con la Universidad Tecnológica de Pereira – UTP, a través del Convenio Interadministrativo No. 002 de 2021 CRQ-UTP, diseñó la Red de Monitoreo de las Fuentes Hídricas Principales con Objetivos de Calidad en el Departamento del Quindío.

Esta red está compuesta por 102 estaciones de monitoreo, distribuidas geográficamente a lo largo del departamento. Se encuentran ubicadas sobre 51 tramos de diferentes cuerpos de agua, a los cuales, a través de actos administrativos, la CRQ les definió objetivos de calidad en diferentes horizontes de tiempo. El diseño de esta red obedeció a parámetros técnicos, estipulados en el documento del convenio.

Figura 2

Distribución espacial de las estaciones de monitoreo de calidad del agua en el departamento del Quindío



Fuente: elaboración propia

1.3 Justificación

La Corporación Autónoma Regional del Quindío, a partir de los resultados obtenidos en las estaciones que componen la Red de Monitoreo de Calidad del Agua, genera anualmente un

reporte de resultados acerca de la calidad del recurso hídrico en el departamento, midiendo un conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos. Adicionalmente, a partir de los resultados obtenidos en la medición de seis de estos parámetros, se calcula el Índice de Calidad del Agua – ICA, utilizando una metodología propuesta por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.

El ICA es el valor numérico que califica en una de cinco categorías la calidad del agua de una corriente superficial, con base en las mediciones obtenidas para un conjunto de cinco o seis variables, registradas en una estación de monitoreo j en el tiempo t (Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua, Versión 1,00).

En cada reporte de resultados, la Corporación Autónoma Regional del Quindío presenta los datos obtenidos en las estaciones de monitoreo de 20 parámetros, en la mayoría de los casos. En algunas ocasiones, hay estaciones que no reportan la medición de algunos parámetros, en la medida en que se presentan dificultades durante el proceso de toma o traslado de muestras. Los parámetros medidos en cada estación son pH, Temperatura, Conductividad Eléctrica, Caudal, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Sólidos Suspendidos Totales, Nitrógeno Total, Amoniaco, Nitratos, Nitritos, Oxígeno Disuelto, Coliformes Totales, Coliformes Fecales, Grasas y Aceites, Plomo, Cromo, Níquel, Mercurio y Fósforo.

De acuerdo a la metodología planteada por el IDEAM en la Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua, para el cálculo del ICA se deben tener en cuenta los siguientes parámetros: Oxígeno Disuelto, Sólidos Suspendidos Totales, Demanda Química de Oxígeno, NT/PT (relación entre Nitrógeno Total y Fósforo Total), Conductividad Eléctrica y pH. Se tiene entonces que, en cada punto discreto correspondiente a cada estación de monitoreo, es posible conocer los resultados del ICA calculado.

Lo anterior es útil para conocer los resultados de forma discreta en cada estación, y sirve también para evaluar la variación del ICA a lo largo de los cauces que contienen a las respectivas estaciones. Sin embargo, en el informe de resultados aportado por la Corporación Autónoma Regional del Quindío, no se cuenta con un análisis a nivel de cuenca hidrográfica que permita estimar el valor del ICA en algún punto que no esté comprendido dentro de los tramos que conforman los cauces que contienen las estaciones de monitoreo. Lo anterior resultaría útil en la medida en que no todas las corrientes de agua superficiales del departamento hacen parte de los cauces monitoreados, por lo que contar con este insumo sería de gran utilidad para estimar, a partir de la información disponible de las estaciones de monitoreo, la variación espacial del ICA en el dominio espacial del departamento.

Para considerar la continuidad espacial de los resultados del ICA, se debe realizar un proceso de interpolación espacial. Este es un proceso que permite estimar valores de variables en puntos geográficos donde no se conoce dicho valor, a partir de valores conocidos en puntos geográficos alrededor. El resultado es una superficie continua en la que cada punto del espacio representa un valor de la variable interpolada. Los métodos de interpolación espacial se dividen entre determinísticos y geoestadísticos. A partir del análisis de antecedentes realizado, se determinó que, para casos similares al objeto de estudio de esta investigación, los métodos geoestadísticos generan mejores predicciones para las variables interpoladas. En esta investigación, se utilizarán los métodos de Kriging Simple y Kriging Ordinario para generar una superficie continua que represente el valor del ICA a en el dominio espacial del departamento del Quindío. Estos métodos hacen parte de la clasificación de métodos geoestadísticos y, de acuerdo con la investigación de antecedentes realizada, han sido ampliamente utilizados para estimar la continuidad de variables asociadas a la calidad del recurso hídrico.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Aplicar los métodos de interpolación de Kriging Simple y Kriging Ordinario con el fin de estimar la variación espacial del Índice de Calidad del Agua en el departamento del Quindío a partir de los resultados obtenidos en 2021 en las estaciones que conforman la Red de Monitoreo de Calidad del Agua.

2.2 Objetivos específicos

- Solicitar a la Corporación Autónoma Regional del Quindío los resultados de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Agua y estandarizar la información en formato Shapefile con el fin de facilitar la aplicación de los modelos de interpolación.

- Realizar un análisis exploratorio de datos a partir de técnicas de visualización y estadística descriptiva con el fin de obtener los parámetros que permitan una calibración adecuada de los modelos de interpolación.

- Aplicar los métodos de Kriging Simple y Kriging Ordinario con los parámetros definidos en el análisis exploratorio de datos para el ICA, comparar los resultados utilizando técnicas de validación cruzada y generar la cartografía de variación espacial con cada método.

3. Antecedentes

Diversos estudios se han llevado a cabo alrededor de distintos países con el objetivo de estimar parámetros e índices de calidad del agua en fuentes hídricas, tanto superficiales como subterráneas, a nivel de cauce y a nivel de cuenca. En estas investigaciones se han empleado distintas metodologías, considerando diferentes herramientas de análisis estadístico y modelos de interpolación espacial.

En la investigación realizada por Mohsin Khan et al. (2023), "Spatial interpolation of water quality index based on Ordinary kriging and Universal kriging", se tomaron 26 muestras de agua superficial en una zona comprendida dentro de la cuenca alta del río Swat, provincia de Khyber – Pakhtunkhwa, Pakistán, la cual incluye los distritos de Swat, Lower Dir y Upper Dir, con el fin de evaluar la variación espacial de un índice de calidad del agua superficial calculado a partir de la medición de 18 parámetros en cada punto de muestro, a lo largo del área de estudio. Se utilizaron los métodos de interpolación de Kriging Ordinario y Kriging Universal para elaborar las superficies continuas representativas del valor de la variable de interés y los resultados de cada método se compararon utilizando la técnica de validación cruzada de la raíz del error cuadrático medio. Este estudio fue realizado a nivel de cuenca, al igual que la investigación realizada por Singh, R. et al (2023) "Assessing the impacts of industrial

wastewater on the inland surface water quality: An application of analytic hierarchy process (AHP) model-based water quality index and GIS techniques", en la que se tomaron muestras de agua superficial en seis puntos ubicados estratégicamente en el clúster industrial de Kashipur, ubicado en el estado de Uttarakhand, India, con el objetivo de evaluar la calidad del estado de este recurso a partir de la medición de diez parámetros fisicoquímicos y el cálculo de un índice de calidad. Los resultados se sometieron a un proceso de interpolación espacial utilizando la técnica de Kriging Ordinario. Este mismo método de interpolación fue aplicado también por Masood, A. et al (2021), en su investigación denominada "Integrating water quality index, GIS and multivariate statistical techniques towards a better understanding of drinking water quality", en la que se tomaron 25 muestras de agua subterránea, distribuidas a lo largo del distrito de Mewat, perteneciente al estado de Haryana, India. En cada muestra se midieron diez parámetros fisicoquímicos con el objetivo de calcular dos índices de calidad del agua asociados a la utilización para el consumo. El Kriging Ordinario también fue utilizado en la investigación realizada por Chatterjee, R. S. et al (2019), "Analysis of Water Quality Parameters and Their Variation for Surface Water Using GIS-Based Tools", en la que se midió, aplicando un enfoque espacial, la variación de calidad del agua antes y después de la realización de los festivales de Ganesh y Durga Puja en el lago Futala, el cual se encuentra ubicado cerca de la ciudad de Nagpur, India. Se tomaron, de tres puntos de muestro, dos muestras de agua, antes y después de la festividad mencionada. Para cada muestra se midieron once parámetros de calidad para analizar su variación.

Se han aplicado también otras técnicas de interpolación espacial para estimar parámetros e índices de calidad del agua en fuentes hídricas, entre las que destaca la Interpolación Ponderada por Distancia Inversa – IDW. En la investigación realizada por Azhari, H.E. et al (2022),

"Assessment of Surface Water Quality Using the Water Quality Index (IWQ), Multivariate Statistical Analysis (MSA) and Geographic Information System (GIS) in Oued Laou Mediterranean Watershed, Morocco", se establecieron trece puntos de muestreo de aguas superficiales en la cuenca del río Oued Laou, Marruecos, en los cuales se tomaron tres muestras en cada uno. Para cada muestra tomada se evaluaron 26 parámetros con el objetivo de calcular un Índice de Calidad del Agua – WQI, de acuerdo a los estándares de la Organización Mundial de la Salud – WHO, y un Índice de Calidad del Agua para Irrigación – IWQI, ajustado a las condiciones locales. Otro caso corresponde a la investigación realizada por Dheeraj, V. P. et al (2023) "Assessment of surface and ground water quality around Korba Coalfield, India: an integrated approach of water quality index, multivariate statistics analysis and GIS technique", en la que se evaluó la calidad del recurso hídrico en el área de influencia directa de la mina de carbón de Korba, India. Se tomaron 52 muestras (36 subterráneas y 16 superficiales), en las que se midieron 12 parámetros en cada una. A partir de los resultados obtenidos, se determinó un índice de calidad para cada punto de muestreo. Destaca también la investigación realizada por Loaiza, J.G. et al. (2021), "Assessment of Water Quality in a Tropical Reservoir in Mexico: Seasonal, Spatial and Multivariable Analysis", en la que se analizó la calidad del agua del embalse Adolfo López Mateos (ALM), ubicado en el estado de Sinaloa, México, a partir de la medición de 23 parámetros medidos en cuatro puntos de muestro entre 2012 y 2019.

Otras investigaciones han comparado los resultados obtenidos a partir de la utilización de diferentes modelos de interpolación. En la investigación realizada por Ahmad, A. Y. et al. (2021), "Comparison GIS-Based interpolation methods for mapping groundwater quality in the state of Qatar", se tomaron muestras de agua subterránea en 41 puntos del estado de Qatar con el fin de evaluar la variabilidad espacial de distintos parámetros de calidad, utilizando diferentes

métodos de interpolación. En la investigación se determinó el método de interpolación que mejor se ajustaba a los datos de cada parámetro medido en las muestras tomadas. También es el caso de la investigación realizada por Benouara, N. et al (2024), "Evaluation of Groundwater Quality for Irrigation Purposes Using Water Quality Indices and GIS Technique: a Case Study of Seriana Plain Northeastern Algeria", en la que se tomaron muestras de agua subterránea en 12 puntos ubicados en la planicie de Seriana, ubicada al noreste de Algeria, con el fin de evaluar 13 parámetros y calcular un índice de calidad para fines de irrigación. Se tomaron muestras tanto en época de sequía como en época de lluvia para comparar los resultados. La variabilidad espacial de los parámetros medidos y del índice calculado fue determinada a partir del uso del método de Interpolación Ponderada por Distancia Inversa – IDW.

A nivel de cauce se han realizado investigaciones como la de Hassan, H. B. et al. (2023), "Impacts of seasonal variations and wastewater discharge on river quality and associated human health risks: A case of northwest Dhaka, Bangladesh", en la que se analizó el impacto que tienen los efluentes de agua residual descargados en un tramo del río Dhaleshwari, Bangladesh, en los índices de calidad del agua, índices de calidad del agua para riego e índices de riesgo para la salud humana. Los resultados se evaluaron en diferentes épocas del año con el objetivo de considerar la variación estacional y fueron sometidos a un proceso de Interpolación Ponderada por Distancia Inversa – IDW para considerar la variación espacial. También destaca la investigación realizada por Shanmugasundharam, A. et al (2023), "Water quality index (WQI), multivariate statistical and GIS for assessment of surface water quality of Karamana river estuary, west coast of India", en la que se evaluaron 21 parámetros fisicoquímicos en 20 muestras de agua superficial tomadas en el tramo final del cauce del río Karamana, India, en la zona de su estuario antes de la desembocadura al mar. A partir de los resultados obtenidos, se

calculó un Índice de Calidad del Agua para cada muestra y, utilizando la técnica de Interpolación Ponderada por Distancia Inversa – IDW, se elaboraron mapas para visualizar la distribución espacial de cada parámetro medido y del índice calculado.

4. Referente normativo y legal

La normatividad referente a la gestión del recurso hídrico en Colombia se rige desde que se expidió el Decreto No. 2811 del 18 de diciembre de 1974, por medio del cual se dictó el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. En el artículo 134 de este decreto se establece que "Corresponde al Estado garantizar la calidad del agua para consumo humano y, en general, para las demás actividades en que su uso es necesario". Posteriormente, en 1991, fue adoptada la nueva Constitución Política de la República de Colombia, en la que se establecieron principios constitucionales asociados a la protección del medio ambiente (artículos 8, 79 y 80).

Después de la promulgación de la nueva constitución, se expidió la Ley 99 de 1993, "por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones". Con la expedición de esta ley fueron creadas las Corporaciones Autónomas Regionales, las cuales, de acuerdo con el artículo 31, tienen, entre otras funciones, las siguientes: "Promover y realizar conjuntamente con los organismos nacionales adscritos y vinculados al Ministerio del Medio Ambiente, y con las entidades de apoyo técnico y científico del Sistema Nacional Ambiental (SINA), estudios e investigaciones en materia de medio ambiente y recursos naturales renovables" (numeral 7) y

"Ordenar y establecer las normas y directrices para el manejo de las cuencas hidrográficas ubicadas dentro del área de su jurisdicción, conforme a las disposiciones superiores y a las políticas nacionales" (numeral 18).

El 02 de agosto de 2012, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expidió la Resolución No. 1640, "Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones". Esta resolución, en su artículo 8, establece que: "Las autoridades ambientales competentes elaborarán las evaluaciones Regionales del Agua, que comprenden el análisis integrado de la oferta, demanda, calidad y análisis de los riesgos asociados al recurso hídrico en su jurisdicción para la zonificación hidrográfica de la autoridad ambiental, teniendo como base las subzonas hidrográficas". Posteriormente, el 26 de mayo de 2015, este mismo ministerio expidió el Decreto No. 1076, "Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible".

El 19 de septiembre de 2016, la Corporación Autónoma Regional del Quindío expidió la Resolución No. 00001489, "Por medio de la cual se fijan los objetivos de calidad del río Quindío". Esta misma entidad, el 01 de septiembre de 2020, expidió la Resolución No. 1736, "Por medio de la cual se fijan objetivos de calidad para las principales fuentes hídricas del departamento del Quindío para el período 2020 - 2030". Posteriormente, el 09 de septiembre de 2020, expidió la Resolución No. 1844, "Por medio de la cual se adopta el Plan de Ordenamiento del Recurso hídrico del río Roble y se fijan objetivos de calidad para el río Roble, quebrada Portachuelo y quebrada Cajones del departamento del Quindío".

5. Referente teórico

5.1 Calidad del Agua Superficial

De acuerdo con las Directrices para la Calidad del Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud – OMS (2011), el agua es esencial para mantener la vida, y su abastecimiento debe estar disponible para todos. La naturaleza de los estándares del agua potable puede variar a lo largo de diferentes países y regiones. No existe un enfoque único que sea aplicable de manera universal. Es importante que en la implementación de estándares se tenga en cuenta la legislación local. Es esencial que cada país considere sus necesidades y capacidades para el desarrollo de un marco regulatorio apropiado.

En el mundo, el agua superficial es la fuente principal para uso doméstico, agrícola e industrial (Khan et al. 2016). El agua superficial expuesta a influencias antropogénicas y atmosféricas es muy sensible a factores contaminantes y un problema crítico en distintos países (Sener et al. 2017). Por lo anterior, es importante realizar un adecuado monitoreo a los diferentes parámetros que describen el estado de calidad de las fuentes de agua superficiales.

Debido a que los ríos son la principal fuente de agua para los seres humanos en sus distintos propósitos, es importante protegerlos de factores de contaminación y controlarlos a partir de información confiable. Los procesos constantes de monitoreo y evaluación son clave para minimizar su deterioro en términos de calidad (Singh et al. 2005). La calidad del agua generalmente abarca características físicas, químicas, biológicas, radiológicas y estéticas (Abdul et al. 2010).

5.2 Índice de Calidad del Agua – ICA

Debido a que cada parámetro representa una característica particular del agua, y su calidad está influenciada por muchos parámetros, se han desarrollado índices adimensionales ponderados que describen la viabilidad que tiene una muestra de agua en particular para un uso específico, ponderando en una mayor medida los parámetros más importantes para dicho uso. De acuerdo con Abdul et al. 2010, un Índice de Calidad del Agua es un indicador de valor único determinado mediante la ponderación de múltiples parámetros.

En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM ha desarrollado un Índice de Calidad del Agua – ICA, el cual, de acuerdo a la Hoja metodológica del Indicador Índice de calidad del agua (2011), "es el valor numérico que califica en una de cinco categorías, la calidad del agua de una corriente superficial, con base en las mediciones obtenidas para un conjunto de cinco o seis variables, registradas en una estación de monitoreo j en el tiempo t. Los valores calculados del indicador se comparan con los establecidos en tablas de interpretación permitiéndose clasificar la calidad del agua de forma descriptiva en una de cinco categorías (buena, aceptable, regular, mala o muy mala) que a su vez se asocian a un determinado color (azul, verde, amarillo, naranja y rojo, respectivamente). La comparación temporal de la calidad del agua calificada mediante las cinco categorías y colores simplifica la interpretación, la identificación de tendencias (deterioro, estabilidad o recuperación) y la toma de decisiones por cuenta de las diferentes autoridades".

Tabla 1

Calificación de calidad del agua según los valores que tome el ICA

Categorías de valores que puede tomar el indicador	Calificación de la calidad del agua	Señal de alerta
0.00 – 0.25	Muy mala	Rojo
0.26 – 0.50	Mala	Naranja
0.51 – 0.70	Regular	Amarillo
0.71 – 0.90	Aceptable	Verde
0.91 – 1.00	Buena	Azul

Fuente: Hoja metodológica del indicador Índice de Calidad del Agua, IDEAM 2011

De acuerdo con el mismo documento, el cálculo del Índice de Calidad del Agua "corresponde a una expresión numérica agregada y simplificada surgida de la sumatoria aritmética equiponderada de los valores que se obtienen al medir la concentración de cinco o seis variables fisicoquímicas básicas en las estaciones de monitoreo que hacen parte de la Red Básica de Monitoreo de Calidad de Agua y que evalúan la calidad del agua en las corrientes superficiales. El indicador se puede calcular con un diferente conjunto de variables medidas, cuya cantidad y tipo depende de la disponibilidad de datos, de las diferentes presiones contaminantes a las cuales están sometidos los diferentes cuerpos de agua y del tipo de cuerpo de agua. Para el caso colombiano, se ha medido desde 2005, en las corrientes superficiales, un conjunto de cinco variables, a saber: oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, conductividad eléctrica y pH total. A partir de 2009, en las estaciones de la red se ha medido adicionalmente nitrógeno total y fósforo total".

El cálculo del ICA, de manera general, se hace cuatro veces al año (una vez por trimestre). A continuación, se relaciona la expresión utilizada por el IDEAM para su cálculo.

$$ICA_{njt} = \left(\sum_{i=1}^{n} W_i \cdot I_{ikjt} \right) \quad (1)$$

ICA_{njt} Es el Índice de calidad del agua de una determinada corriente superficial en la estación de monitoreo de la calidad del agua j en el tiempo t, evaluado con base en n variables.

W_i Es el ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad i.

I_{ikjt} Es el valor calculado de la variable i (obtenido de aplicar la curva funcional o ecuación correspondiente), en la estación de monitoreo j, registrado durante la medición realizada en el trimestre k, del período de tiempo t.

n Es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador; n es igual a 5, o 6 dependiendo de la medición del ICA que se selecciones.

Para el caso de las estaciones de la Red de Monitoreo de las Fuentes Hídricas Principales con Objetivos de Calidad en el Departamento del Quindío, el cálculo del ICA en las diferentes estaciones se realiza con frecuencia anual, utilizando la metodología de seis variables del IDEAM. Esta metodología asigna un factor de ponderación de cada parámetro utilizado para el cálculo del ICA, tal como se visualiza a continuación.

Tabla 2

Factor de ponderación de los parámetros utilizados para el cálculo del ICA según IDEAM

Variable	Unidad de medida	Ponderación
Oxígeno disuelto, OD.	% Saturación	0.17
Sólidos suspendidos totales, SST.	mg/l	0.17
Demanda química de oxígeno, DQO.	mg/l	0.17
NT/PT	-	0.17
Conductividad eléctrica, C.E.	µS/cm	0.17
pH	Unidades de pH	0.15

Fuente: Hoja metodológica del indicador Índice de Calidad del Agua, IDEAM 2011

De acuerdo con la Hoja metodológica del Indicador Índice de calidad del agua, IDEAM 2011, para cada variable asociada al cálculo del ICA se debe calcular un subíndice, el cual dependerá de la magnitud de cada variable y, en algunos casos, de otros factores asociados a las condiciones locales en las que se tomó la muestra de agua. Cada subíndice se multiplica por su respectivo factor de ponderación (ver Tabla 2) y de la sumatoria ponderada de todos los subíndices se obtiene como resultado el Índice de Calidad del Agua – ICA.

5.3 Interpolación Espacial

De acuerdo con Ikechukwu, M.N. et al (2017), la interpolación consiste en encontrar los valores desconocidos de una función a partir de un conjunto de valores conocidos. Estos valores

se pueden determinar a través de funciones matemáticas o funciones empíricas modeladas a partir de las observaciones o experimentos realizados. Según Tan, Q. et al (2014), la interpolación espacial es la estimación de valores de un atributo en un sitio georreferenciado a partir de mediciones realizadas en puntos alrededor del lugar de interés. Las técnicas de interpolación espacial son utilizadas para predecir valores de un atributo un sitios no medidos con el fin de generar datos espacialmente continuos (Li and Heap, 2011). Las técnicas de interpolación se dividen en dos categorías: métodos de interpolación determinística y métodos de interpolación geoestadística. “Los métodos de interpolación determinística generan superficies a partir de puntos medidos, basándose en la extensión de la similitud o en el grado de suavizado. Las técnicas de interpolación geoestadística utilizan las propiedades estadísticas de los puntos medidos. Los métodos de interpolación geoestadística cuantifican la autocorrelación espacial entre los puntos medidos y tienen en cuenta la configuración espacial de los puntos de muestra alrededor de la ubicación de predicción” (Métodos Determinísticos de Interpolación espacial—ArcGIS Pro | Documentación, s. f.-b). De acuerdo con los resultados obtenidos en la investigación realizada por Salari et al. (2017), los métodos de interpolación geoestadística presentaron mejores resultados para predecir los valores de parámetros de calidad del agua en un dominio espacial dado.

5.4 Error Medio Absoluto – ME

El Error Medio Absoluto refleja el rango de error de predicción y proporciona una medida absoluta del tamaño del error. El cálculo del Error Medio Absoluto está dado por la siguiente expresión (Khounı et al. 2021):

$$ME = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)\right) \quad (2)$$

ME Es el error medio absoluto.

N Es el número de muestras.

$\hat{Z}(x_i)$ Es el valor predicho.

$Z(x_i)$ Es el valor observado.

5.5 Raíz del Error Cuadrático Medio – RMSE

La Raiz del Error Cuadrático Medio – RMSE indica la precisión del análisis espacial en el sistema de información geográfica y refleja tanto la sensibilidad como el extremo del valor predicho. La Raíz del Error Cuadrático Medio está dada por la siguiente expresión (Khounı et al. 2021):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)\right)^2} \quad (3)$$

RMSE Es la Raiz del Error Cuadrático Medio.

N es el número de muestras.

$\hat{Z}(x_i)$ Es el valor predicho.

$Z(x_i)$ Es el valor observado.

5.6 Kriging

Para el presente estudio, y de acuerdo con los resultados obtenidos por Salari et al. (2017), se optó por utilizar el método de interpolación geoestadística de Kriging. Este método, al igual que los métodos determinísticos, genera una superficie a partir de un conjunto de puntos dispersos en un dominio espacial conocido, cada uno con un valor z determinado. Sin embargo, a diferencia de los métodos determinísticos, los métodos geoestadísticos incluyen, dentro de sus modelos, la autocorrelación entre los puntos medidos. Esto brinda cierto grado de certeza o precisión en algunas predicciones. Para realizar una interpolación espacial por el método de Kriging, se debe seguir una serie de pasos: recopilación de datos, análisis exploratorio de datos, modelado de semivariograma, creación de superficie y (opcionalmente) exploración de la superficie de varianza (Cómo Funciona Kriging—ArcGIS Pro | Documentación, s. f.).

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i Z(s_i) \quad (4)$$

Z(si) Es el valor medido en la ubicación n.° i

λ_i = Es un peso desconocido para el valor medido en la ubicación n. ° i

s_0 Es la ubicación de la predicción.

N Es el número de valores medidos.

"En los métodos de interpolación determinísticos, el peso, λ_i, depende solamente de la distancia a la ubicación de la predicción. Sin embargo, con el método kriging, las ponderaciones

están basadas no sólo en la distancia entre los puntos medidos y la ubicación de la predicción, sino también en la disposición espacial general de los puntos medidos". (Cómo Funciona Kriging—ArcGIS Pro | Documentación, s. f.).

Para el caso particular de este estudio, se pretende aplicar los modelos de Kriging Simple y Kriging Ordinario. "El Kriging Simple presupone que la tendencia determinística de los datos es conocida, mientras que el Kriging Ordinario parte de la base de que esta se desconoce. Sin embargo, el Kriging Ordinario se utiliza cuando se observa que los datos siguen una tendencia aparente pero no es posible determinarla con exactitud". (¿Qué Distintos Modelos de Kriging Existen? —ArcGIS Pro | Documentación, s. f.).

5.7 Regla de Sturges

Es una regla práctica propuesta por Herbert Sturges en 1926 que sirve para estimar el número óptimo de clases que se deben tener en cuenta para elaborar un histograma (Wikipedia, 2024). La Regla de Sturges está dada por la siguiente expresión:

$$c = 1 + log_2(M) \tag{5}$$

c Es el número óptimo de clases

M Es el número de muestras de la muestra

El valor calculado se debe redondear a un número entero. La regla es que, si el resultado previo al entero es par, se redondea hacia arriba, de lo contrario, se redondea hacia abajo. La idea

es que el número de clases siempre sea impar para poder ver la acumulación cerca de la media en una distribución normal (Wikipedia, 2024).

6. Metodología

Se realizó una consulta a la Corporación Autónoma Regional del Quindío con el fin de obtener la información relacionada con el objeto de la presente investigación. Inicialmente, se solicitaron los resultados actualizados de los últimos monitoreos realizados en la Red de Monitoreo de las Fuentes Hídricas Principales con Objetivos de Calidad en el Departamento del Quindío. Como respuesta, se recibió la información correspondiente al año 2021, toda vez que la autoridad ambiental, en su oficio de respuesta, manifestó que esta fue la última vigencia en la que fue posible realizar el monitoreo de la totalidad de las estaciones que componen la red. Una vez recibida la información, se organizó en una hoja de cálculo en el programa Microsoft Excel, y se normalizaron los datos que, posteriormente, fueron utilizados para la generación de un archivo Shapefile. La tabla de atributos de este archivo Shapefile contiene la información correspondiente a cada estación de medición. Cada estación corresponde a un registro en la tabla. Cada registro es un punto y, entre sus campos, hay información asociada a su ubicación geográfica (municipio y coordenadas), nombre de la estación, fecha de monitoreo, valores del ICA y clasificación del ICA de acuerdo a la metodología del IDEAM.

Una vez generado este archivo Shapefile, se procedió a realizar un análisis exploratorio de los datos correspondientes a los valores del ICA en cada estación de monitoreo. Se utilizaron herramientas como el histograma, el mapa de Voronoi, el análisis de tendencias y el semivariograma. Lo anterior con el fin de determinar los parámetros que garantizaran una mejor

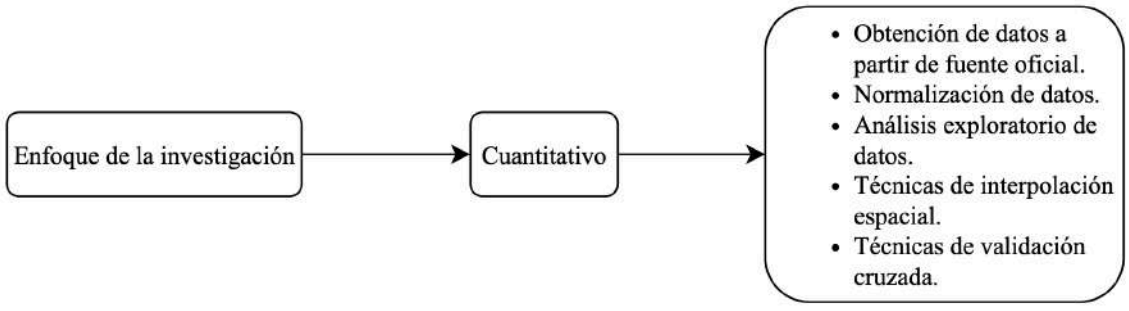
calibración de los modelos de interpolación a realizar. Posteriormente, utilizando los parámetros obtenidos en el análisis exploratorio de datos, se generaron modelos de interpolación por Kriging Simple y Kriging Ordinario. El resultado fue una capa raster que describe un mapa de calor acerca de la distribución del ICA a lo largo del dominio espacial del departamento del Quindío. Los resultados de ambas interpolaciones se compararon a partir de las técnicas de validación cruzada Error Medio Absoluto y Raíz del Error Cuadrático Medio para determinar cuál generaba un menor error y, por lo tanto, se ajustaba mejor al fenómeno objeto de estudio.

6.1 Enfoque metodológico

El enfoque metodológico por utilizar en la presente investigación es cuantitativo. Lo anterior en función a que lo que se busca es obtener datos acerca de la distribución de una variable numérica en un dominio espacial a partir de la utilización de técnicas de geoestadística.

Figura 3

Diagrama de enfoque metodológico de la investigación



Fuente: elaboración propia

6.2 Tipo de estudio

En la presente investigación, el tipo de estudio a realizar corresponde a uno descriptivo. Lo anterior en función a que, lo que se busca, es utilizar una metodología ya aplicada y estudiada en otras investigaciones y utilizarla con una serie de datos para obtener un resultado similar. Los estudios descriptivos se limitan a registrar y observar procesos o fenómenos sin establecer relaciones causales entre ellos (Tabares P, 2023).

6.3 Procedimiento

6.3.1 Fase 1 – Recopilación y normalización de datos

Actividad 1.1. Obtención de información base por parte de la Corporación Autónoma Regional del Quindío

Se envió un derecho de petición a la Corporación Autónoma Regional del Quindío solicitando información acerca de los resultados obtenidos en las estaciones que conforman la Red de Monitoreo de las Fuentes Hídricas Principales con Objetivos de Calidad en el Departamento del Quindío. La autoridad ambiental respondió a dicha solicitud, enviando los resultados obtenidos en la vigencia del año 2021. En el oficio de respuesta, la autoridad ambiental manifiesta que este año fue la última vigencia en cual fue posible obtener resultados de la totalidad de las estaciones que conforman la red. Por lo anterior, se procedió a trabajar con los datos de este año. Como anexos al oficio de respuesta, se recibieron dos documentos PDF:

“DISEÑO DE LA RED DE MONITOREO DE LAS FUENTES HÍDRICAS PRINCIPALES CON OBJETIVOS DE CALIDAD EN EL DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO”, el cual establece los criterios tenidos en cuenta para la ubicación de las estaciones, e “INFORME TÉCNICO DE SEGUIMIENTO A LOS OBJETIVOS DE CALIDAD VIGENCIA 2021 MONITOREO DE CALIDAD DE LAS FUENTES HÍDRICAS SUPERFICIALES DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO”, el cual analiza los tramos de cauces comprendidos entre estaciones de monitoreo en la respectiva vigencia. Adicionalmente, se recibió un archivo de Microsoft Excel, el cual contiene tres tablas con los resultados obtenidos en las estaciones que conforman la red de monitoreo en la vigencia de 2021.

Actividad 1.2. Filtración y estandarización de datos

Las tablas que se encuentran en el archivo de Microsoft Exel recibido están separadas, cada una en una hoja, en función a normativas relacionadas con los objetivos de calidad de los cuerpos de agua en donde se ubican las estaciones y contienen información relacionada a otros parámetros de calidad que no son de interés para esta investigación. Por lo anterior, se procedió a generar un nuevo archivo de Microsoft Excel con las tres tablas agrupadas en una, y eliminando la información de los parámetros que no son de interés. Adicionalmente, la ubicación de las estaciones de monitoreo, que en las tablas iniciales se encontraba en formado DMS (grados, minutos y segundos), fue modificada a grados decimales para facilitar el cargue de la información en el software SIG.

Tabla 3

Valores del ICA en cada estación de la Red de Monitoreo de Calidad del Agua

NUMERO	ESTACION	FUENTE HIDRICA	MUNICIPIO	LONGITUD	LATITUD	ICA IDEAM	CLASIFICACION
1	RQuindío5	Río Quindío	Calarcá	-75.798265	4.393659	0.7160	Aceptable
2	RQuindío4	Río Quindío	Calarcá	-75.687639	4.502489	0.7609	Aceptable
3	RQuindío3	Río Quindío	Armenia	-75.660769	4.533436	0.7721	Aceptable
4	RQuindío2	Río Quindío	Salento	-75.605339	4.617272	0.7385	Aceptable
5	RQuindío1	Río Quindío	Salento	-75.483092	4.635899	0.7329	Aceptable
6	QStaRita0	Quebrada Santa Rita	Armenia	-75.691176	4.519494	0.5792	Regular
7	QStaRita1	Quebrada Santa Rita	Armenia	-75.707441	4.515972	0.6733	Regular
8	QElReposo1	Quebrada El Reposo	Armenia	-75.725099	4.507122	0.4686	Mala
9	QElReposo2	Quebrada El Reposo	Armenia	-75.781100	4.490613	0.5427	Regular
10	QQuindos1	Quebrada Los Quindos	Armenia	-75.725115	4.520865	0.6774	Regular
11	QFlorida1	Quebrada La Florida	Armenia	-75.640897	4.585262	0.7474	Aceptable
12	QFlorida2	Quebrada La Florida	Armenia	-75.676189	4.524800	0.6088	Regular
13	QSanNicolas1	Quebrada San Nicolas	Armenia	-75.679902	4.524625	0.4582	Mala
14	QHAnchas0	Quebrada Hojas Anchas	Circasia	-75.646465	4.615735	0.8162	Aceptable
15	QHAnchas1	Quebrada Hojas Anchas	Circasia	-75.664710	4.566515	0.7402	Aceptable
16	QHAnchas2	Quebrada Hojas Anchas	Circasia	-75.711311	4.547103	0.7329	Aceptable
17	QAldana1	Quebrada La Aldana	Armenia	-75.669879	4.553658	0.5039	Regular
18	QLasYeguas1	Quebrada Las Yeguas	Circasia	-75.628820	4.619193	0.6109	Regular
19	QLasYeguas2	Quebrada Las Yeguas	Circasia	-75.647810	4.609226	0.6971	Regular
20	RStoDmgo1	Río Santo Domingo	Calarcá	-75.622602	4.521812	0.7197	Aceptable
21	RStoDmgo3	Río Santo Domingo	Calarcá	-75.666283	4.485212	0.7291	Aceptable
22	RStoDmgo4	Río Santo Domingo	Calarcá	-75.692003	4.450326	0.7498	Aceptable

23	RStoDmgo5	Río Santo Domingo	Calarcá	-75.726070	4.405534	0.7455	Aceptable
24	RVerde1	Río Verde	Córdoba	-75.694964	4.409471	0.7512	Aceptable
25	RVerde3	Río Verde	Córdoba	-75.727282	4.405161	0.7205	Aceptable
26	RVerde3_1	Río Verde	Calarcá	-75.743447	4.403949	0.7427	Aceptable
27	RVerde4	Río Verde	Calarcá	-75.760522	4.396605	0.7077	Aceptable
28	QLEspañola1	Quebrada La Española	Córdoba	-75.681781	4.386236	0.7587	Aceptable
29	QLEspañola2	Quebrada La Española	Córdoba	-75.689989	4.403675	0.7427	Aceptable
30	QSiberia0	Quebrada Siberia	Córdoba	-75.689480	4.389721	0.7519	Aceptable
31	QSiberia1	Quebrada Siberia	Córdoba	-75.691864	4.405806	0.7407	Aceptable
32	QElPescador2	Quebrada El Pescador	Calarcá	-75.641325	4.543678	0.7818	Aceptable
33	QElPescador4	Quebrada El Pescador	Calarcá	-75.687198	4.501972	0.7744	Aceptable
34	QNarj1	Quebrada El Naranjal	Calarcá	-75.630827	4.531197	0.7451	Aceptable
35	QNarj2	Quebrada El Naranjal	Calarcá	-75.642391	4.514700	0.6634	Regular
36	QLaCongala2	Quebrada La Congala	Calarcá	-75.642422	4.432704	0.7723	Aceptable
37	QLaCongala4	Quebrada La Congala	Calarcá	-75.744281	4.407616	0.7506	Aceptable
38	QAgBonita0	Quebrada Agua Bonita	Calarcá	-75.726504	4.428877	0.7970	Aceptable
39	QAgBonita1	Quebrada Agua Bonita	Calarcá	-75.739621	4.413733	0.7585	Aceptable
40	RSJuan1	Río San Juan	Génova	-75.797385	4.202625	0.7625	Aceptable
41	RSJuan3	Río San Juan	Génova	-75.781876	4.223839	0.7187	Aceptable
42	RRojo1	Río Rojo	Génova	-75.778918	4.218562	0.7302	Aceptable
43	RRojo2	Río Rojo	Génova	-75.795284	4.256579	0.7398	Aceptable
44	RGris1	Río Gris	Génova	-75.791151	4.197539	0.6795	Regular
45	RGris2	Río Gris	Génova	-75.791518	4.208414	0.6418	Regular
46	QInglés0	Quebrada El Inglés	Pijao	-75.700620	4.347145	0.6824	Regular
47	QInglés1	Quebrada El Inglés	Pijao	-75.705928	4.330792	0.7508	Aceptable
48	RLejos1	Río Lejos	Pijao	-75.696160	4.337884	0.6857	Regular
49	RLejos2	Río Lejos	Pijao	-75.722139	4.313570	0.6750	Regular
50	RLejos3	Río Lejos	Pijao	-75.775203	4.297908	0.6469	Regular

51	QMargaritas1	Quebrada Las Delicias	Buenavista	-75.740536	4.355688	0.7459	Aceptable
52	QDelicias1	Quebrada Las Delicias	Buenavista	-75.770956	4.362846	0.7428	Aceptable
53	QSanJose0	Quebrada San José	Filandia	-75.661167	4.675501	0.7325	Aceptable
54	QSanJose1	Quebrada San José	Filandia	-75.679914	4.680750	0.7427	Aceptable
55	QElMudo1	Quebrada El Mudo	Salento	-75.566964	4.638042	0.7157	Aceptable
56	QElMudo4	Quebrada El Mudo	Salento	-75.570614	4.627008	0.7637	Aceptable
57	QLaCalzada3	Quebrada La Calzada	Salento	-75.571715	4.627325	0.5724	Regular
58	RBoquerón1	Río Boquerón	Salento	-75.570491	4.626928	0.7361	Aceptable
59	RBoquerón3	Río Boquerón	Salento	-75.582154	4.622989	0.7010	Aceptable
60	QAgLinda1	Quebrada Agua Linda	Quimbaya	-75.754804	4.628711	0.6527	Regular
61	QAgLinda3	Quebrada Agua Linda	Quimbaya	-75.782397	4.639808	0.7294	Aceptable
62	QBvta1	Quebrada Buenavista	Quimbaya	-75.737915	4.631237	0.7692	Aceptable
63	QBvta3	Quebrada Buenavista	Quimbaya	-75.773668	4.612846	0.7508	Aceptable
64	QBvta4	Quebrada Buenavista	Quimbaya	-75.851434	4.622812	0.7659	Aceptable
65	QMRica1	Quebrada Mina Rica	Quimbaya	-75.786212	4.631153	0.7158	Aceptable
66	QMRica2	Quebrada Mina Rica	Quimbaya	-75.829865	4.617503	0.8387	Aceptable
67	QCajMont1	Quebrada Cajones	Montenegro	-75.740211	4.571575	0.8055	Aceptable
68	QCajMont2	Quebrada Cajones	Montenegro	-75.761675	4.549663	0.7349	Aceptable
69	QCajMont3	Quebrada Cajones	Montenegro	-75.768904	4.535241	0.7724	Aceptable
70	REspejo1_S2	Río Espejo	Montenegro	-75.740871	4.539393	0.7909	Aceptable
71	REspejo2	Río Espejo	Montenegro	-75.767574	4.534964	0.6119	Regular
72	REspejo3	Río Espejo	Armenia	-75.767471	4.528222	0.4366	Mala
73	REspejo4	Río Espejo	Montenegro	-75.785563	4.487689	0.6490	Regular
74	REspejo5	Río Espejo	Montenegro	-75.852273	4.459183	0.6282	Regular
75	QArmenia1	Quebrada Armenia	Armenia	-75.740476	4.538498	0.6368	Regular
76	QCamelia0	Quebrada La Camelia	Armenia	-75.731164	4.527500	0.5091	Regular

77	QCamelia1	Quebrada La Camelia	Armenia	-75.766706	4.527831	0.6056	Regular
78	QLaPicota1	Quebrada La Picota	Buenavista	-75.735978	4.361470	0.7474	Aceptable
79	QLaPicota2	Quebrada La Picota	Buenavista	-75.771339	4.368119	0.7279	Aceptable
80	QLaPicota3	Quebrada La Picota	Calarcá	-75.798361	4.392044	0.7188	Aceptable
81	QCristales1	Quebrada Cristales	Armenia	-75.692305	4.515382	0.7310	Aceptable
82	QCristales2	Quebrada Cristales	Armenia	-75.710858	4.505041	0.4939	Mala
83	QCristales3	Quebrada Cristales	La Tebaida	-75.762908	4.424906	0.6811	Regular
84	QCristales4	Quebrada Cristales	La Tebaida	-75.839650	4.415792	0.6625	Regular
85	QLaJaramilla0	Quebrada La Jaramilla	La Tebaida	-75.776336	4.461855	0.5774	Regular
86	QLaJaramilla1	Quebrada La Jaramilla	La Tebaida	-75.806779	4.446436	0.7586	Aceptable
87	QLaJaramilla2	Quebrada La Jaramilla	La Tebaida	-75.829743	4.421011	0.8399	Aceptable
88	QLaTulia1	Quebrada La Tulia	La Tebaida	-75.784070	4.450292	0.7298	Aceptable
89	QLaTulia2	Quebrada La Tulia	La Tebaida	-75.806691	4.443037	0.7204	Aceptable
90	QPortachuelo1	Quebrada Portachuelo	Filandia	-75.605572	4.678933	0.7344	Aceptable
91	QPortachuelo2	Quebrada Portachuelo	Filandia	-75.645169	4.667417	0.7698	Aceptable
92	QPortachuelo3	Quebrada Portachuelo	Filandia	-75.654311	4.658422	0.7968	Aceptable
93	QPortachuelo4	Quebrada Portachuelo	Circasia	-75.675131	4.627642	0.7443	Aceptable
94	QCajones1	Quebrada Cajones	Salento	-75.611396	4.636206	0.7504	Aceptable
95	QCajones2	Quebrada Cajones	Circasia	-75.629372	4.624329	0.7576	Aceptable
96	QCajones3	Quebrada Cajones	Circasia	-75.645946	4.623612	0.6856	Regular
97	QCajones4	Quebrada Cajones	Circasia	-75.646537	4.624492	0.5950	Regular
98	RRoble1	Río Roble	Circasia	-75.601390	4.674026	0.6817	Regular
99	RRoble2	Río Roble	Circasia	-75.646336	4.624811	0.7767	Aceptable
100	RRoble3	Río Roble	Circasia	-75.674717	4.627653	0.8083	Aceptable

101	RRoble4	Río Roble	Circasia	-75.713367	4.596794	0.7356	Aceptable
102	RRoble5	Río Roble	Quimbaya	-75.867243	4.575550	0.6754	Regular

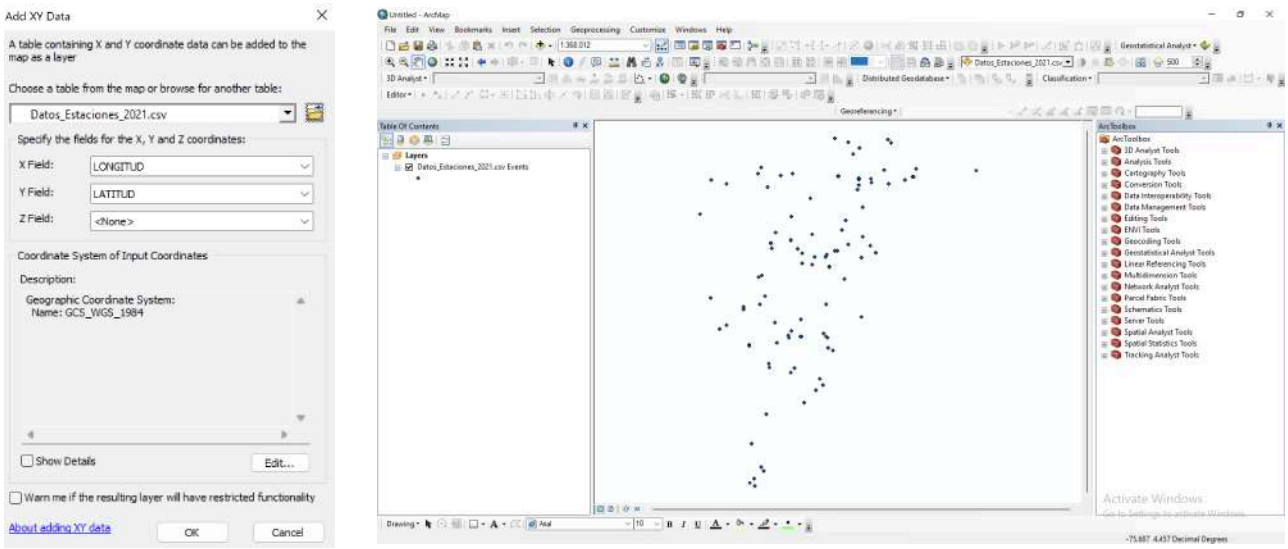
Fuente: Corporación Autónoma Regional del Quindío – CRQ

Actividad 1.3. Generación de archivo Shapefile a partir de la información obtenida y estandarizada

Una vez se tuvo la información normalizada (ver Tabla 3), se procedió a guardarla en formato CSV (*Comma Separated Values*) para facilitar su cargue en el software ArcMap versión 10.8.0.12790, utilizando la herramienta "ADD XY DATA" y las columnas LONGITUD y LATITUD como referencia en los ejes X y Y, respectivamente, y definiendo el sistema de coordenadas GCS_WGS_1984 (EPSG: 4326).

Figura 4

Cargue de datos en ArcMap

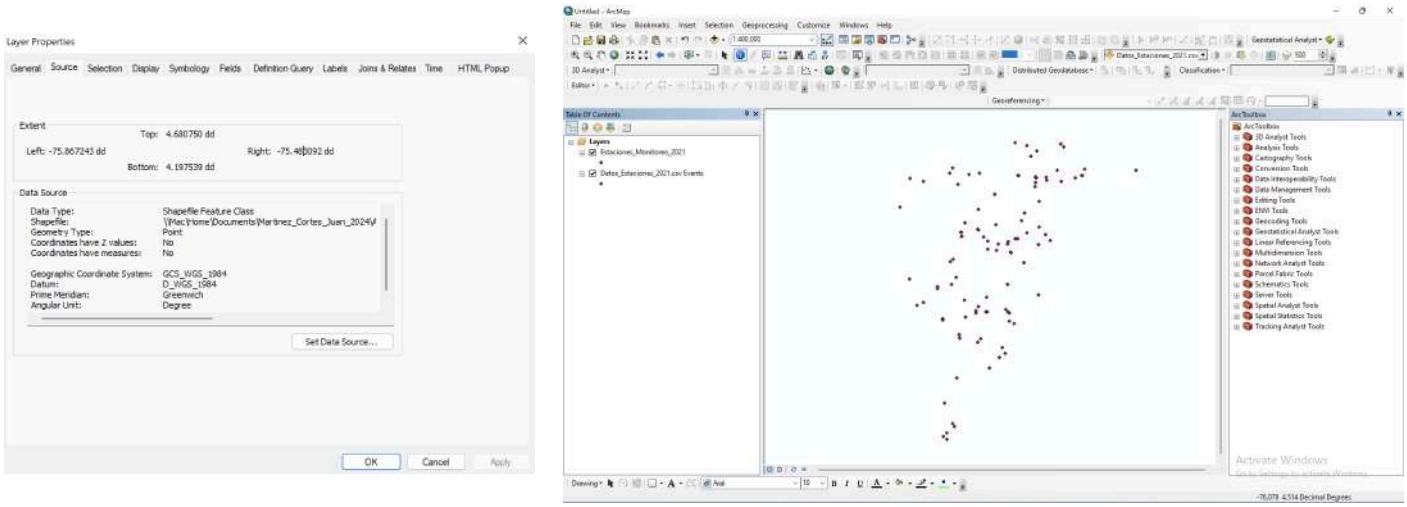


Fuente: elaboración propia.

Una vez desplegados los datos, se procedió a exportarlos en formato Shapefile. Este nuevo archivo quedó en el mismo sistema de coordenadas definido anteriormente (GCS_WGS_1984).

Figura 5

Shapefile de puntos de estaciones desplegado

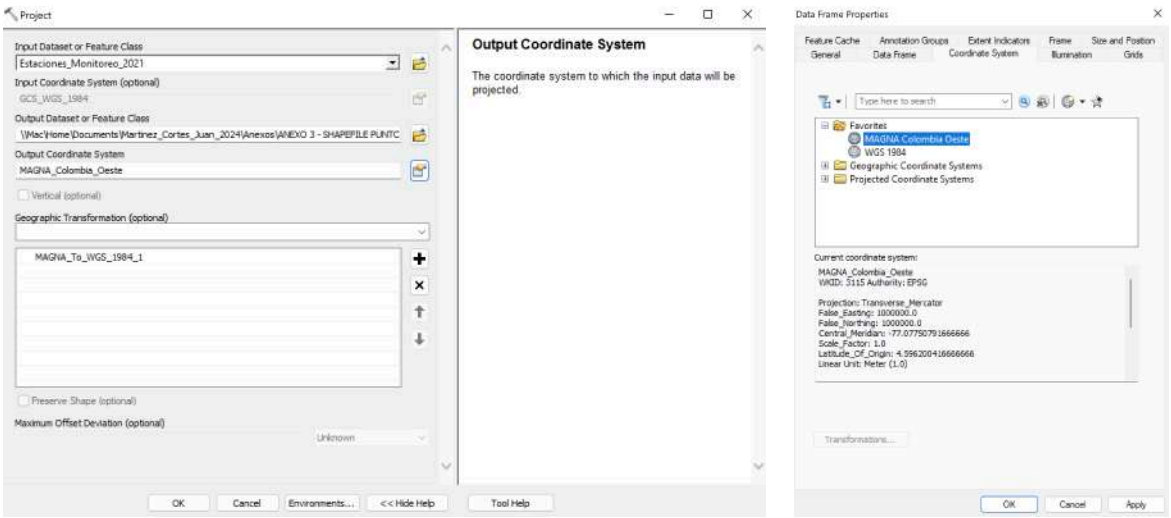


Fuente: elaboración propia

Una vez cargado el archivo Shapefile, se utilizó la herramienta “Project” para generar un nuevo archivo Shapefile con la misma información, pero en un sistema de coordenadas planas. El sistema por proyectar corresponde a MAGNA SIRGAS Colombia Origen Oeste (EPSG: 3115). La ruta para encontrar esta herramienta es ArcToolBox – Data Management Tools - Projections and Transformations – Project.

Figura 6

Proyección de Shapefile de estaciones y configuración de entorno a coordenadas planas

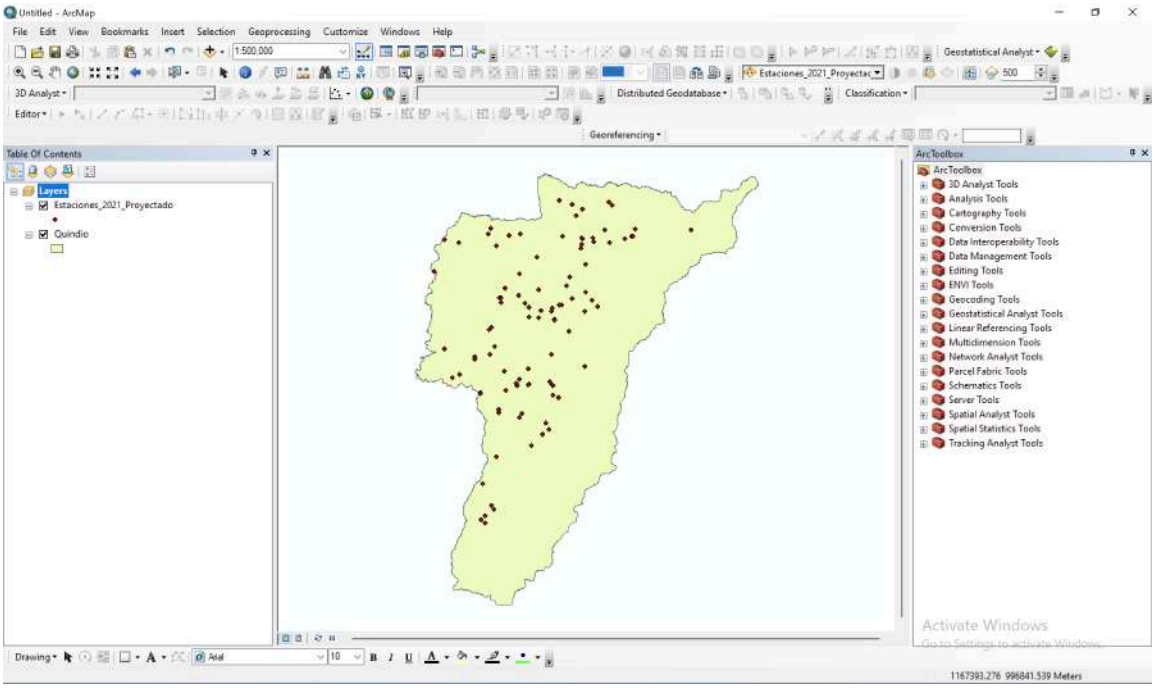


Fuente: elaboración propia

Una vez realizada la proyección del Shapefile y configurado el entorno de trabajo en el sistema de coordenadas MAGNA SIRGAS Colombia Origen Oeste (EPSG: 3115), se eliminaron las capas previas visualizadas en la Figura 5 y se cargó el Shapefile proyectado, en conjunto con una capa tipo polígono, representativa del departamento del Quindío, la cual sirvió para delimitar el área de trabajo de los procesos de interpolación a realizar. Esta última capa comparte el mismo sistema de coordenadas que el Shapefile proyectado de las estaciones. A continuación, en la Figura 7, se puede visualizar el entorno de trabajo configurado con las capas necesarias para iniciar con el proceso de análisis exploratorio de datos. También se configuró la escala de trabajo en 1:500,000 en función a que permite una visualización adecuada del área de estudio y se cambiaron las unidades de visualización de grados decimales a metros. A partir de este punto, la capa de puntos representativa de las estaciones de monitoreo de calidad del agua será referida como Estaciones_2021_Proyectado.

Figura 7

Visualización del entorno de trabajo configurado



Fuente: elaboración propia

6.3.2 Fase 2 – Análisis exploratorio de datos

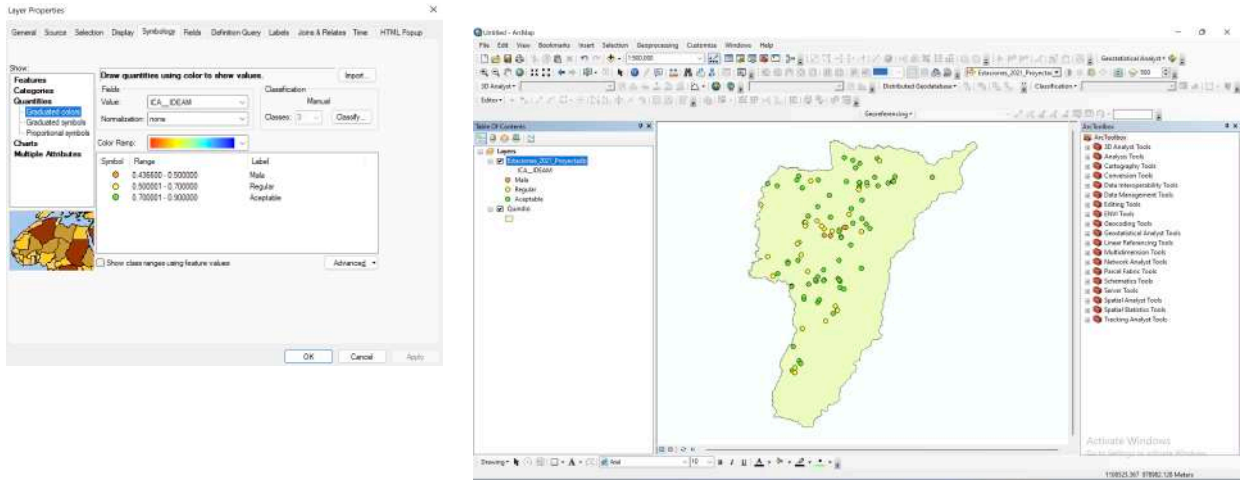
Actividad 2.1. Análisis de estadística descriptiva, distribución espacial e histograma de frecuencias

En la pestaña ‘Symbology’, la cual se encuentra en las propiedades de la capa Estaciones_2021_Proyectado, se ajustó la simbología de los puntos utilizando colores graduados con los rangos establecidos en la Tabla 1 y estableciendo el respectivo color que se indica en dicha tabla. Además, se ajustó su tamaño a 7 unidades, de tal manera que se facilitó su

visualización y se pudo realizar una valoración visual de la distribución espacial de los resultados del ICA a lo largo del área de estudio.

Figura 8

Distribución espacial de los resultados del ICA a lo largo del área de estudio



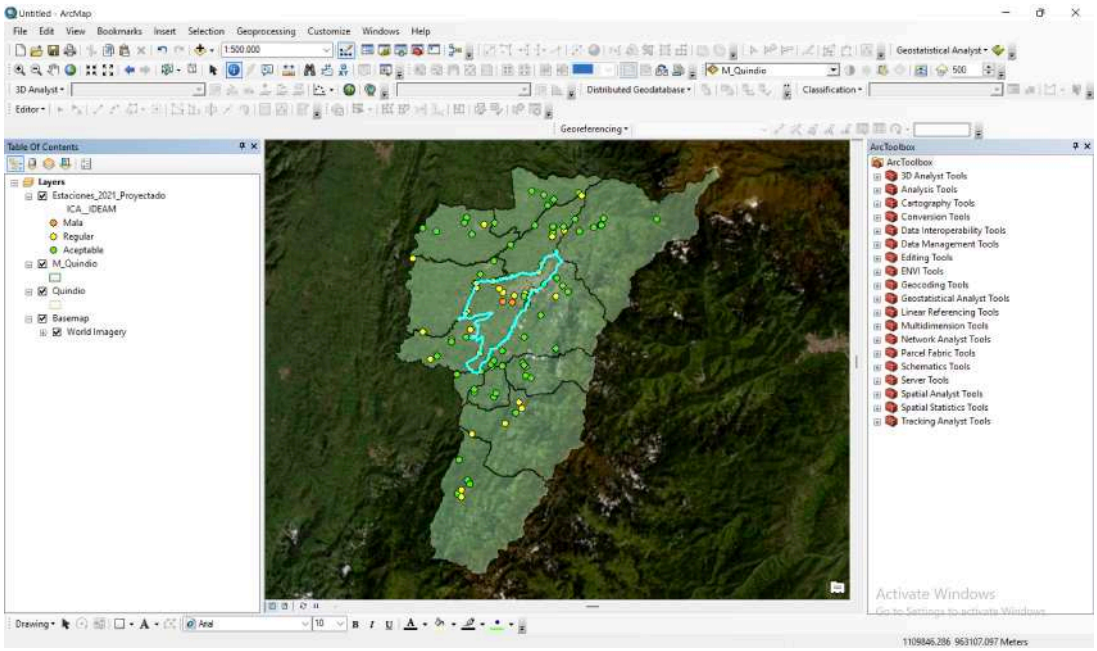
Fuente: elaboración propia

El valor mínimo del ICA reportado por las estaciones de monitoreo corresponde a 0.4366 y el máximo corresponde a 0.8399 (clasificación ‘Mala’ y ‘Aceptable’, respectivamente, de acuerdo con la Tabla 1). No se presentaron valores reportados como ‘Muy mala’ o ‘Buena’, por lo que no se visualizan puntos rojos ni azules en el mapa mostrado. Además, fue por esta razón que solo se configuraron 3 clases de visualización, y no las 5 que se presentan en la tabla referenciada. También se puede observar que existe un área ubicada sobre la zona central del departamento, en donde se concentran las estaciones que reportan un resultado del ICA en clasificación ‘Mala’. Por lo anterior, se añadió una capa Shapefile representativa de los municipios del departamento del Quindío, denominada M_Quindio (MAGA SIRGAS Colombia

Origen Oeste, EPSG: 3115) y un mapa base satelital para analizar en qué municipios en específico se da esta concentración.

Figura 9

Visualización de capa Shapefile de municipios con enfoque en zona de concentración 'Mala'



Fuente: elaboración propia

Como se puede visualizar en la Figura 9, la concentración de estaciones con reporte de resultados ICA clasificados como 'Mala' se da en el área alrededor del casco urbano del municipio de Armenia, lo cual puede estar relacionado con los vertimientos de agua residual provenientes de este municipio, teniendo en cuenta que es la capital del departamento y es el municipio con mayor cantidad de población y mayor actividad urbana e industrial.

La cantidad de estaciones con valores reportados en cada una de las clasificaciones propuestas por el IDEAM se puede observar a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4

Clasificación de estaciones de monitoreo según resultados ICA de 2021

Clasificación	Cantidad	Porcentaje
Muy mala	-	0 %
Mala	4	3.92 %
Regular	30	29.41 %
Aceptable	68	66.67 %
Buena	-	0 %

Fuente: elaboración propia

Si la clasificación de los resultados de ICA se analiza por monitoreo, se tiene lo visualizado a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5

Clasificación de los resultados de ICA en las estaciones por municipio

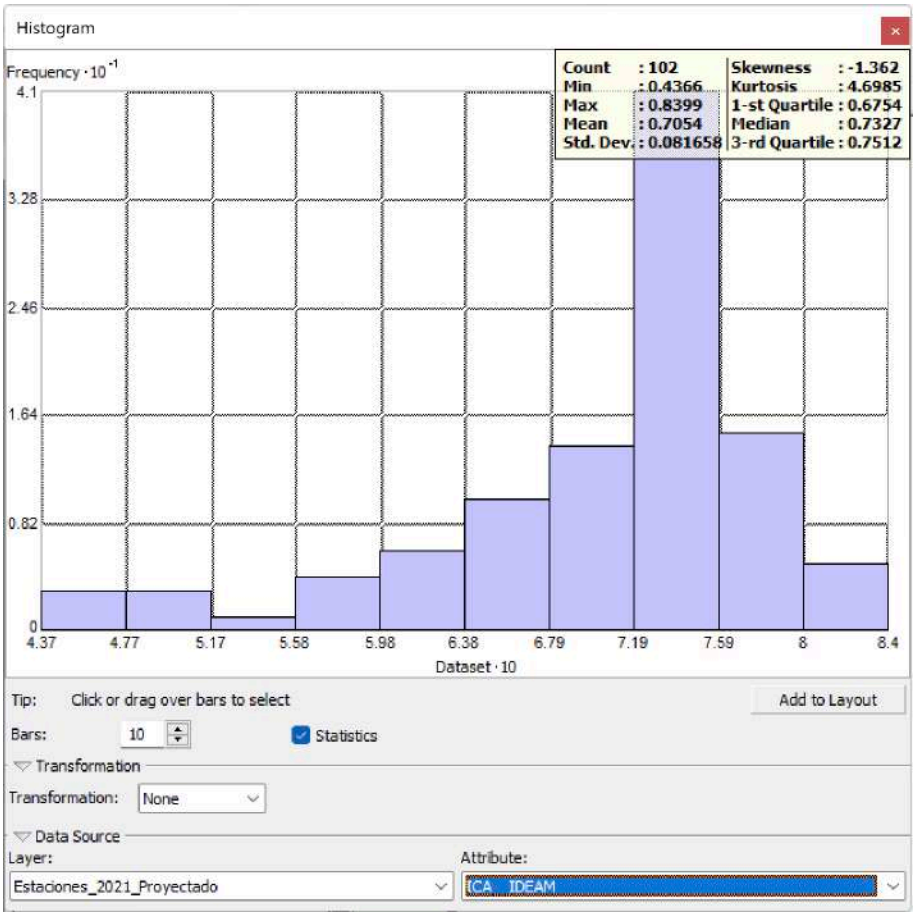
Municipio	Muy mala	Mala	Regular	Aceptable	Buena
Armenia	-	4	9	3	-
Buenavista	-	-	-	4	-
Calarcá	-	-	1	16	-
Circasia	-	-	5	8	-
Córdoba	-	-	-	6	-
Filandia	-	-	-	5	-
Génova	-	-	2	4	-
La Tebaida	-	-	3	4	-
Montenegro	-	-	3	4	-
Pijao	-	-	4	1	-
Quimbaya	-	-	2	6	-
Salento	-	-	1	7	-

Fuente: elaboración propia

Una vez analizada la distribución espacial de los resultado de ICA en las estaciones de monitoreo, se procedió a analizar las medidas de estadística descriptiva y el histograma de frecuencias. Para esto, se procedió a utilizar la herramienta ‘Histogram’ de ArcMap, la cual se encuentra en la ruta Geostatistical Analyst – Explore Data – Histogram.

Figura 10

Histograma de frecuencias del Índice de Calidad del Agua - ICA



Fuente: elaboración propia

Del histograma de frecuencias visualizado en la Figura 10, se puede determinar que los datos de ICA presentan una asimetría negativa, en el sentido de que tienen una distribución hacia la derecha (la media es menor que la mediana). A continuación, en la Tabla 6, se presentan las medidas de estadística descriptiva para los valores de ICA en las estaciones de monitoreo.

Tabla 6

Medidas de estadística descriptiva para los valores de ICA en las estaciones de monitoreo

Medida de Estadística Descriptiva	Valor
Conteo	102
Mínimo	0.4366
Máximo	0.8399
Media	0.7054
Desviación Estándar	0.081658
Skewness	-1.362
Kurtosis	4.6985
Primer Cuartil	0.6754
Mediana	0.7327
Tercer Cuartil	0.7512

Fuente: elaboración propia

Debido a la asimetría negativa que presentan los datos de ICA, es necesario realizar una conversión para generar lo más aproximado posible a una distribución normal y poder aplicar posteriormente los métodos de interpolación. Lo primero que se hizo fue ajustar el número de clases a partir de la aplicación de la Regla de Sturges (ver Ecuación 4). Al reemplazar los valores en la ecuación, se tiene que:

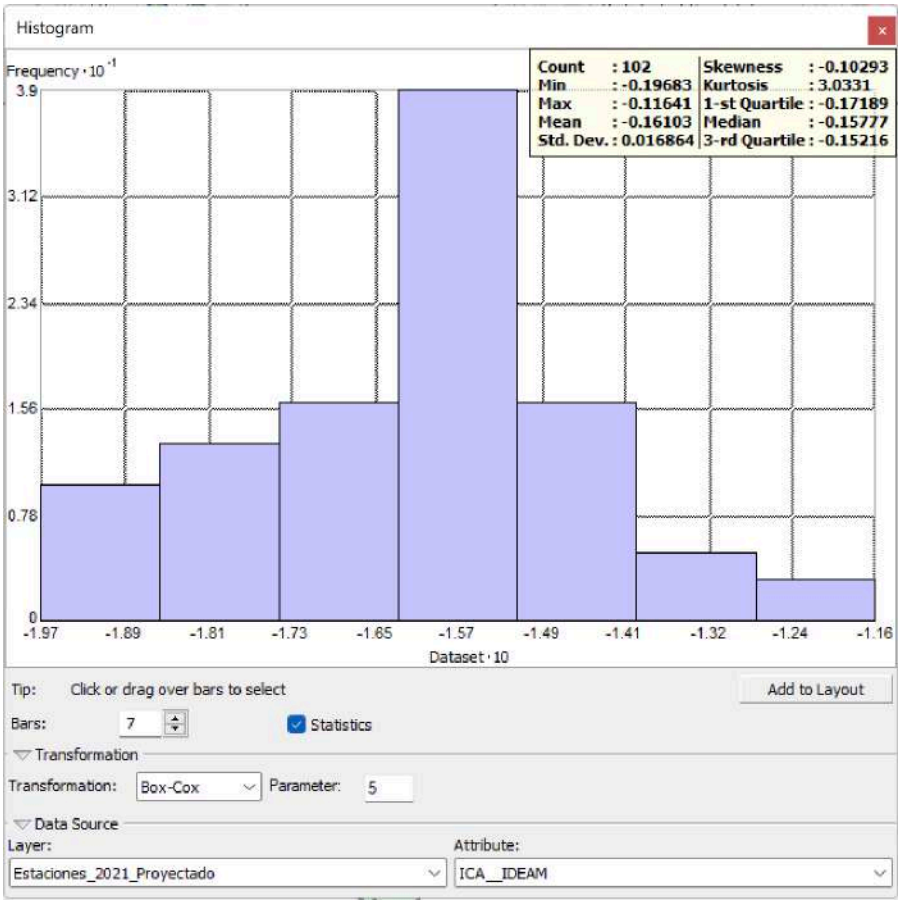
$$c = 1 + log_2(102)$$

$c = 7.672$

Teniendo en cuenta que el entero previo al redondeo es impar, se redondea hacia abajo, por lo que se trabajará con 7 clases. Además, se probaron varias transformaciones para llevar al histograma lo más cercano posible a una distribución normal, encontrando que la transformación Box-Cox de orden 5 fue la que aportó mejores resultados. A continuación, en la Figura 11, se puede observar el histograma con las observaciones anteriormente mencionadas.

Figura 11

Histograma de frecuencias del Índice de Calidad del Agua – ICA ajustado a distribución normal



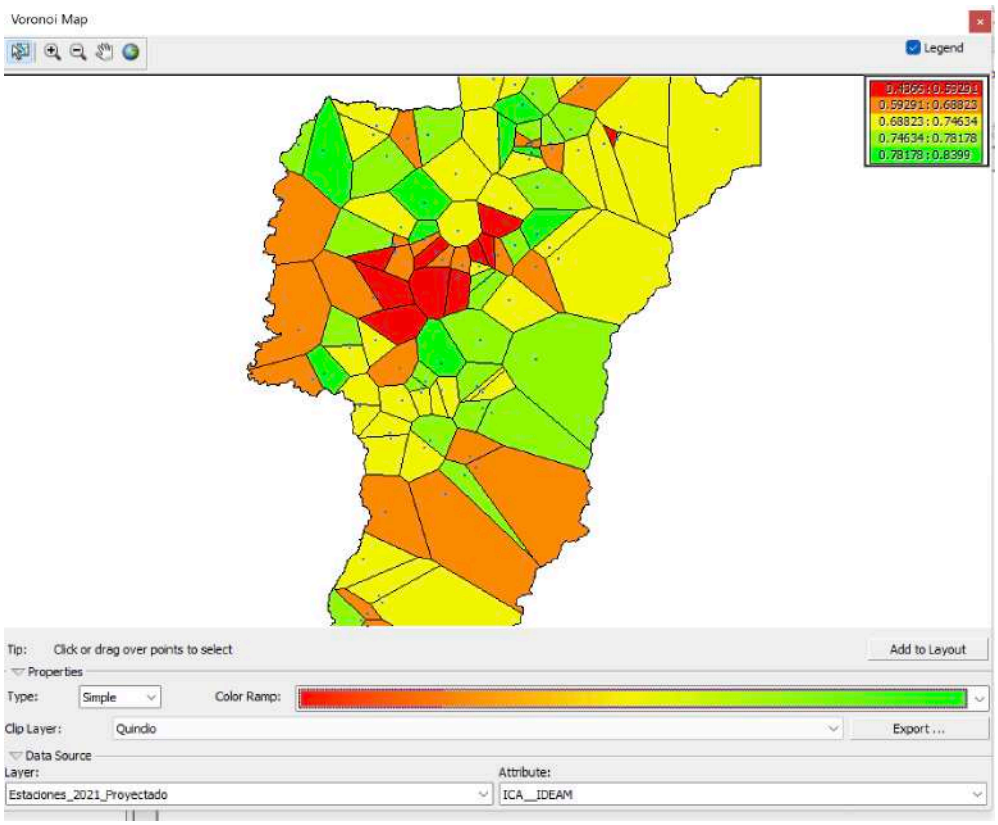
Fuente: elaboración propia

Actividad 2.2: Generación del mapa de Voronoi

Una vez generado el histograma de frecuencias y establecer los parámetros para aproximarlo en la mayor medida posible a una distribución normal, se procedió a generar el mapa de Voronoi. Esta es una herramienta visual que permite determinar la homogeneidad en la distribución espacial de los puntos con valores conocidos, considerando un área de influencia alrededor. Para utilizar la herramienta, se emplea la ruta Geostatistical Analyst – Explore Data – Voronoi Map.

Figura 12

Mapa de Voronoi de la variable Índice de Calidad del Agua - ICA



Fuente: elaboración propia

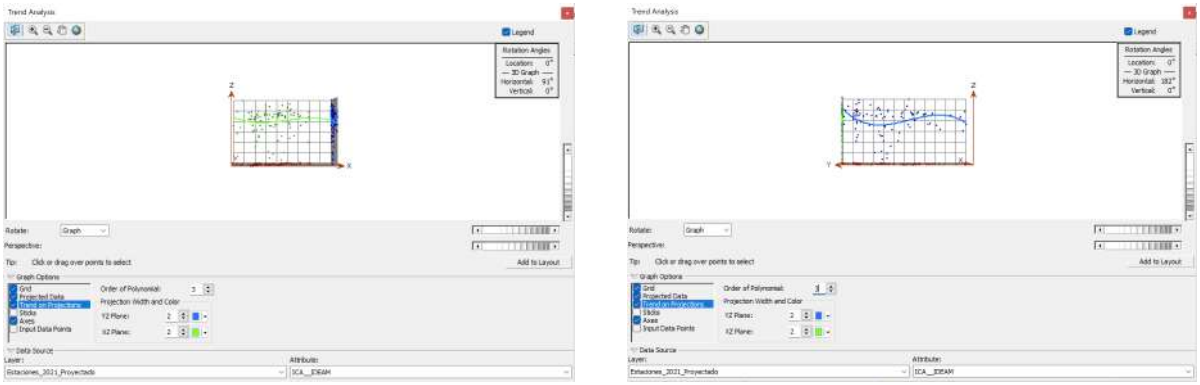
En la Figura 12 se puede observar que, hacia la zona oriental del departamento, los polígonos son más grandes, en la medida en que hay menor cobertura de estaciones de monitoreo de calidad del agua, lo cual puede observarse también en la Figura 7. Al contrastar esto con la visualización satelital de la Figura 9, se observa que esta zona del departamento corresponde al borde de la cordillera central, en donde no se presentan niveles considerables de actividad antrópica y predomina la cobertura vegetal. También es posible observar que la distribución de polígonos con valores de ICA más bajos presenta una concentración en la zona central del departamento, en el área de influencia del casco urbano del municipio de Armenia, lo cual es congruente con lo visualizado en la Figura 9.

Actividad 2.3: Análisis de tendencia en los planos XZ y YZ

El análisis de tendencia es una herramienta visual de ArcMap que permite visualizar la distribución de puntos con valores conocidos, considerando el eje Z (altura) como una dimensión representativa del valor de la variable de interés. Lo anterior permite identificar patrones que puedan describir el comportamiento de la variable en un direcciones espaciales específicas. Para utilizar la herramienta, la ruta es Geostatistical Analyst – Explore Data – Trend Analysis.

Figura 13

Análisis de tendencia en los planos XZ y YZ



Plano XZ Plano YZ

Fuente: elaboración propia

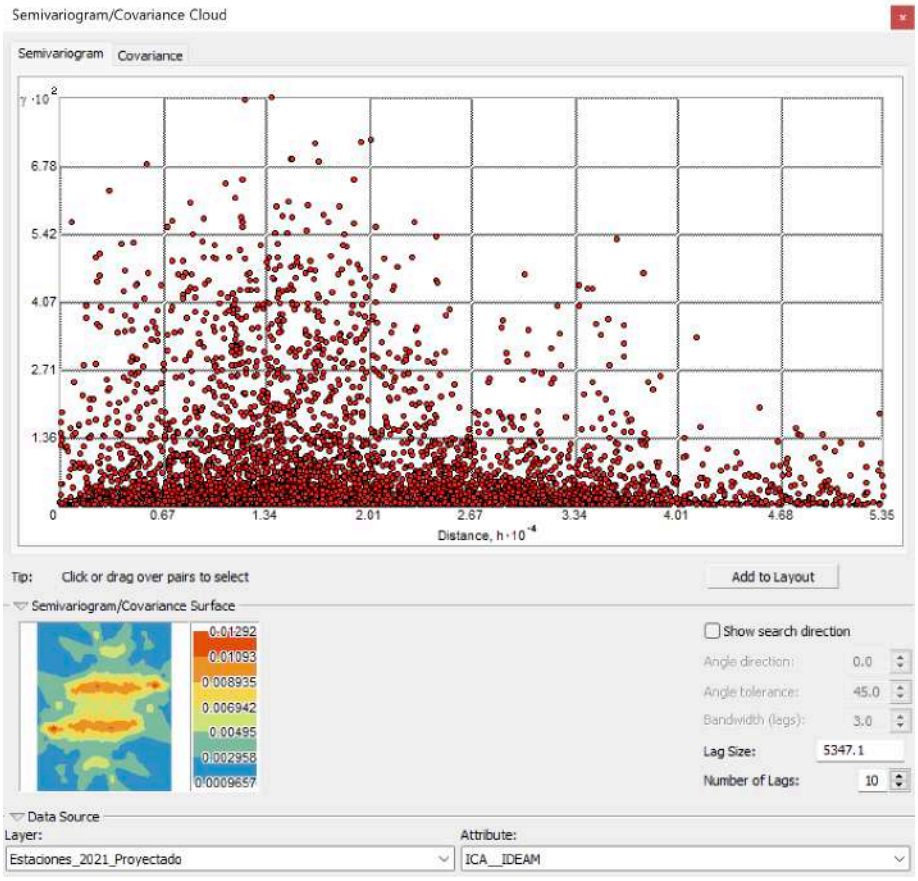
En la Figura 13 se puede observar el análisis de tendencia realizado tanto en el plano XZ como en el plano YZ. En ninguno de los planos se evidenció un patrón que describiera bien el comportamiento de los datos, por lo que se puede concluir que estos no siguen una tendencia definida por una dirección espacial específica. Por lo anterior, el polinomio de orden 3 fue el que más se acercó al comportamiento real de los datos.

Actividad 2.4. Generación del semivariograma

La última actividad de la fase de análisis exploratorio de datos corresponde a la generación de la nube del semivariograma, la cual es posible visualizar a continuación en la Figura 14.

Figura 14

Nube del semivariograma del Índice de Calidad del Agua – ICA



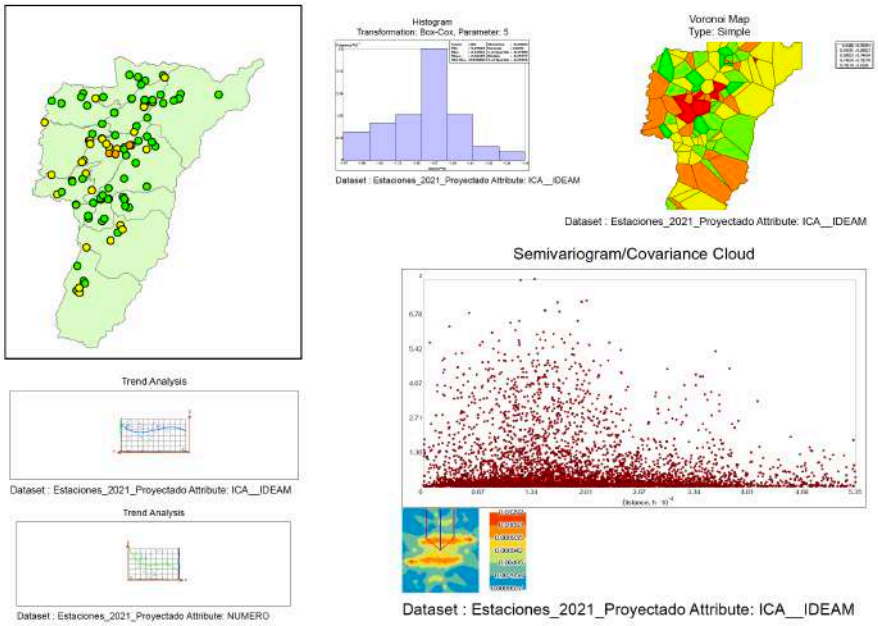
Fuente: elaboración propia

De acuerdo a lo visualizado en la Figura 14, no se observan puntos aislados.

Una vez finalizadas las actividades del análisis exploratorio de datos, a continuación, en la Figura 15, se presenta un resumen de todos los análisis realizados en esta fase de la investigación, los cuales permitieron definir los parámetros a utilizar posteriormente en los procesos de interpolación.

Figura 15

Resumen del análisis exploratorio de datos



Fuente: elaboración propia

6.3.3 Fase 3 – Aplicación de métodos de interpolación

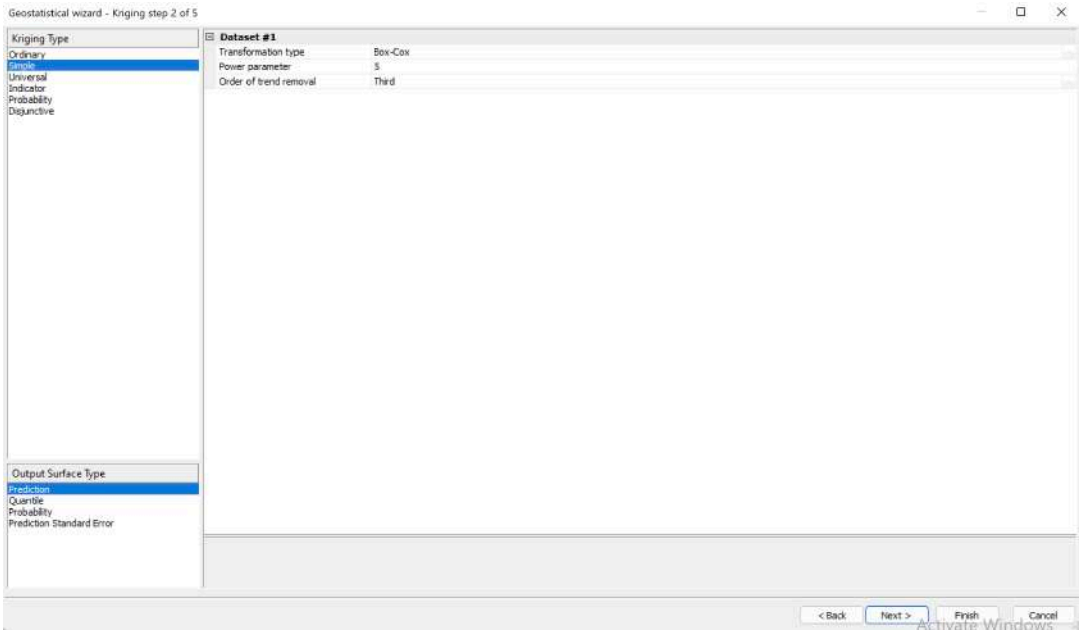
Actividad 3.1. Aplicación del método de interpolación de Kriging Simple y generación de capa de salida raster a lo largo del dominio espacial del departamento del Quindío

Para la aplicación del método de Kriging Simple, se procedió a generar el modelo a partir de los criterios determinados en el análisis exploratorio de datos. Para generar el modelo de Kriging Simple, la ruta es Geostatistical Analyst – Geostatistical Wizard – Kriging / CoKriging –

Simple. Como se puede visualizar en la Figura 16 se aplicó una transformación Box-Cox de orden 5 y se indicó un orden de tendencia de grado 3 de acuerdo a lo visualizado en el análisis de tendencia realizado durante el análisis exploratorio de datos.

Figura 16

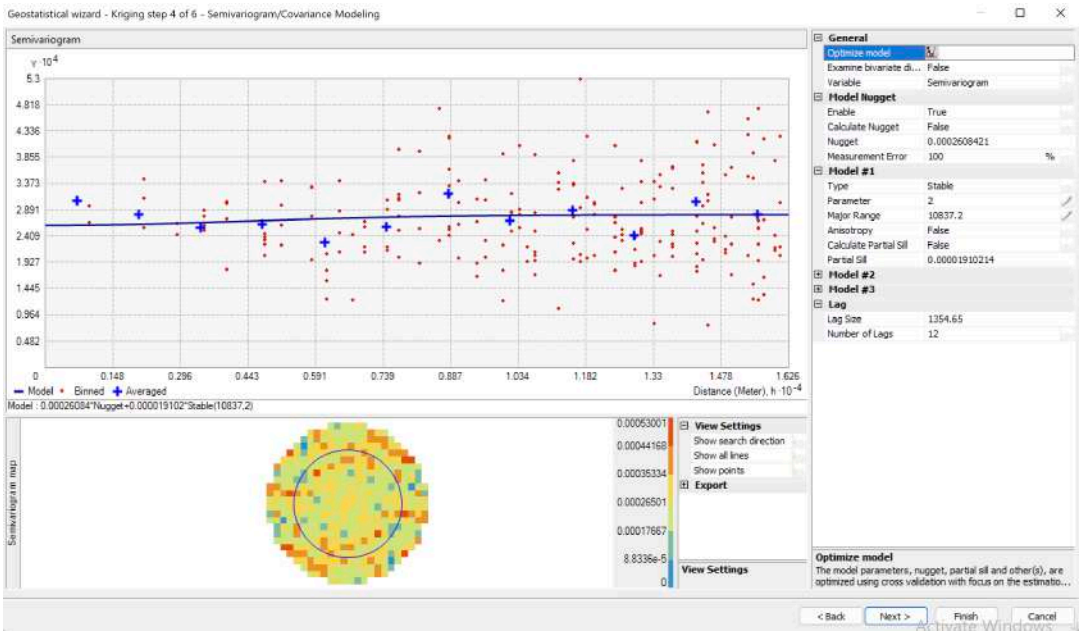
Configuración del método de Kriging Simple



Fuente: elaboración propia

Figura 17

Semivariograma teórico del atributo ICA con Kriging Simple

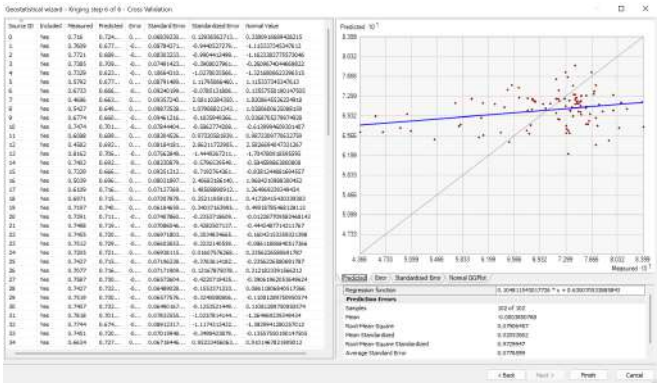


Fuente: elaboración propia

En la Figura 17 se puede visualizar el semivariograma teórico del atributo ICA con Kriging Ordinario. Se aprecia que el modelo que mejor se ajustó a los datos fue el estable.

Figura 18

Visualización de errores de la interpolación con Kriging Simple para el atributo ICA

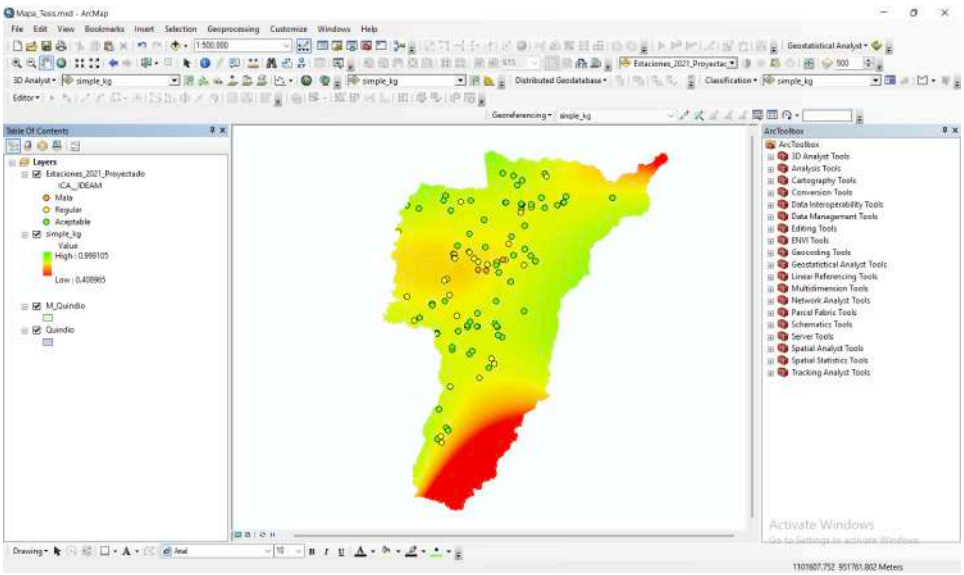


Fuente: elaboración propia

En la Figura 18 es posible visualizar el gráfico y resumen de errores del modelo de interpolación por Kriging Simple.

Figura 19

Salida gráfica del método de interpolación Kriging Simple



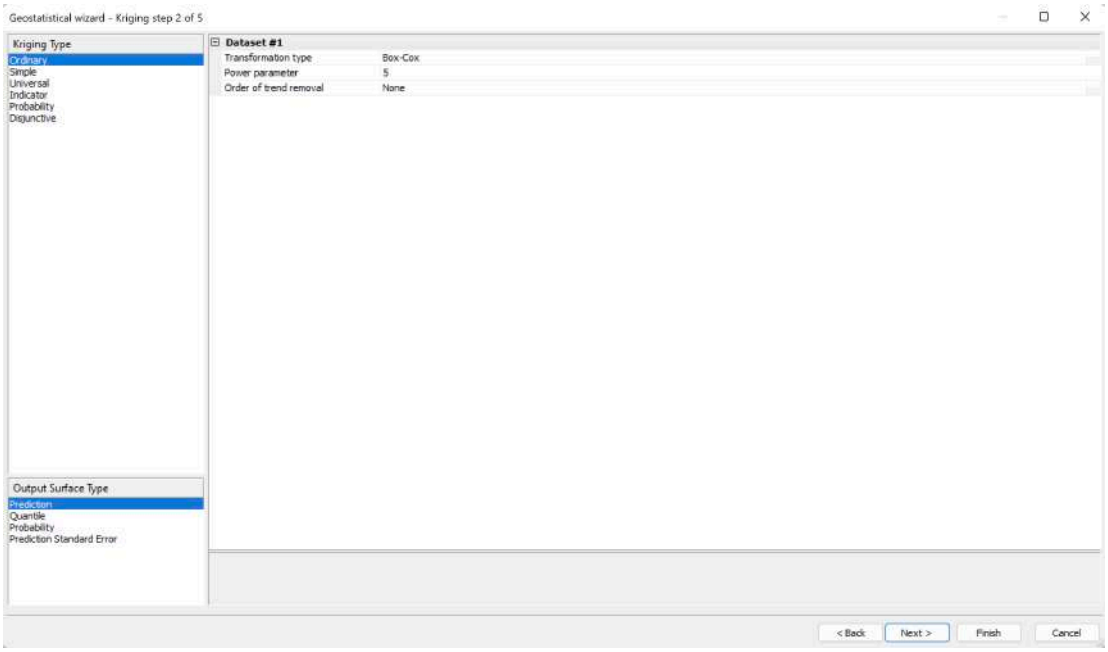
Fuente: elaboración propia

Actividad 3.2. Aplicación del método de interpolación de Kriging Ordinario y generación de capa de salida raster a lo largo del dominio espacial del departamento del Quindío

Para la aplicación del método de Kriging Ordinario, se procedió a generar el modelo a partir de los criterios determinados en el análisis exploratorio de datos. Para generar el modelo de Kriging Ordinario, la ruta es Geostatistical Analyst – Geostatistical Wizard – Kriging / CoKriging – Ordinary. Como se puede visualizar en la Figura 20, se aplicó una transformación Box-Cox de orden 5 y se indicó que no existe tendencia en los datos, de acuerdo a lo visualizado en el análisis de tendencia realizado durante el análisis exploratorio de datos.

Figura 20

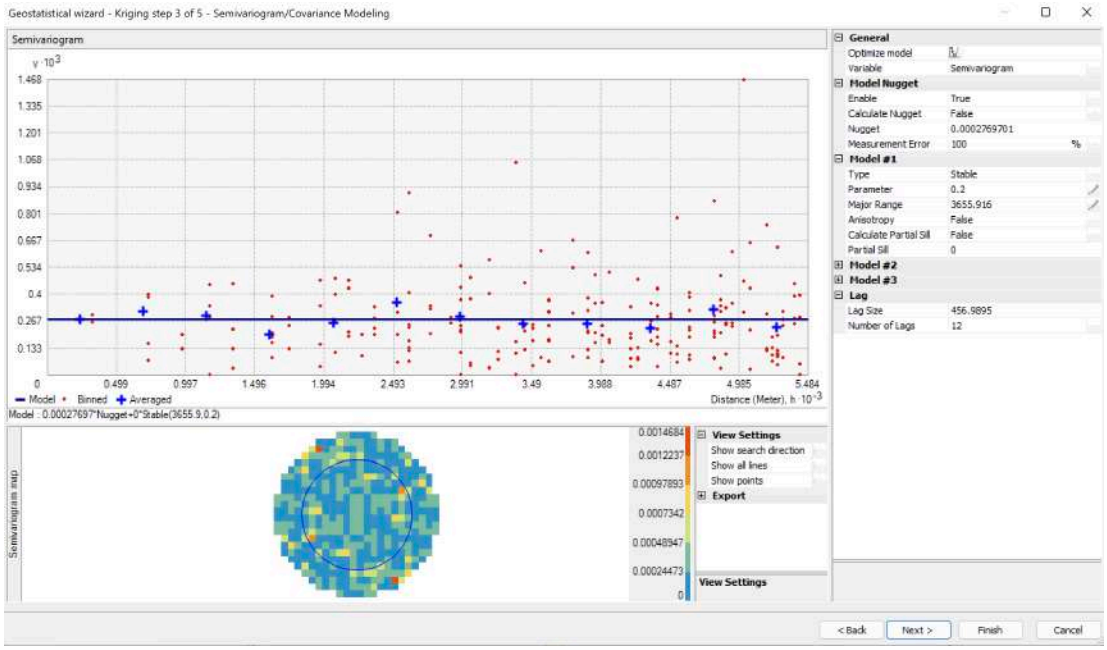
Configuración del método de Kriging Ordinario



Fuente: elaboración propia

Figura 21

Semivariograma teórico del atributo ICA con Kriging Ordinario

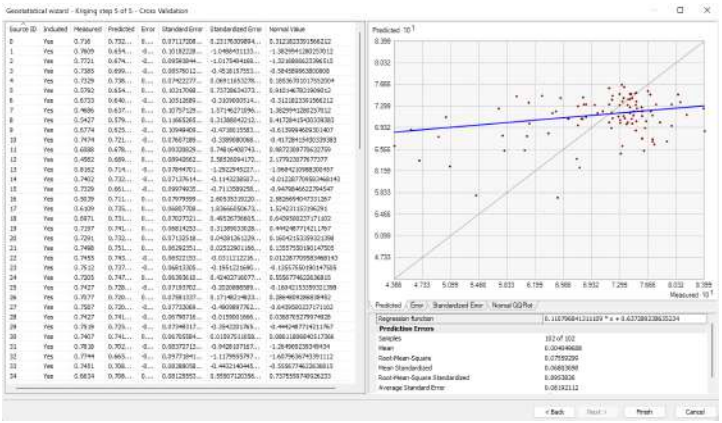


Fuente: elaboración propia

En la Figura 21 se puede visualizar el semivariograma teórico del atributo ICA con Kriging Ordinario. Se aprecia que el modelo que mejor se ajustó a los datos fue el estable.

Figura 22

Visualización de errores de la interpolación con Kriging Ordinario para el atributo ICA

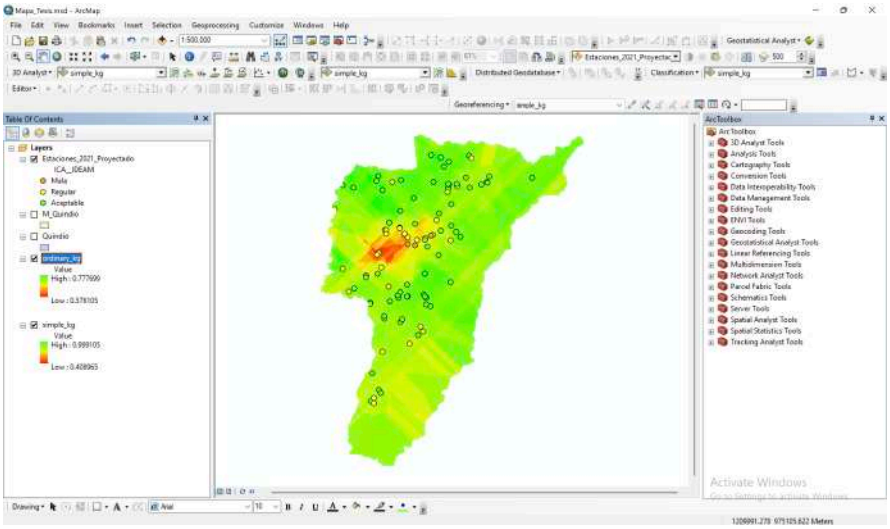


Fuente: elaboración propia

En la Figura 22 es posible visualizar el gráfico y resumen de errores del modelo de interpolación por Kriging Ordinario.

Figura 23

Salida gráfica del método de interpolación Kriging Ordinario



Fuente: elaboración propia

Actividad 3.3. Obtención de errores de cada método a partir de métricas de validación cruzada

A continuación, en la Tabla 7, se muestras los datos obtenidos referentes al Error Medio Absoluto – ME y a la Raíz del Error Cuadrático Medio – RMSE obtenidos en la técnica de Kriging Simple. Se hace también una comparación con la media de los datos de Índice de Calidad del Agua – ICA.

Tabla 7

Evaluación del error del método de Kriging Simple

Dato ICA	Valor	Error Medio Absoluto - ME	Raíz del Error Cuadrático Medio - RMSE	Error Promedio
Media	0.7054	-0.00039	0.07906	11.21 %

Fuente: elaboración propia

A continuación, en la Tabla 8, se muestras los datos obtenidos referentes al Error Medio Absoluto – ME y a la Raíz del Error Cuadrático Medio – RMSE obtenidos en la técnica de Kriging Ordinario. Se hace también una comparación con la media de los datos de Índice de Calidad del Agua – ICA.

Tabla 8

Evaluación del error del método de Kriging Ordinario

Dato ICA	Valor	Error Medio Absoluto - ME	Raíz del Error Cuadrático Medio - RMSE	Error Promedio
Media	0.7054	0.00405	0.07559	10.72 %

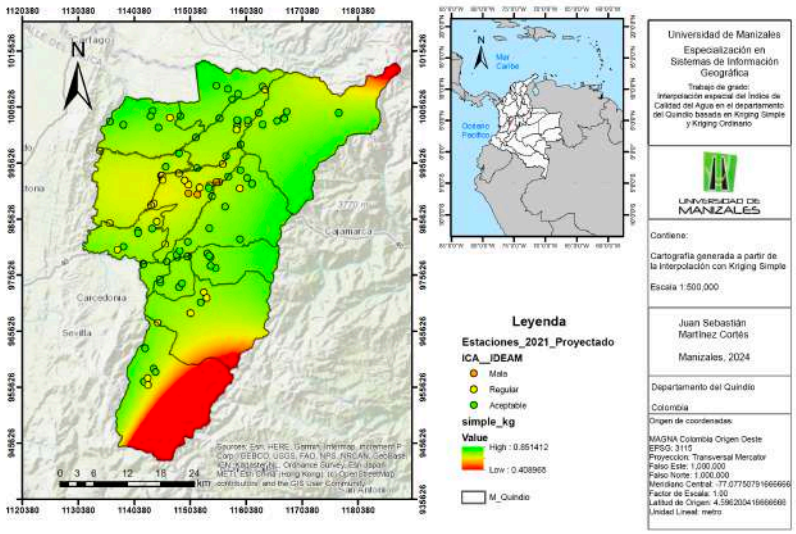
Fuente: elaboración propia

7. Resultados

7.1.1 Cartografía generada a partir de la interpolación con Kriging Simple

Figura 24

Mapa resultante de la interpolación con el método de Kriging Simple

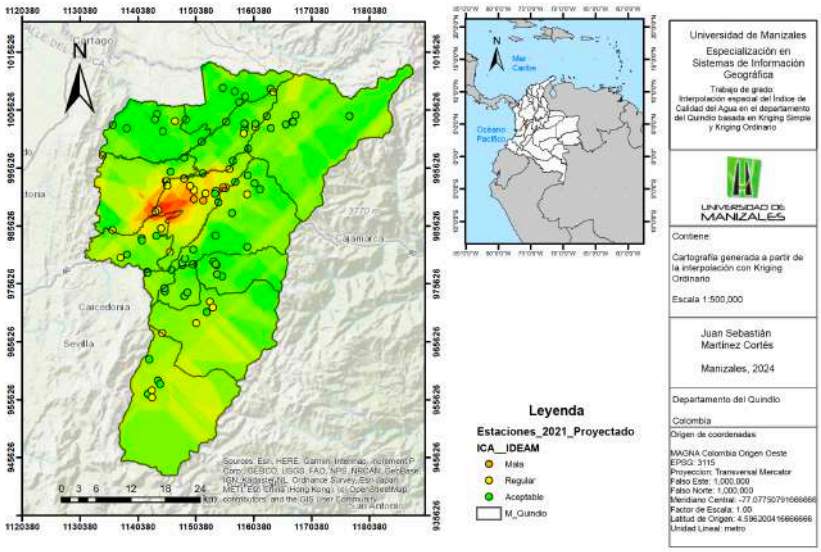


Fuente: elaboración propia

7.1.2 Cartografía generada a partir de la interpolación con Kriging Ordinario

Figura 25

Mapa resultante de la interpolación con el método de Kriging Ordinario



Fuente: elaboración propia

7.1.3 Comparación de resultados

A continuación, en la Tabla 9, se comparan las métricas de validación cruzada obtenidas con cada método de interpolación y se muestra el error promedio calculado.

Tabla 9

Comparación de porcentajes de error entre métodos de interpolación

Método	ME	RMSE	Error Promedio
Kriging Simple	-0.00039	0.07906	11.21 %
Kriging Ordinario	0.00405	0.07559	10.72 %

Fuente: elaboración propia

8. Conclusiones

- Las cuatro estaciones cuya clasificación ICA fue 'Mala' se encuentran ubicadas en el municipio de Armenia. Estas son QElReposo1, QSanNicolas1, REspejo3 y QCristales2, las cuales obtuvieron un valor de ICA de 0.4686, 0.4582, 0.4366 y 0.4939, respectivamente. Lo anterior contrasta con las cartografías obtenidas con ambos métodos de interpolación, que muestran un deterioro considerable del ICA en el área alrededor del casco urbano de la ciudad de Armenia.

- Ninguna de las estaciones de monitoreo reportó valores cuya clasificación del ICA correspondiera a 'Muy mala' o 'Buena'. El 3.92 % de las estaciones reportó un ICA de clasificación 'Mala', el 29.41 % de las estaciones reportó un ICA de clasificación 'Regular' y el 66.67 % de las estaciones reportó un ICA de clasificación 'Aceptable'.

- De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 9, el método de Kriging Ordinario, en general, presentó una mejor aproximación a los resultados del ICA de las estaciones que conforman la Red de Monitoreo de las Fuentes Hídricas Principales con Objetivos de Calidad en el Departamento del Quindío. Este presento una Raíz del Error Cuadrático Medio de 0.07559, mientras para que el Kriging Simple fue de 0.07906, lo cual se traduce en un Error Promedio (RMSE / Media) de 10.72 % y 11.21 %, respectivamente.

- Los municipios con mayor cobertura de estaciones son Calarcá, Armenia y Circasia, con 17, 16 y 13, respectivamente. Solo estos tres municipios tienen dentro de su jurisdicción el 45.10 % de la totalidad de estaciones de monitoreo instaladas en el departamento del Quindío.

- La zona oriental del departamento del Quindío no tiene buena cobertura en lo que respecta a estaciones de monitoreo. De acuerdo a lo visualizado en la Figura 12, los polígonos del mapa de Voronoi son más grandes en esta zona. Esta situación puede dar lugar a errores o imprecisiones en los modelos de interpolación. Se debe tener en cuenta que esta zona corresponde al borde de la cordillera oriental, en donde no se presentan niveles considerables de actividad antrópica y predomina la cobertura vegetal.

- El método de Kriging Simple generó una zona ubicada en la parte suroriental del departamento, en jurisdicción del municipio de Génova y algunos territorios de municipios vecinos, en la que la predicción del valor del ICA fue más baja respecto a lo esperado, teniendo en cuenta que en esta zona predomina la cobertura vegetal y las actividades antrópicas no son de gran impacto. Se debe tener en cuenta la poca cobertura de estaciones de monitoreo en esta zona, por lo que el método de Kriging Ordinario puede ser más efectivo cuando se tengan mapas de Voronoi con polígonos muy grandes.

9. Recomendaciones

- Para futuros análisis, se recomienda verificar la pertinencia de utilizar otros modelos de interpolación diferentes a los utilizados en el presente estudio. Se pueden utilizar modelos geoestadísticos como el Kriging Universal o modelos determinísticos como la Interpolación Ponderada por Distancia Inversa – IDW.

- Una vez la Corporación Autónoma Regional del Quindío tenga organizada la información referente a los resultados de las estaciones de monitoreo de años posteriores a 2021, se puede aplicar este mismo procedimiento en diferentes años para evaluar la variación temporal en cada estación. Lo anterior, además, puede ser complementado con un análisis multitemporal de cambios de la cobertura de terreno para explorar correlaciones entre dichos cambios y las variaciones del ICA.

- Se debe tener muy en cuenta la fecha en que fueron tomados los datos para la presente investigación. Lo anterior en función a que el departamento del Quindío presenta variaciones fuertes en sus condiciones de tiempo atmosférico a lo largo de las diferentes épocas del año. Lo anterior puede tener un efecto considerable en las posibles variaciones que puedan presentarse en los datos obtenidos de cada estación debido a que, a mayor precipitación, mayor será el caudal de los cuerpos de agua y, por ende, también será mayor su ICA.

- La zona oriental del departamento, correspondiente al borde con la cordillera central, presenta una cobertura muy baja de estaciones de monitoreo. Se recomienda ampliar la oferta de estaciones en esta zona, lo cual permitirá no solamente tener un mayor control del recurso hídrico en la región, sino la realización de investigaciones similares que busquen evaluar información que derive de estas estaciones.

10. Bibliografía

[1] Ahmad, A. Y., Saleh, I., Balakrishnan, P., & Al-Ghouti, M. A. (2021). Comparison GIS-Based interpolation methods for mapping groundwater quality in the state of Qatar. Groundwater for Sustainable Development, 13, 100573.

[2] Al-Obaidy, A. H. M., Maulood, B. K., & Kadhem, A. J. (2010). Evaluating Raw and Treated Water Quality of Tigris River within Baghdad by Index Analysis. Journal Of Water Resource And Protection, 02(07), 629-635.

[3] Azhari, H.E.; Cherif, E.K.; Sarti, O.; Azzirgue, E.M.; Dakak, H.; Yachou, H.; Esteves da Silva, J.C.G.; Salmoun, F. Assessment of Surface Water Quality Using the Water Quality Index (IWQ), Multivariate Statistical Analysis (MSA) and Geographic Information System (GIS) in Oued Laou Mediterranean Watershed, Morocco. Water 2023, 15, 130.

[4] Benouara, N., Retima, N., Bouguerra, H., Tachi, S. E., & Remita, F. (2024). Evaluation of Groundwater Quality for Irrigation Purposes Using Water Quality Indices and GIS Technique: a Case Study of Seriana Plain Northeastern Algeria. Doklady Earth Sciences. https://doi.org/10.1134/s1028334x23602596.

[5] Chatterjee, R. S., & Lataye, D. H. (2019). Analysis of water quality parameters and their variation for surface water using GIS-Based tools. En Lecture notes in civil engineering (pp. 289-302).

[6] Colaboradores de Wikipedia. (2023, 6 febrero). Regla de sturges. Wikipedia, la Enciclopedia Libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Regla_de_Sturges.

[7] Cómo funciona Kriging—ArcGIS Pro | Documentación. (s. f.). https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-kriging-works.htm.

[8] Constitución Política de la República de Colombia, 1991.

[9] Convenio Interadministrativo No. 002 de 2021 CRQ-UTP, Diseño de la Red de Monitoreo de las Fuentes Hídricas Principales con Objetivos de Calidad en el Departamento del Quindío.

[10] Decreto No. 1076 del 26 de mayo de 2015, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible".

[11] Decreto No. 1575 del 09 de mayo de 2007, Ministerio de la Protección Social, "Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano".

[12] Decreto No. 2811 del 18 de diciembre de 1974, "Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente".

[13] Dheeraj, V. P., Singh, C. S., Sonkar, A. K., & Kishore, N. (2023). Assessment of surface and ground water quality around Korba Coalfield, India: an integrated approach of water quality index, multivariate statistics analysis and GIS technique. Sustainable Water Resources Management, 9(6).

[14] Hassan, H. B., Moniruzzaman, M., Majumder, R. K., Ahmed, F., Bhuyian, M. A. Q., Ahsan, M. A., & Al-Asad, H. (2023). Impacts of seasonal variations and wastewater discharge on river water quality and associated human health risks in northwest Dhaka, Bangladesh. Heliyon, 9, e18171.

[15] Ikechukwu, M.N., Ebinne, E., Idorenyin, U. and Raphael, N.I. (2017) Accuracy Assessment and Comparative Analysis of IDW, Spline and Kriging in Spatial Interpolation of Landform (Topography): An Experimental Study. Journal of Geographic Information System, 9, 354-371.

[16] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua superficial. 10 p.

[17] Jin, L., & Heap, A. D. (2011). A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. Ecological Informatics, 6(3-4), 228-241.

[18] Khan, M., Almazah, M. M. A., EIlahi, A., Niaz, R., Al-Rezami, A. Y., & Zaman, B. (2023). Spatial interpolation of water quality index based on Ordinary kriging and Universal kriging. Geomatics, Natural Hazards & Risk, 14(1). https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2190853.

[19] Khounı, I., Louhıchı, G., & Ghrabı, A. (2021). Use of GIS based inverse distance weighted interpolation to assess surface water quality: case of Wadi El Bey, Tunisia. Environmental Technology and Innovation, 24, 101892.

[20] Ley 99 de 1993, Congreso de Colombia, "por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestion y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema nacional Ambiental, SINA".

[21] Loaiza, J.G.; Rangel-Peraza, J.G.; Sanhouse-García, A.J.; Monjardín-Armenta, S.A.; Mora-Félix, Z.D.; Bustos-Terrones, Y.A. Assessment of Water Quality in a Tropical Reservoir in Mexico: Seasonal, Spatial and Multivariable Analysis. Int. J. Environ. Res. Public Health 2021, 18, 7456.

[22] Masood, A., Aslam, M., Pham, Q. B., Khan, W., & Masood, S. (2021). Integrating Water Quality Index, GIS and multivariate statistical techniques towards a better understanding of drinking water quality. Environmental Science and Pollution Research, 29(18), 26860-26876.

[23] Métodos determinísticos de interpolación espacial—ArcGIS Pro | Documentación. (s. f.). https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/deterministic-methods-for-spatial-interpolation.htm.

[24] Njeban, H.S. (2018) Comparison and Evaluation of GIS-Based Spatial Interpolation Methods for Estimation Groundwater Level in AL-Salman District—Southwest Iraq. Journal of Geographic Information System, 10, 362-380.

[25] Organization, W. H. (2011b). Guidelines for Drinking-water Quality.

[26] ¿Qué distintos modelos de kriging existen? —ArcGIS Pro | Documentación. (s. f.). https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/what-are-the-different-kriging-models-.htm.

[27] Resolución No. 00001489 del 19 de septiembre de 2016, Corporación Autónoma Regional del Quindío, “Por medio de la cual se fijan los objetivos de calidad del río Quindío”.

[28] Resolución No. 1640 del 02 de agosto de 2012, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones”.

[29] Resolución No. 1736 del 01 de septiembre de 2020, Corporación Autónoma Regional del Quindío, “Por medio de la cual se fijan objetivos de calidad para las principales fuentes hídricas del departamento del Quindío para el período 2020 - 2030”.

[30] Resolución No. 1844 del 09 de septiembre de 2020, Corporación Autónoma Regional del Quindío, “Por medio de la cual se adopta el Plan de Ordenamiento del Recurso hídrico del río Roble y se fijan objetivos de calidad para el río Roble, quebrada Portachuelo y quebrada Cajones del departamento del Quindío”.

[31] Şener, Ş., Şener, E., & Davraz, A. (2017). Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). Science Of The Total Environment, 584-585, 131-144.

[32] Shanmugasundharam, A., Akhina, S., Adhithya, R., Singh, D., & Krishnakumar, S. (2023). Water Quality Index (WQI), Multivariate statistical and GIS for assessment of surface water quality of Karamana River Estuary, west coast of India. Total environment research themes, 6, 100031.

[33] Singh, K. P., Malik, A., & Sinha, S. (2005). Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river (India) using multivariate statistical techniques—a case study. Analytica Chimica Acta, 538(1-2), 355-374.

[34] Singh, R., Majumder, C., & Vidyarthi, A. K. (2023). Assessing the impacts of industrial wastewater on the inland surface water quality: An application of analytic hierarchy process (AHP) model-based water quality index and GIS techniques. Physics And Chemistry Of The Earth, Parts A/B/C, 129, 103314.

[35] Tan, Q., & Xu, X. (2014). Comparative Analysis of Spatial Interpolation Methods: an Experimental Study.

[36] Benouara, N., Retima, N., Bouguerra, H., Tachi, S. E., & Remita, F. (2024). Evaluation of Groundwater Quality for Irrigation Purposes Using Water Quality Indices and GIS Technique: a Case Study of Seriana Plain Northeastern Algeria. Doklady Earth Sciences. https://doi.org/10.1134/s1028334x23602596.

[37] Khan, M., Almazah, M. M. A., EIlahi, A., Niaz, R., Al-Rezami, A. Y., & Zaman, B. (2023). Spatial interpolation of water quality index based on Ordinary kriging and Universal kriging. Geomatics, Natural Hazards & Risk, 14(1). https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2190853.

[38] colaboradores de Wikipedia. (2023, 6 febrero). Regla de sturges. Wikipedia, la Enciclopedia Libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Regla_de_Sturges.

11. Anexos

Anexo 1 – INFORMACION CRQ

Anexo 2 – INFORMACION NORMALIZADA

Anexo 3 – SHAPEFILE PUNTOS WGS84

Anexo 4 – SHAPEFILE PUNTOS MAGNA SIRGAS

Anexo 5 – SHAPEFILE DEPARTAMENTO QUINDIO MAGNA SIRGAS

Anexo 6 – SHAPEFILE MUNICIPIOS QUINDIO MAGNA SIRGAS

Anexo 7 – CALIBRACION MODELOS DE INTERPOLACION

Anexo 8 – CAPAS RASTER INTERPOLACION

Anexo 9 – INFORMACION GEOGRAFICA DE REFERENCIA

Anexo 10 – CARTOGRAFIA PDF

Anexo 11 – MAPA MXD