

Determinación de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas para el establecimiento del uso del agua en el Río Alto Lebrija en el Departamento de Santander

Cristian Andres Gutierrez Romero

Trabajo de Grado para Optar al Título de Químico

Director

Dra. Marianny Yajaira Combariza M.

Química, PhD

Codirector

Yaneth Quintero López

Química, MSc

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Química

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

Primero, agradezco a Dios, por darme la fortaleza, sabiduría y salud necesarias para llegar a este momento y completar este trabajo. Sin Su guía, nada de esto habría sido posible. A mis padres, quienes han sido el pilar fundamental en mi vida. Gracias por su amor incondicional, apoyo constante y por brindarme la oportunidad de educarme y perseguir mis sueños. Sus sacrificios y enseñanzas son el mayor ejemplo de dedicación y esfuerzo, y este logro es también de ustedes. Agradezco a mí mismo por el esfuerzo, disciplina y perseverancia que he puesto a lo largo de este proceso. Cada obstáculo superado me ha enseñado la importancia de la constancia y el compromiso, y estoy orgulloso de haber dado lo mejor en cada etapa. Finalmente, a los profesores que, a lo largo de mi formación, despertaron e impulsaron mi amor por esta carrera. Sus enseñanzas, consejos y apoyo fueron clave para mi crecimiento académico y profesional. Gracias por compartir su pasión por el conocimiento y por haberme guiado en este camino.

Tabla de contenido

Introducción	8
1. Objetivos	9
1.1 Objetivo general	9
1.2 Objetivos específicos.....	9
2. Antecedentes	10
3. Marco teórico	12
4. Metodología	29
5. Resultados	31
6. Análisis de los resultados	36
7. Conclusiones	50
8. Recomendaciones.....	51
Referencias Bibliográficas	53

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Pruebas físico-químicas para determinar la calidad de aguas naturales</i>	17
Tabla 2. <i>Pruebas microbiológicas para determinar la calidad de aguas naturales</i>	24
Tabla 3. <i>Parámetros de calidad de aguas para los vertimientos</i>	31
Tabla 4. <i>Parámetros de calidad de aguas para punto blanco, aguas arriba, aguas abajo y tributario</i>	33
Tabla 5. <i>Valores máximos permitidos de cada prueba según sus posibles usos</i>	36
Tabla 6. <i>Compatibilidad de las muestras de agua para uso en agua potable</i>	38
Tabla 7. <i>Compatibilidad de las muestras de agua para uso en riego agrícola</i>	40
Tabla 8. <i>Compatibilidad de las muestras de agua para uso en recarga de acuíferos</i>	42
Tabla 9. <i>Compatibilidad de las muestras de agua con uso industrial para empresas de cementos</i>	44
Tabla 10. <i>Compatibilidad de las muestras de agua para uso en agua apta para pesca</i>	45
Tabla 11. <i>Tabla de aguas arriba y aguas abajo</i>	46

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Puntos de control para los muestreos.....</i>	30
Figura 2 <i>Primera parte de los resultados de las pruebas de calidad del agua en los puntos aguas abajo y aguas arriba</i>	47
Figura 3 <i>Segunda parte de los resultados de las pruebas de calidad del agua en los puntos aguas abajo y aguas arriba</i>	48
Figura 4 <i>Resultados de los puntos aguas abajo y aguas arriba en Nitrógenos, aguas y aceites.</i>	48
Figura 5 <i>Resultados de los puntos aguas abajo y aguas arriba para Coliformes</i>	49

Resumen

Título: Determinación de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas para el establecimiento del uso del agua en el Río Alto Lebrija en el Departamento de Santander*

Autor: Cristian Andres Gutierrez Romero**

Palabras clave: Tratamiento de aguas, río Lebrija, reutilización de aguas, recurso hídrico.

Descripción:

El estudio analiza la contaminación del río Alto Lebrija debido al crecimiento poblacional en zonas periurbanas y la falta de infraestructura de saneamiento. La descarga de aguas residuales sin tratamiento ha generado una degradación del recurso hídrico, lo que resalta la importancia de evaluar alternativas para su tratamiento y reutilización. El objetivo de la investigación fue determinar las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua en distintos puntos del río, compararlas con la normativa ambiental colombiana y evaluar su potencial para diferentes usos. Para ello, se tomaron muestras en varias ubicaciones y se analizaron parámetros como coliformes fecales y totales, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno amoniacal y sólidos suspendidos, entre otros. Los resultados evidenciaron una heterogeneidad en la calidad del agua a lo largo del río, con mayor contaminación aguas abajo. Se encontró que los altos niveles de coliformes fecales y materia orgánica limitan su uso para consumo humano y recarga de acuíferos. No obstante, ciertos puntos presentan potencial para riego agrícola e incluso para uso industrial, especialmente en el sector cementero, siempre que se implementen tratamientos adecuados. Se concluyó que la contaminación del río es consecuencia de asentamientos sin alcantarillado adecuado. Por ello, se recomienda la construcción de sistemas de saneamiento y plantas de tratamiento de aguas residuales. Además, se sugiere diseñar estrategias de tratamiento diferenciadas según el uso del agua, fomentar la educación ambiental y establecer un plan de monitoreo continuo. Un enfoque integral garantizará la sostenibilidad del recurso hídrico en la región.

*Trabajo de grado

** Facultad, de Ciencias. Escuela de Química. Química. Director: Marianny Yajaira Combariza M. Título académico completo de mayor rango: Doctor en Química. Codirector: Yaneth Quintero López. Título académico completo de mayor rango: Maestría en Química.

Abstract

Title: Determination of physicochemical and microbiological properties for establishing water use in the Alto Lebrija River in the Department of Santander*

Author: Cristian Andres Gutierrez Romero**

Keywords: Water treatment, Lebrija river, water reuse, water resource.

Description:

The study analyzes the contamination of the Alto Lebrija River due to population growth in peri-urban areas and the lack of sanitation infrastructure. The discharge of untreated wastewater has generated a degradation of the water resource, which highlights the importance of evaluating alternatives for its treatment and reuse. The objective of the research was to determine the physicochemical and microbiological characteristics of the water at different points in the river, compare them with Colombian environmental regulations and evaluate its potential for different uses. To do so, samples were taken at various locations and parameters such as fecal and total coliforms, biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), ammoniacal nitrogen and suspended solids, among others, were analyzed. The results showed heterogeneity in water quality along the river, with greater contamination downstream. It was found that high levels of fecal coliforms and organic matter limit its use for human consumption and aquifer recharge. However, certain areas have potential for agricultural irrigation and even for industrial use, especially in the cement sector, provided that adequate treatments are implemented. It was concluded that the river's pollution is a consequence of settlements without adequate sewerage. Therefore, the construction of sanitation systems and wastewater treatment plants is recommended. In addition, it is suggested that treatment strategies be designed according to water use, that environmental education be promoted and that a continuous monitoring plan be established. A comprehensive approach will guarantee the sustainability of water resources in the region.

*Degree Work

** Faculty of Sciences. School of Chemistry. Chemistry. Director: Marianny Yajaira Combariza M. Full academic degree with highest ranking: PhD in Chemistry. Co-director: Yaneth Quintero López. Full academic degree with highest ranking: MSc in Chemistry.

Introducción

El aumento poblacional en las zonas periurbanas del río Lebrija afecta negativamente este recurso hídrico. Esta situación se agrava debido a la falta de infraestructura de saneamiento básico en la región lo que conlleva a la descarga de aguas residuales sin tratamiento al río. El tratamiento y reutilización de aguas residuales es una alternativa para reducir la contaminación de los ríos y mejorar la gestión sostenible del recurso hídrico. Esta propuesta de investigación que hace parte de un proyecto de regalías, busca caracterizar y evaluar el uso potencial de las aguas residuales del río alto Lebrija para la gestión sostenible del recurso hídrico. El estudio de alternativas de reutilización de aguas residuales es una parte importante de la búsqueda de soluciones sostenibles a los problemas de escasez y contaminación del agua.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Determinar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas y establecer usos del agua en el Río Alto Lebrija en el Departamento de Santander.

1.2 Objetivos específicos

Determinar las características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas del Río Alto Lebrija en la cuenca del Suratá, Departamento de Santander.

Comparar los resultados obtenidos con la normativa ambiental colombiana vigente.

Identificar los usos del agua en el río alto Lebrija con base en los resultados obtenidos.

2. Antecedentes

El agua es un recurso esencial para la vida, ya que hace parte de todos los procesos biológicos. Se encuentra en la naturaleza en estado sólido (hielo), líquido (agua) y gaseoso (vapor de agua), y según su salinidad se clasifica en agua dulce, salada y salobre. La contaminación del agua es un problema global asociado con múltiples factores como las actividades humanas, los vertimientos industriales, el uso de pesticidas y fertilizantes, y la falta de tratamiento de las aguas residuales (OMS, 2023).

La contaminación del río Lebrija se debe en gran medida a la problemática social que se vive en el sector. Este río, que históricamente ha sido un recurso vital para diversas comunidades, se encuentra amenazado por la descarga inadecuada de aguas residuales provenientes de asentamientos humanos establecidos en zonas no aptas para tal fin. La falta de implementación de regulaciones ambientales no solo pone en riesgo el equilibrio ecológico del cuerpo hídrico, sino que también impacta negativamente en la calidad de vida de las poblaciones circundantes (Cáñez, 2022). La situación se agrava debido a la falta de infraestructura de saneamiento básico, pues los vertimientos de aguas domésticas se hacen directamente al Río Lebrija, generando una acumulación progresiva de contaminantes (Pérez y Sánchez, 2022).

Esta situación plantea un desafío significativo que demanda de un estudio detallado del problema que permita diseñar soluciones integrales y sostenibles. La necesidad de abordar la contaminación por vertimientos de aguas residuales en el Río Lebrija se ha vuelto apremiante, ya que los impactos de esta problemática no solo afectan la calidad del agua y la salud de los ecosistemas acuáticos, sino que también repercuten en la salud humana y en la disponibilidad de recursos hídricos aptos para el consumo y la actividad económica (Gómez y Guzmán, 2011).

En este contexto, la presente investigación se enfoca en determinar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del agua en el Río Alto Lebrija para poder establecer su uso potencial. Este análisis se convierte en el punto de partida para proponer estrategias y soluciones que permitan la conservación y recuperación de la calidad del agua en el río, así como el mejoramiento de las condiciones de vida de las comunidades que dependen de él. Estas estrategias pueden abarcar desde la infraestructura de saneamiento hasta la concienciación y participación comunitaria en la protección de este recurso vital. La relevancia e implicaciones de este problema se extienden más allá de las fronteras de la cuenca del Río Alto Lebrija, alcanzando a todos aquellos que dependen de este recurso hídrico (Romero y González, 2019).

. Los estudios realizados para zonas periurbanas en el Río Paraná coinciden en que es necesario desarrollar planes de tratamiento de aguas residuales a nivel local y regional, que consideren las fuentes de contaminación, las necesidades de los usuarios y las opciones tecnológicas disponibles (PTAR, 2023).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales son la forma más efectiva de eliminar los contaminantes de las aguas, según los estudios hechos para la construcción de plantas de tratamiento en Medellín estos requieren grandes inversiones por lo cual se recomienda primero educar e incentivar a la ciudadanía sobre su importancia para facilitar su aceptación y el uso de nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas. (PTAR, 2023).

Según la Universidad Nacional de Colombia la educación es esencial para promover el cambio de comportamiento y aumentar la aceptación del tratamiento de aguas residuales. Por ello, es necesario educar a la población sobre la importancia del tratamiento de aguas residuales y sensibilizarlos sobre los riesgos que acarrea dicha contaminación. Lo que esto aportaría puede

contribuir a mejorar la salud humana, el medio ambiente y la calidad de vida de las comunidades (ECAR, 2023).

Los usos del agua en Colombia se determinan con base en el Decreto 1076 de 2015, del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible que regula el uso, manejo, aprovechamiento y conservación de los recursos naturales renovables, entre ellos el agua. Este Decreto establece los requisitos y procedimientos para obtener los permisos, concesiones y autorizaciones ambientales para el uso del agua, así como las sanciones otorgadas por el incumplimiento de las normas ambientales (Minambiente, 2015).

3. Marco teórico

3.1 Tipos de Aguas

Clasificación de las aguas

Colombia al ser un país con gran riqueza hídrica, presenta una variedad de tipos de aguas que se clasifican según su origen, ubicación y características físicas, químicas y biológicas. Esta clasificación permite comprender la distribución, disponibilidad y usos potenciales de este recurso natural (IDEAM, 2014). Las aguas superficiales son aquellas que no están contenidas en el subsuelo, estas se dividen en: ríos, quebradas, arroyos y manantiales. Estas son aguas dinámicas y en movimiento, pero también están las aguas estancadas como las de los lagos, lagunas, embalses y ciénagas las cuales tienen menor movimiento y mayor concentración de sedimentos y nutrientes.

Las aguas subterráneas se encuentran almacenadas en el subsuelo en acuíferos como aguas freáticas o aguas profundas según la profundidad a la que se encuentren.

Las aguas marinas y oceánicas son las que bordean las costas. Son aguas saladas con una alta concentración de minerales disueltos (CEPAL, 2019).

Las aguas residuales se caracterizan porque han sido utilizadas en actividades humanas o procesos industriales y contienen contaminantes, puede haber aguas residuales domésticas provenientes de viviendas y establecimientos comerciales, aguas residuales industriales provenientes de procesos industriales y aguas residuales agrícolas provenientes de actividades agrícolas y ganaderas (García, 2019).

Las aguas meteorológicas corresponden a las que provienen de la precipitación atmosférica, como la lluvia, la nieve y el granizo, son una fuente importante de agua dulce para el consumo humano y la agricultura (Water Environment Federation, 2017).

Aguas residuales

Las aguas residuales se refieren a las que han sido utilizadas en actividades humanas o procesos industriales y que contienen contaminantes. Estas aguas provienen de diversas fuentes, como viviendas, industrias, agricultura y ganadería, y están compuestas principalmente de materia orgánica e inorgánica, así como también de microorganismos y gases (García, 2019).

3.2 Tipos de Contaminantes

Los contaminantes químicos que se encuentran en las aguas pueden clasificarse en dos grupos principales: contaminantes orgánicos y contaminantes inorgánicos. Los contaminantes orgánicos incluyen compuestos como hidrocarburos, detergentes, pesticidas y metales pesados., entre otros. Estos contaminantes pueden ser perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente, ya que causan problemas en la salud humana, dañan a los ecosistemas acuáticos y contaminan los acuíferos.

Los contaminantes inorgánicos incluyen compuestos como nitratos, fosfatos, metales pesados y las sales. Estos contaminantes también son perjudiciales tanto para el ser humano como para el medio ambiente al igual que los contaminantes orgánicos. (García, 2023).

3.3 Fuentes de Contaminación

La concentración de contaminantes químicos en las aguas residuales depende de una serie de factores, como la fuente de las aguas residuales, el tratamiento que se les ha realizado y las condiciones ambientales.

Las aguas residuales industriales pueden contener una amplia gama de contaminantes químicos, como los metales pesados, los compuestos orgánicos volátiles y los ácidos. Estos contaminantes pueden ser perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente.

Las aguas residuales agropecuarias pueden contener contaminantes orgánicos, como los fertilizantes y los pesticidas. Estos contaminantes pueden afectar los acuíferos y dañar los ecosistemas acuáticos (Sánchez & González, 2022).

3.4 Gestión de Aguas

El tratamiento de las aguas residuales puede ayudar a reducir la concentración de contaminantes químicos. Sin embargo, el tratamiento de las aguas residuales es un proceso costoso que no siempre es posible en las zonas rurales.

La gestión de las aguas residuales es un enfoque integral que tiene como objetivo reducir la generación de aguas residuales, mejorar su tratamiento y reutilizarlas de forma segura.

El manejo sustentable de las aguas residuales es esencial para proteger la salud humana y el medio ambiente (CEPAL, 2019).

Este problema se torna aún más apremiante debido a la falta de un enfoque integral que aborde específicamente la caracterización y evaluación de la reutilización de las aguas residuales en el Río Alto Lebrija. A pesar de la importancia ecológica y social del río, no se han llevado a cabo investigaciones exhaustivas que exploren la posibilidad de recuperar y reutilizar el recurso hídrico, como la obtención de fósforo y potasio, o la exploración de otras posibles aplicaciones

beneficiosas. Esta falta de enfoque ha dejado un vacío en el conocimiento científico y técnico necesario para abordar eficazmente la problemática.

En este contexto, se plantea la necesidad de caracterizar las aguas residuales en el Río Alto Lebrija. Este estudio se enfocó en la obtención de datos precisos sobre la composición de las aguas residuales y su potencial uso, con el objetivo de proponer soluciones específicas para el tratamiento y la reutilización de estas aguas. La relevancia y las implicaciones de este enfoque son cruciales para combatir la degradación del río y sus ecosistemas asociados, y para contribuir al bienestar de las comunidades locales que dependen de él (García-Cárdenas, 2019).

En el caso del río Alto Lebrija, es necesario mejorar la infraestructura de saneamiento básico para reducir la cantidad de aguas residuales que se descargan al río sin tratamiento.

También es necesario promover el uso de tecnologías de tratamiento de aguas residuales, como las plantas de tratamiento biológico y las plantas de tratamiento fisicoquímico.

Además, es necesario educar a la población sobre la importancia de la gestión sostenible de las aguas (Cáñez, 2022).

3.5 Importancia de la Calidad

El agua, en su estado puro, es un elemento esencial para la vida en la Tierra. Su presencia es indispensable para el funcionamiento de los ecosistemas, la salud humana y el desarrollo de diversas actividades. Sin embargo, la calidad del agua, definida por sus características físicas, químicas y biológicas, se ve amenazada por la contaminación generada por las actividades humanas.

La calidad del agua para consumo humano es de suma importancia. El agua potable debe cumplir con estándares estrictos para garantizar la salud pública y prevenir enfermedades

transmitidas por el agua. La presencia de contaminantes como bacterias, virus, metales pesados o productos químicos, puede representar un riesgo significativo para la salud (OMS).

Además, en el ámbito agrícola, la calidad del agua influye directamente en la productividad de los cultivos y la salud del suelo. El agua contaminada puede afectar negativamente el crecimiento de las plantas e incluso provocar la acumulación de toxinas en los productos cosechados, afectando la seguridad alimentaria.

En términos de conservación del ecosistema acuático, la calidad del agua es crucial para mantener la biodiversidad y los hábitats naturales. Los ecosistemas acuáticos saludables dependen de un equilibrio de factores como el pH, los niveles de oxígeno disuelto y la ausencia de contaminantes tóxicos. Una mala calidad del agua puede llevar a la degradación de los ecosistemas, la pérdida de especies y la disminución de la calidad de vida para las comunidades que dependen de ellos (Water Environment Federation, 2017).

3.6 Pruebas físico-químicas

La evaluación de la calidad del agua en ríos implica analizar una variedad de contaminantes que pueden afectar tanto a la salud humana como a los ecosistemas acuáticos. Estos contaminantes pueden clasificarse en: materia orgánica biodegradable, grasas y aceites, surfactantes; nutrientes como nitrógeno y fósforo; sólidos en suspensión; microorganismos como bacterias y virus; y parámetros fisicoquímicos como la alcalinidad entre otros. Cada uno de estos componentes influye en la calidad del agua, afectando su transparencia, capacidad para sostener vida acuática y causar eutrofización. Un análisis detallado de estos parámetros permite determinar el estado de la contaminación del cuerpo hídrico y la posibilidad de tomar las medidas necesarias para su conservación y protección (García-Cárdenas, 2019).

Tabla 1. Pruebas físico-químicas para determinar la calidad de aguas naturales

Prueba	Método	Descripción	Principio
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	Reflujo Cerrado - Colorimétrico Standard Methods 5220 D	Mide la cantidad de materia orgánica biodegradable que puede ser oxidada por un agente oxidante fuerte bajo condiciones específicas.	El método se basa en la oxidación de la materia orgánica presente en la muestra de agua por dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en medio ácido y en presencia de un catalizador (sulfato de plata). La cantidad de dicromato consumido en la oxidación es proporcional a la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en la muestra. La cantidad de dicromato restante se determina colorimétricamente a una longitud de onda de 420 nm.
DBO (Demanda Biológica de Oxígeno)	Incubación a 5 días – electrodo de membrana Standard Methods 5210 B, 4500- O G	Mide la cantidad de oxígeno disuelto (OD) consumido por los microorganismos aerobios en la descomposición de materia orgánica biodegradable durante un período de 5 días a una temperatura específica (20°C).	El método se basa en la incubación de una muestra de agua con una población de microorganismos aerobios durante 5 días a 20°C. Durante este período, los microorganismos utilizan el oxígeno disuelto presente en la muestra para descomponer la materia orgánica biodegradable. La cantidad de OD consumida por los microorganismos es proporcional a la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en la muestra. El OD restante después de la incubación se mide con un electrodo de membrana. $DBO = (OD\ inicial - OD\ final) * (factor\ de\ dilución)$

SST (Sólidos suspendidos totales)	Gravimétrico – secado 103-105° C, Standard Methods 2540D	Representan la cantidad de partículas sólidas que se encuentran en suspensión en el agua, incluyendo materia orgánica e inorgánica.	El método se basa en la filtración de una muestra de agua a través de un filtro de fibra de vidrio previamente pesado. Las partículas sólidas presentes en la muestra quedan retenidas en el filtro, mientras que el agua filtrada pasa a través de él. El filtro con las partículas retenidas se seca en un horno a una temperatura específica (103-105°C) hasta alcanzar un peso constante. El aumento de peso del filtro después del secado representa la cantidad de SST en la muestra.
ST (Sólidos Totales)	Gravimétrico - secado a 103°C - 105°C - s.m.2540 b	Representan la cantidad total de materia sólida presente en el agua, incluyendo materia orgánica e inorgánica, disuelta y suspendida.	El método se basa en la evaporación de una muestra de agua a una temperatura específica (180°C) hasta que se seque completamente. Los sólidos presentes en la muestra se quedan como residuo en el recipiente de evaporación, mientras que el agua se evapora. El peso del residuo seco representa la cantidad de ST en la muestra.
AT (Alcalinidad Total)	Volumétrico Standard Methods 2320 B	Es un parámetro fundamental para evaluar la capacidad del agua para neutralizar ácidos. Esta capacidad se debe a la presencia de bases o sustancias disueltas en el agua que pueden reaccionar con los iones hidrógeno (H ⁺) de los ácidos.	El método se basa en la titulación de una muestra de agua con una solución de ácido estándar (por ejemplo, ácido sulfúrico) hasta alcanzar un punto de equivalencia, es decir, hasta que se hayan neutralizado todas las bases o sustancias alcalinas presentes en la muestra. La cantidad de ácido estándar consumida en la titulación es proporcional

			a la cantidad de AT en la muestra.
DT (Dureza Total)	Volumétrico-EDTA Standard Methods 2340C	Es un parámetro fundamental para evaluar la calidad del agua para diversos usos, como consumo humano, riego agrícola, uso industrial y control de la corrosión en tuberías. Representa la concentración de iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) disueltos en el agua.	El método se basa en la formación de complejos estables entre los iones de calcio y magnesio presentes en la muestra de agua con un agente quelante, como el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA). La cantidad de EDTA consumida en la formación de estos complejos es proporcional a la cantidad de DT en la muestra. El exceso de EDTA se titula con una solución de magnesio de concentración conocida para determinar la cantidad total de EDTA utilizada.
Nitrógeno Amoniacal	Titulométrico - Standard Methods 4500 NH3 BC	El nitrógeno amoniacal (NH_3) es un compuesto químico presente en el agua como resultado de la descomposición de materia orgánica. Su determinación es crucial para evaluar la calidad del agua en diversos contextos, incluyendo el control de la contaminación ambiental, el tratamiento de aguas residuales y la acuicultura.	El método se basa en la reacción del nitrógeno amoniacal presente en la muestra con una solución de ácido sulfúrico estandarizada en presencia de un indicador (como fenolftaleína o azul de bromotimol). La cantidad de ácido sulfúrico consumida en la neutralización del amoníaco es proporcional a la concentración de nitrógeno amoniacal en la muestra.
Nitrógeno Total Kjeldahl	Standard Methods 4500 NORG C 4500 NH 3 B, C	El nitrógeno total (NT) es un parámetro crucial para evaluar la calidad del agua y del suelo, ya que indica la cantidad total de nitrógeno presente en estas matrices, incluyendo compuestos orgánicos e inorgánicos.	El método Kjeldahl se basa en la digestión ácida de la muestra para convertir todo el nitrógeno presente en ella en sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. El amonio liberado se destila con un álcali fuerte (NaOH) y se captura en un ácido bórico. La cantidad de amonio

			<p>capturado se determina por titulación con ácido sulfúrico, y esta cantidad es proporcional al NT original en la muestra.</p>
Nitratos	Salicilato - J. RODIER,1998	<p>Los nitratos (NO_3^-) son un compuesto inorgánico presente en el agua y el suelo como resultado de la descomposición de materia orgánica y de la actividad humana (fertilizantes, aguas residuales). Su determinación es crucial para evaluar la calidad del agua potable, el control de la contaminación ambiental y el monitoreo de la fertilidad del suelo.</p>	<p>El método salicilato se basa en la reacción de reducción de los nitratos a nitritos (NO_2^-) en presencia de ácido sulfúrico y cadmio en polvo. Los nitritos reaccionan posteriormente con ácido salicílico en medio alcalino para formar un compuesto nitro fenol amarillo. La intensidad del color amarillo de la solución es proporcional a la concentración de nitratos en la muestra.</p>
Nitritos	Colorimétrico, Standard Methods 4500 NO 2 -B	<p>Los nitritos (NO_2^-) son un compuesto inorgánico presente en el agua y el suelo como producto intermedio de la descomposición de materia orgánica. Su determinación es crucial para evaluar la calidad del agua potable, el control de la contaminación ambiental y el monitoreo de procesos industriales. El método colorimétrico (Standard Methods 4500 NO2-B) es una técnica sencilla y ampliamente utilizada para cuantificar los nitritos en muestras de agua.</p>	<p>El método colorimétrico se basa en la reacción de diazotación de la sulfanilamida con nitritos en presencia de ácido clorhídrico (HCl) y nitrito de sodio (NaNO_2). El compuesto diazo formado reacciona posteriormente con N-(1-naftil)-etilendiamina (NED) para formar un azocolorante rojo intenso. La intensidad del color rojo de la solución es proporcional a la concentración de nitritos en la muestra.</p>

<p>SAAM (Sustancias Activas al Azul de metileno)</p>	<p>Surfactantes Aniónicos como SAAM - Standard Methods 5540 C</p>	<p>También conocidas como surfactantes aniónicos, son compuestos presentes en detergentes, cosméticos, pesticidas y otros productos de uso común. Su presencia en aguas residuales y superficiales puede generar diversos impactos ambientales negativos, como la alteración de la vida acuática y la eutrofización. El método espectrofotométrico con azul de metileno (Standard Methods 5540 C) es una técnica sencilla y ampliamente utilizada para determinar la concentración de SAAM en muestras de agua.</p>	<p>El método se basa en la formación de un par iónico extraíble en cloroformo de color azul por la reacción del azul de metileno catiónico y un tensoactivo aniónico incluyendo al sulfonato de alquilbenceno lineal, otros sulfonatos y ésteres de sulfonatos. La intensidad del color azul de la solución en cloroformo es proporcional a la concentración de SAAM en la muestra.</p>
<p>Grasas y Aceites</p>	<p>Extraction Soxhlet Standard Methods 5520 D</p>	<p>Las grasas y aceites son compuestos orgánicos insolubles en agua, presentes en diversas muestras líquidas como aguas residuales, aceites vegetales y productos alimenticios. Su determinación es crucial para evaluar la calidad ambiental, controlar procesos industriales y garantizar la seguridad alimentaria.</p>	<p>El método Soxhlet se basa en la extracción continua de grasas y aceites de la muestra sólida mediante un solvente orgánico de baja polaridad, como el n-hexano. El solvente caliente circula por un aparato Soxhlet, disolviendo las grasas y aceites de la muestra y depositándolos en un matraz de extracción. El solvente se evapora posteriormente, dejando las grasas y aceites como residuo final.</p>

Ortofosfatos	Cloruro Estañoso Standard Methods 4500P, D	Los ortofosfatos (PO_4^{3-}) son iones inorgánicos presentes en el agua como resultado de la descomposición de materia orgánica y de la actividad humana (fertilizantes, detergentes). Su determinación es crucial para evaluar la calidad del agua potable, el control de la eutrofización en ecosistemas acuáticos y el monitoreo de procesos industriales.	El método se basa en la reacción de reducción de los ortofosfatos a ácido fosforoso (H_3PO_3) en presencia de cloruro de estaño ($SnCl_2$) en medio ácido. El ácido fosforoso reacciona posteriormente con molibdato de amonio ($(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$) en presencia de ácido ascórbico para formar un complejo azul intenso de molibdofosfato. La intensidad del color azul de la solución es proporcional a la concentración de ortofosfatos en la muestra.
PT (Fósforo Total)	Digestión-Ácido Sulfúrico/Ácido Nítrico / Cloruro Estañoso, Standard Methods 4500 P, B, D	Es la cantidad total de fósforo presente en una muestra, incluyendo compuestos orgánicos e inorgánicos. Su determinación es crucial para evaluar la calidad del agua y del suelo, ya que indica el potencial de eutrofización en ecosistemas acuáticos y la fertilidad del suelo.	El método se basa en la digestión ácida de la muestra para convertir todo el fósforo presente en ella en ortofosfato (PO_4^{3-}). La digestión se realiza con una mezcla de ácido sulfúrico concentrado y ácido nítrico, que hidroliza la materia orgánica y libera el fósforo unido a compuestos orgánicos. El ortofosfato liberado se determina posteriormente utilizando el método del cloruro estañoso.
Turbiedad	Nefelométrico - s.m.2130 b	La turbiedad es una medida de la cantidad de partículas suspendidas en un líquido, como el agua. Estas partículas pueden ser de diversos tamaños y orígenes, incluyendo arcilla, arena, materia orgánica, microorganismos y otros compuestos. La turbiedad del agua es un factor importante que afecta su calidad y	El método se basa en la comparación de la intensidad de la luz dispersada por la muestra con la intensidad de la luz dispersada por una suspensión de referencia estándar. La luz dispersada por las partículas suspendidas en la muestra es proporcional a su concentración y tamaño. Un nefelómetro es un

		potabilidad, ya que puede interferir con la desinfección, el sabor y la apariencia del agua.	instrumento que mide la intensidad de la luz dispersada a un ángulo específico (90°). La relación entre la intensidad de la luz dispersada por la muestra y la intensidad de la luz dispersada por la referencia se utiliza para calcular la Unidad Nefelométrica de Turbiedad (NTU).
Potasio	SM 3030 F. 3120 B.2017 Plasma emisión ICP-OES	El potasio (K) es un mineral esencial para el funcionamiento del cuerpo humano y de las plantas. Se encuentra en diversos alimentos, como frutas, verduras y legumbres. El análisis de potasio es crucial en diversas áreas, incluyendo el control de la calidad del agua potable, la evaluación de la fertilidad del suelo, el análisis de alimentos y la investigación científica.	El método ICP-OES se basa en la excitación de átomos de potasio presentes en la muestra mediante un plasma de alta energía. El plasma es un gas ionizado a alta temperatura que excita los átomos de potasio, haciéndolos emitir luz a longitudes de onda específicas. La intensidad de la luz emitida a una longitud de onda característica del potasio (766.49 nm) es proporcional a la concentración de potasio en la muestra.

3.7 Pruebas microbiológicas.

La evaluación microbiológica del agua es esencial para garantizar su calidad y seguridad. A través de una serie de pruebas, se busca identificar la presencia de microorganismos indicadores de contaminación fecal, como los coliformes totales y termotolerantes. Estos microorganismos son de gran importancia, ya que su detección permite evaluar el riesgo de presencia de patógenos que pueden causar enfermedades gastrointestinales en humanos y animales. Los análisis microbiológicos son fundamentales para determinar el uso del agua, ya sea para consumo humano,

recreación, agricultura, preservación de flora y fauna entre otros; y así, proteger la salud pública y los ecosistemas acuáticos (Water Environment Federation, 2017).

Tabla 2. Pruebas microbiológicas para determinar la calidad de aguas naturales

Prueba	Método	Descripción	Principio
Coliformes termotolerantes	Sustrato Enzimático	Los coliformes termotolerantes son un grupo de bacterias indicadoras de contaminación fecal en agua, suelo y alimentos. Su presencia en estos medios implica un potencial riesgo para la salud humana, ya que pueden causar enfermedades gastrointestinales.	El método se basa en la capacidad de los coliformes termotolerantes para metabolizar un sustrato enzimático específico (4-metilumbeliferil- β -D-glucuronida, MUG) y producir una enzima (β -glucuronidasa) que cataliza la hidrólisis del sustrato enzimático, liberando un compuesto fluorescente (4-metilumbeliferona, 4-MU) con una temperatura de incubación de 44,5°C en 24 horas. La presencia de fluorescencia en la muestra indica la actividad de la β -glucuronidasa y, por lo tanto, la presencia de coliformes termotolerantes.
Coliformes totales	Sustrato Enzimático	Los coliformes totales son un grupo de bacterias que habitan comúnmente en el intestino de los animales de sangre caliente y en el medio ambiente. Su presencia en agua, suelo y alimentos indica una posible contaminación fecal y un potencial riesgo para la salud humana.	El método se basa en la capacidad de los coliformes totales para metabolizar un sustrato enzimático específico (4-metilumbeliferil- β -D-glucuronida, MUG) y producir una enzima (β -glucuronidasa) que cataliza la hidrólisis del sustrato enzimático, liberando un compuesto fluorescente (4-metilumbeliferona, 4-MU) con una temperatura de incubación de 35°C y 24 horas. La presencia de fluorescencia en la muestra indica la actividad de la β -glucuronidasa y, por lo tanto, la presencia de coliformes totales.

3.8 Tipo de muestreos de aguas:

3.8.1 Muestreo en cuerpos hídricos para análisis microbiológicos y fisicoquímicos

El muestreo es una etapa crucial en los análisis microbiológicos y fisicoquímicos del agua. La elección del método de muestreo dependerá del objetivo del estudio, las características del cuerpo de agua y la matriz de agua (superficial, subterránea, residual). Diferentes tipos de agua requieren distintos enfoques para garantizar que las muestras representen adecuadamente las condiciones del cuerpo hídrico (Metcalf & Eddy, 2003).

3.8.2 Muestreo puntual

Permite obtener una visión rápida de un punto específico en un momento dado, pero no es representativo de toda el área ni de los cambios temporales en las condiciones del agua. Este tipo de muestreo es útil para estudios preliminares o cuando se busca identificar una fuente de contaminación en un punto determinado (Metcalf & Eddy, 2003).

3.8.3 Muestreo compuesto

Integra muestras recogidas en intervalos de tiempo o eventos, proporcionando una visión más completa de las condiciones promedio del agua durante un periodo definido. Sin embargo, puede enmascarar eventos extremos o picos de contaminación que pueden ser importantes para ciertos análisis, como la evaluación de episodios de descarga (Metcalf & Eddy, 2003).

3.8.4 Muestreo sistemático

Sigue un patrón regular en el espacio o en el tiempo y es útil para identificar patrones y tendencias de contaminación. Este tipo de muestreo es ideal para estudios a largo plazo, donde se busca evaluar cambios estacionales, impactos de actividades humanas o variaciones debidas a factores naturales (Metcalf & Eddy, 2003).

3.8.5 Muestreo aleatorio

Garantiza una mayor representatividad de toda el área de estudio, ya que reduce el sesgo al seleccionar puntos de muestreo de forma aleatoria. Sin embargo, puede no ser eficiente en áreas muy heterogéneas o donde la distribución de contaminantes es muy irregular (Metcalf & Eddy, 2003).

3.8.6 Muestreo estratificado

Es esencial cuando el área de estudio presenta características heterogéneas, como diferentes zonas o capas en un cuerpo de agua. La estratificación puede realizarse en función de diversas variables como la profundidad, la temperatura, la salinidad o la presencia de fuentes de contaminación. Este tipo de muestreo es especialmente útil en lagos, embalses y estuarios, donde las condiciones varían considerablemente a lo largo del perfil vertical o en diferentes subzonas del cuerpo de agua. Esto permite una evaluación más precisa de la calidad del agua en cada estrato o zona específica, asegurando que las áreas con diferentes características se consideren por separado (Metcalf & Eddy, 2003).

3.8.7 Otros tipos de muestreo

Existen también otros métodos de muestreo menos comunes pero útiles en situaciones específicas. Por ejemplo, el muestreo pasivo utiliza dispositivos que acumulan contaminantes durante un período prolongado, proporcionando información sobre la exposición acumulada a contaminantes específicos a lo largo del tiempo. Este método es útil en estudios de contaminación crónica o donde se busca evaluar la presencia de contaminantes que varían poco con el tiempo (Cornwell, 2012).

3.8.8 Muestreo biológico

Se basa en el análisis de comunidades biológicas, como fitoplancton, macroinvertebrados o peces, que actúan como bioindicadores de la calidad del agua. Este tipo de muestreo es

fundamental cuando se quiere evaluar el impacto de la contaminación sobre los ecosistemas acuáticos y no solo en los parámetros fisicoquímicos del agua (APHA, AWWA, & WEF, 2012).

3.8.9 Consideraciones sobre la matriz de agua

Es crucial considerar la matriz del agua (agua superficial, subterránea, residual) al seleccionar el tipo de muestreo y los parámetros a analizar. Las aguas superficiales, como ríos y lagos, están expuestas a contaminantes atmosféricos y de escorrentía, mientras que las aguas subterráneas pueden tener diferentes patrones de contaminación, como compuestos orgánicos persistentes o infiltración de nitratos. Por su parte, las aguas residuales presentan características específicas que requieren un enfoque diferenciado, dado que su composición química y biológica suele estar más alterada (Cornwell, 2012).

3.8.10 Procedimientos de calidad del muestreo

Para garantizar la calidad de las muestras, se deben seguir procedimientos estrictos. Esto incluye el uso de recipientes esterilizados, la toma de un volumen adecuado de muestra según el tipo de análisis requerido (por ejemplo, microbiológico o fisicoquímico), la conservación de las muestras a 4 °C sin congelar y su rápido transporte al laboratorio para evitar alteraciones en los resultados. Además, para parámetros como el pH, oxígeno disuelto y temperatura, es recomendable realizar mediciones in situ, ya que estos parámetros pueden cambiar rápidamente tras la recolección de la muestra (APHA, AWWA, & WEF, 2012).

3.8.11 Muestras puntuales de grasas y aceites

Para recoger una muestra de grasas y aceites para un vertimiento, se debe usar un recipiente limpio y hermético de 500 ml, la muestra se debe recoger a una profundidad de 10 cm desde la superficie del agua y se debe abrir el recipiente justo antes de que se sumerja (Cornwell, 2012).

3.8.12 Muestras puntuales de coliformes

Para las muestras de coliformes totales y coliformes termo-tolerantes se debe hacer de la misma manera descrita anteriormente, pero en un recipiente de 100 ml, teniendo en cuenta que el recipiente antes de ingresar a el agua debe tener Tiosulfato de sodio. Las muestras deben guardarse a una temperatura entre 4 – 6 °C. 14 (Cornwell, 2012).

3.9 Normas regulan el agua en Colombia

3.9.1 Norma 2115 de 2007 y Decreto 1594 de 1984

El agua, un recurso vital para la vida en el planeta, requiere de una gestión adecuada para garantizar su calidad y disponibilidad. En Colombia, la regulación de la calidad del agua se encuentra enmarcada en dos instrumentos normativos fundamentales: la Norma 2115 de 2007 y el Decreto 1594 de 1984.

3.9.2 Norma 2115 de 2007: Calidad del Agua para Consumo Humano

Esta norma establece los requisitos fisicoquímicos, microbiológicos y organolépticos que debe cumplir el agua destinada al consumo humano. Entre los parámetros evaluados se encuentran el pH, la turbidez, la conductividad, la presencia de coliformes fecales y el cloro residual libre. El cumplimiento de estos estándares garantiza que el agua sea segura para la salud humana y previene la transmisión de enfermedades hídricas (norma 2115 de 2007).

3.9.3 Decreto 1594 de 1984: usos del agua

Por su parte el decreto 1594 nos habla sobre los usos que se le pueden dar a las aguas en el país. Esta normativa establece límites máximos permisibles para diversos parámetros como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos suspendidos totales, los nutrientes (nitrógeno y fósforo) y los metales pesados. Por lo tanto, este decreto protege los ecosistemas acuáticos para hacer un uso apropiado de los recursos hídricos (Decreto1594, 1984).

3.9.4 Decreto 1076 de 2015: *Compilación para la gestión ambiental*

El objetivo principal de este decreto es unificar de manera simple la normativa ambiental a nivel nacional, tratando temas legales como las áreas protegidas, la gestión de recursos, la calidad del aire y los recursos hídricos, esto último complementando lo establecido lo establecido en otros decretos como el 1594 de 1984 (Decreto 1076, 2015).

4. Metodología

4.1 Toma de muestra.

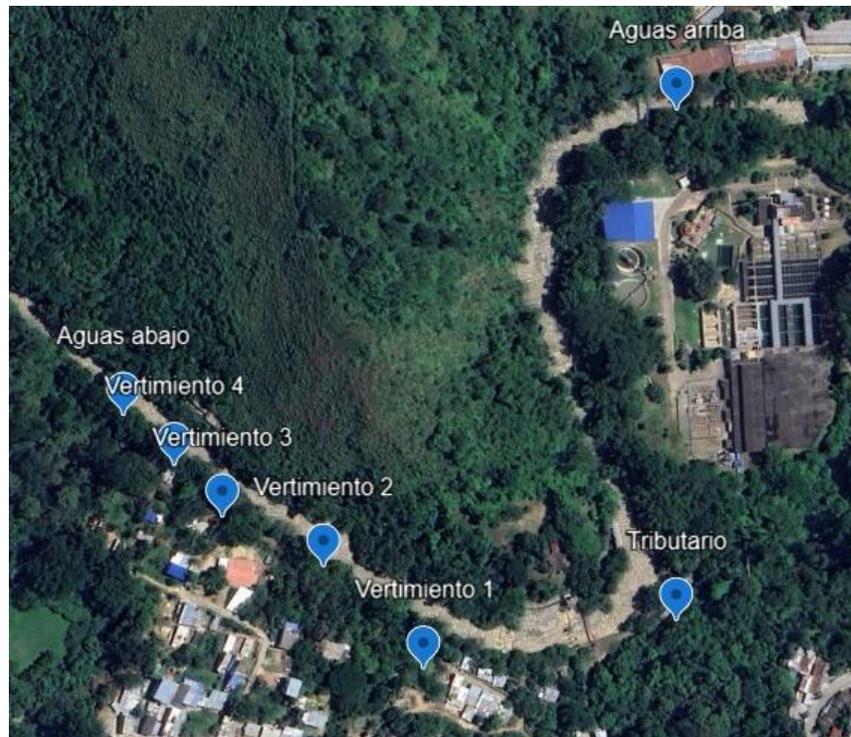
La toma de muestras se realizó en el río Alto Lebrija perteneciente a la cuenca del Surata Alto. Se establecieron 4 puntos de muestreo de aguas residuales los cuales fueron seleccionados por ser los que recibían la mayor cantidad de descargas de los asentamientos no formales. Sobre el cuerpo hídrico se establecieron 3 puntos de muestreo y un tributario, los cuales se escogieron para determinar la influencia de las descargas sobre el río. Los puntos se muestran en la **figura 1**.

Las muestras en los vertimientos se tomaron cada 40 minutos hasta acumular 13 muestras en un periodo de tiempo desde las 8:00 am hasta las 4:00 pm. El muestreo se realizó en un punto profundo del vertimiento del cual se colectó 1 litro de muestra. De este litro tomado 500 ml se depositan en un recipiente que se utilizará posteriormente para tomar una alícuota, el volumen de dicha alícuota es proporcional al caudal en dicho momento, por lo cual en cada una de las 13 muestras se midió el caudal, los 500 ml restantes se utilizan para la toma de pH, conductividad eléctrica y nivel de oxígeno disuelto.

Las siguientes muestras que se recogieron fueron las de grasas y aceites al medio día siguiendo el protocolo propuesto anteriormente en el ítem de **tipos de muestreos**, junto a las muestras de coliformes totales y coliformes termotolerantes. Estas fueron guardadas a una temperatura de 4 – 6 °C.

Figura 1

Puntos de control para los muestreos.

**4.2 Análisis de muestras.**

Las muestras recolectadas fueron trasladadas al laboratorio para su análisis. Se realizaron pruebas fisicoquímicas y microbiológicas con el fin de determinar los parámetros establecidos en las **Tablas 1 y 2**, los cuales son indicativos de la calidad del agua. Los resultados obtenidos permitieron evaluar el estado del cuerpo de agua y determinar si este cumple con los estándares de calidad según la normativa vigente, considerando sus posibles usos.

5. Resultados

Tabla 3. Parámetros de calidad de aguas para los vertimientos.

Parámetro	VERTIMIENTO 1			VERTIMIENTO 2		
	2023-0093	2023-0097	2023-0101	2023-0094	2023-0098	2023-0102
	MONITOREO 1	MONITOREO 2	MONITOREO 3	MONITOREO 1	MONITOREO 2	MONITOREO 3
DQO (mg/L O₂)	255	332	314	194	309	210
DBO₅ (mg/L O₂)	103	125	160	85	116	93
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	26	92	41	29	46	13
Alcalinidad Total (mg/L CaCO₃)	229	227	290	133	124	95
Dureza Total (mg/L CaCO₃)	127	115	111	105	91	97
Nitrógeno Amoniacal (mg/L N-NH₃)	14	16,7	12,1	4	9,2	3
Nitrógeno Total Kjeldahl (mg/L N)	21	25	22	16	21	12
*Nitratos (mg NO₃-N/L)	0,22	0,14	0,15	0,09	0,13	0,15
Nitritos (mg NO₂-N/L)	0,070	0,022	0,032	0,007	0,090	0,002
Sustancias Activas al Azul de Metileno (mg SAAM/L)	0,6	0,7	0,6	0,3	0,3	0,033
Grasas y Aceites (mg/L)	6,1	9	6,2	4,1	6	2
Ortofosfatos (mg/L P-PO₄⁻³)	1,9	3,2	4	4,3	1	0,4
Fósforo Total (mg/L P)	1,9	3,2	4	4,3	1	0,4
Sólidos Totales (mg/L)	430	409	528	325	316	181
Turbiedad (NTU)	13	20	63	17	28	6

Potasio (mg/L K)	12,8	14,0	14,0	12,2	8,81	7,60
Coliformes termotolerantes (QP)	54000	11000	140000	35000	240000	130000
Coliformes totales (QP)	92000	17000	220000	54000	540000	170000
Parámetro	VERTIMIENTO 3			VERTIMIENTO 4		
	2023-0095	2023-0099	2023-0103	2023-0096	2023-0100	2023-0104
	MONITOREO 1	MONITOREO 2	MONITOREO 3	MONITOREO 1	MONITOREO 2	MONITOREO 3
DQO (mg/L O₂)	49	320	52	214	200	214
DBO₅ (mg/L O₂)	41	125	42	93	89	93
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	4,4	19	79	22	33	36
Alcalinidad Total (mg/L CaCO₃)	102	118	135	275	291	193
Dureza Total (mg/L CaCO₃)	69	81	87	101	109	105
Nitrógeno Amoniacal (mg/L N-NH₃)	2	8,2	1	41,4	41,4	35
Nitrógeno Total Kjeldahl (mg/L N)	9	15	8	52	53	43
Nitratos (mg NO₃⁻-N/L)	0,46	0,11	0,46	0,14	0,17	0,12
Nitritos (mg NO₂⁻-N/L)	0,039	0,004	0,018	0,013	0,021	0,048
Sustancias Activas al Azul de Metileno (mg SAAM/L)	0,018	0,036	0,9	0,9	0,7	0,8
Grasas y Aceites (mg/L)	1	7,5	3,2	5,3	4	2,2
Ortofosfatos (mg/L P-PO₄⁻³)	0,4	5,7	0,8	7,4	4,8	1,3
Fósforo Total (mg/L P)	0,4	6,4	0,8	8,6	4,8	1,3
Sólidos Totales (mg/L)	174	210	425	396	454	409

Turbiedad (NTU)	4	6	49	32	41	13
Potasio (mg/L K)	28,9	24,9	26,7	21,2	22,5	11,0
Coliformes termotolerantes (QP)	92000	170000	79000	35000	350000	170000
Coliformes totales (QP)	160000	280000	110000	54000	920000	280000

Tabla 4. *Parámetros de calidad de aguas para punto blanco, aguas arriba, aguas abajo y tributario.*

Parámetro	PUNTO BLANCO				AGUAS ARRIBA			
	2023-0105	2023-0109	2023-0113	2023-0117	2023-0106	2023-0110	2023-0114	2023-0118
	MONITOR EO 1	MONITOR EO 2	MONITOR EO 3	MONITOR EO 4	MONITOR EO 1	MONITOR EO 2	MONITOR EO 3	MONITOR EO 4
DQO (mg/L O₂)	19	22	19	25	17	16	18	5
DBO₅ (mg/L O₂)	9	13	9	11	7	5	8	3
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	13,5	17,5	14	22	11,5	11,3	12	26
Alcalinidad Total (mg/L CaCO₃)	57	57	58	63	58	58	58	60
Dureza Total (mg/L CaCO₃)	63	65	70	71	63	65	71	73
Nitrógeno Amoniacal (mg/L N-NH₃)	0,31	0,27	0,31	0,34	0,27	0,34	0,29	0,25

Nitrógeno Total Kjeldahl (mg/L N)	1	1	1,23	2	0,95	0,84	1,01	0,5
Nitratos (mg NO₃⁻-N/L)	0,17	0,05	0,06	0,1	0,17	0,18	0,09	0,13
Nitritos (mg NO₂⁻-N/L)	0,009	0,001	0,001	0,017	0,02	0,01	0,006	0,017
Sustancias Activas al Azul de Metileno (mg SAAM/L)	0,033	0,018	0,018	0,033	0,009	0,009	0,009	0
*Grasas y Aceites (mg/L)	6,5	5	7,2	4	4	2	2	1
*Ortofosfatos (mg/L P-PO₄⁻³)	0,03	0,04	0,03	0,05	0,01	0,01	0,03	0,1
Fósforo Total (mg/L P)	0	0,02	0	0,06	0	0	0,01	0,1
Sólidos Totales (mg/L)	92	132	142	145	111	58	137	142
Turbiedad (NTU)	10	7	9	11	9	10	7	12
Potasio (mg/L K)	2,3	2,33	2,43	2,59	2,06	2,15	2,21	2,36
Coliformes termotolerantes antes (QP)	9400	1700	6800	200	400	1100	9300	1100
Coliformes totales (QP)	2200	7000	2600	680	3400	4900	2000	3200
	TRIBUTARIO				AGUAS ABAJO			
	2023-0107	2023-0111	2023-0115	2023-0119	2023-0108	2023-0112	2023-0116	2023-0120
	MONITOR EO 1	MONITOR EO 2	MONITOR EO 3	MONITOR EO 4	MONITOR EO 1	MONITOR EO 2	MONITOR EO 3	MONITOR EO 4

DQO (mg/L O ₂)	91	90	11	330	20	91	5	30
*DBO₅ (mg/L O ₂)	55	55	2	127	9	57	2	14
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	19	19,5	8,3	55	20	25	2	26
Alcalinidad Total (mg/L CaCO ₃)	305	288	286	301	58	59	61	61
Dureza Total (mg/L CaCO ₃)	153	151	151	157	63	64	69	71
Nitrógeno Amoniacal (mg/L N-NH ₃)	24	31,4	0,25	15	0,34	29,1	0,22	0,47
Nitrógeno Total Kjeldahl (mg/L N)	33	42	0,73	26	1,29	36	0,45	2,24
*Nitratos (mg NO ₃ ⁻ -N/L)	0,11	0,15	0,12	0,12	0,17	0,16	0,13	0,17
Nitritos (mg NO ₂ ⁻ -N/L)	0,018	0,011	0,008	0,024	0,035	0,044	0,018	0,026
Sustancias Activas al Azul de Metileno (mg SAAM/L)	0,3	0,2	0	0,9	0,018	0,2	0,009	0,036
Grasas y Aceites (mg/L)	7	5	0	17	5	8	0	2

Ortofosfat os (mg/L P-PO₄⁻³)	5	3,2	6,4	6,6	0,1	0,1	0,1	0,1
Fósforo Total (mg/L P)	5	3,2	6,4	8,9	0,1	0,3	0,1	0,3
Solidos Totales (mg/L)	552	517	517	615	130	113	125	153
Turbiedad (NTU)	49	36	32	77	7	8	10	12
Potasio (mg/L K)	20,6	18,3	21,1	17,09	2,26	1,86	3,01	2,61
Coliformes termotolerantes antes (QP)	35000	54000	92000	92000	28000	7900	24000	2100
Coliformes totales (QP)	54000	92000	160000	160000	35000	11000	35000	4700

6. Análisis de los resultados

6.1 Estimación de posibles usos

Tomando en cuenta el decreto 1594 de 1984 y las guías de la OMS que proporcionan lineamientos para usos del agua, se establecieron valores para los posibles usos que se le podrían dar a estas aguas según las pruebas fisicoquímicas y microbiológicas realizadas, aclarar que los valores tomados para limitar el posible uso de agua potable, es bajo tratamiento convencional.

Tabla 5. *Valores máximos permitidos de cada prueba según sus posibles usos.*

Parámetro	Unidad	Valor máximo permisible				
		Agua potable	Riego agrícola	Recarga de acuíferos	Uso industrial	Uso recreativo (pesca)
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	10	30	10	NA	20
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	5	10	5	NA	5

Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	10	50	5	500	50
Sólidos Totales (ST)	mg/L	500	1.000	50	NA	NA
Alcalinidad Total (como CaCO₃)	mg/L	300	Sin límite	300	sin limite	NA
Dureza Total (como CaCO₃)	mg/L	500	Sin límite	500	500	NA
Nitrógeno Amoniacal (NH₄-N)	mg/L	0,5	5	0,5	NA	1
Nitrógeno Total (N)	mg/L	10	30	10	NA	NA
Nitratos (NO₃-N)	mg/L	10	100	10	NA	10
Nitritos (NO₂-N)	mg/L	0,1	5	0,1	NA	NA
Sustancias Activas Aniónicas Detergentes (SAAM)	mg/L	0,5	1	0,5	NA	NA
Grasas y Aceites	mg/L	0,1	10	0,1	NA	NA
Ortofosfatos (PO₄-P)	mg/L	2	2	1	NA	1
Fósforo Total (P)	mg/L	5	5	2	NA	NA
Turbiedad	UNT		10	1	NA	NA
Potasio (K)		Sin límite	Sin límite	Sin límite	NA	NA
Coliformes Termotolerantes	UFC/100 mL	0	1.000	10	NA	200
Coliformes Totales	UFC/100 mL	0	20.000	100	NA	1.000

A partir de los valores obtenidos en los muestreos previamente hechos se decidió promediar los valores obtenidos en cada punto, pero en sus diferentes fechas de muestreos para así tener una apreciación de cuáles serían sus posibles usos.

Tabla 6. *Compatibilidad de las muestras de agua para uso en agua potable.*

Agua potable				
	Vertimiento 1	Vertimiento 2	Vertimiento 3	Vertimiento 4
DQO (mg/L O₂)	300,33	237,67	140,33	209,33
DBO₅ (mg/L O₂)	129,33	98,00	69,33	91,67
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	53,00	29,33	34,13	30,33
Alcalinidad Total (mg/L CaCO₃)	248,67	117,33	118,33	253,00
*Dureza Total (mg/L CaCO₃)	117,67	97,67	79,00	105,00
Nitrógeno Amoniacal (mg/L N-NH₃)	14,27	5,40	3,73	39,27
Nitrógeno Total Kjeldahl (mg/L N)	22,67	16,33	10,67	49,33
Nitros (mg NO₃⁻-N/L)	0,17	0,12	0,34	0,14
Nitritos (mg NO₂⁻-N/L)	0,041	0,033	0,020	0,027
Sustancias Activas al Azul de Metileno (mg SAAM/L)	0,63	0,21	0,32	0,80
Grasas y Aceites (mg/L)	7,10	4,03	3,90	3,83
Ortofosfatos (mg/L P-PO₄⁻³)	3,03	1,90	2,30	4,50
Fósforo Total (mg/L P)	3,03	1,90	2,53	4,90
Sólidos Totales (mg/L)	455,67	274,00	269,67	419,67
Turbiedad (NTU)	32,00	17,00	19,67	28,67
Potasio (mg/L K)	13,60	9,54	26,83	18,23
Coliformes termotolerantes (QP)	68333	135000	113667	185000
Coliformes totales (QP)	109667	254667	183333	418000
	Punto blanco	Aguas arriba	Tributario	Aguas abajo
DQO (mg/L O₂)	21,25	14,00	130,50	36,50
DBO₅ (mg/L O₂)	10,50	5,75	59,75	20,50
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	16,75	15,20	25,45	18,25
Alcalinidad Total (mg/L CaCO₃)	58,75	58,50	295,00	59,75
Dureza Total (mg/L CaCO₃)	67,25	68,00	153,00	66,75
Nitrógeno Amoniacal (mg/L N-NH₃)	0,31	0,29	17,66	7,53
Nitrógeno Total Kjeldahl (mg/L N)	1,31	0,83	25,43	10,00

Nitratos (mg NO₃-N/L)	0,10	0,14	0,13	0,16
Nitritos (mg NO₂-N/L)	0,007	0,013	0,015	0,031
Sustancias Activas al Azul de Metileno (mg SAAM/L)	0,03	0,01	0,35	0,07
Grasas y Aceites (mg/L)	5,68	2,25	7,25	3,75
Ortofosfatos (mg/L P-PO₄⁻³)	0,04	0,04	5,30	0,10
Fósforo Total (mg/L P)	0,02	0,03	5,88	0,20
Solidos Totales (mg/L)	127,75	112,00	550,25	130,25
Turbiedad (NTU)	9,25	9,50	48,50	9,25
Potasio (mg/L K)	2,41	2,20	19,27	2,44
Coliformes termotolerantes (QP)	4525	2975	68250	15500
Coliformes totales (QP)	3120	3375	116500	21425

Los valores en rojo indican que el parámetro no cumple con la normativa para el uso mientras que los verdes significan que cumplen. Teniendo esto en cuenta se saca un porcentaje general que nos dice cuanto de la tabla está en verde dando a entender cuántos resultados en la tabla son apropiados para este uso y otro porcentaje que nos dice cuántas de las pruebas dan un uso positivo para aguas abajo, que nos indican como estos vertimientos afectaron a este rio en ese punto.

Porcentaje general: 47.22%

Porcentaje aguas abajo: 55.55

Aunque con el porcentaje se ve que se podría trabajar con esta agua luego de ser tratada algo que resalta es el hecho de que para considerarse agua potable se necesitan que los coliformes totales sean 0, puesto que en estas aguas se encuentran en valores altos de coliformes hace que aumente el esfuerzo de hacer estas aguas potables para el consumo humano.

Los puntos que mejor resultado dieron para para consumo humano fueron los de agua arriba y el punto blanco con un porcentaje igual de 61.11, pero de igual manera por su alto contenido de coliformes queda descartado para este uso. Por parte de los vertimientos el que mejores resultados

tuvo fue el número 2, debido a su menor cantidad de ortofosfatos, pero solo diferenciado por eso es insuficiente para el consumo humano.

Tabla 7. *Compatibilidad de las muestras de agua para uso en riego agrícola.*

	Riego agrícola			
	Vertimiento 1	Vertimiento 2	Vertimiento 3	Vertimiento 4
DQO (mg/L O₂)	300,33	237,67	140,33	209,33
DBO₅ (mg/L O₂)	129,33	98,00	69,33	91,67
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	53,00	29,33	34,13	30,33
Alcalinidad Total (mg/L CaCO₃)	248,67	117,33	118,33	253,00
Dureza Total (mg/L CaCO₃)	117,67	97,67	79,00	105,00
Nitrógeno Amoniacal (mg/L N-NH₃)	14,27	5,40	3,73	39,27
Nitrógeno Total Kjeldahl (mg/L N)	22,67	16,33	10,67	49,33
Nitratos (mg NO₃-N/L)	0,17	0,12	0,34	0,14
Nitritos (mg NO₂-N/L)	0,041	0,033	0,020	0,027
Sustancias Activas al Azul de Metileno (mg SAAM/L)	0,633	0,211	0,318	0,800
Grasas y Aceites (mg/L)	7,10	4,03	3,90	3,83
Ortofosfatos (mg/L P-PO₄⁻³)	3,03	1,90	2,30	4,50
Fósforo Total (mg/L P)	3,03	1,90	2,53	4,90
Sólidos Totales (mg/L)	455,67	274,00	269,67	419,67
Turbiedad (NTU)	32,00	17,00	19,67	28,67
Potasio (mg/L K)	13,60	9,54	26,83	18,23
Coliformes termotolerantes (QP)	68333	135000	113667	185000
Coliformes totales (QP)	109667	254667	183333	418000
	Punto blanco	Aguas arriba	Tributario	Aguas abajo
DQO (mg/L O₂)	21,25	14,00	130,50	36,50
DBO₅ (mg/L O₂)	10,50	5,75	59,75	20,50
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	16,75	15,20	25,45	18,25
Alcalinidad Total (mg/L CaCO₃)	58,75	58,50	295,00	59,75
Dureza Total (mg/L CaCO₃)	67,25	68,00	153,00	66,75

Nitrógeno Amoniacal (mg/L N-NH₃)	0,31	0,29	17,66	7,53
Nitrógeno Total Kjeldahl (mg/L N)	1,31	0,83	25,43	10,00
Nitratos (mg NO₃-N/L)	0,10	0,14	0,13	0,16
Nitritos (mg NO₂-N/L)	0,007	0,013	0,015	0,031
Sustancias Activas al Azul de Metileno (mg SAAM/L)	0,026	0,007	0,350	0,066
Grasas y Aceites (mg/L)	5,68	2,25	7,25	3,75
Ortofosfatos (mg/L P-PO₄⁻³)	0,04	0,04	5,30	0,10
Fósforo Total (mg/L P)	0,02	0,03	5,88	0,20
Solidos Totales (mg/L)	127,75	112,00	550,25	130,25
Turbiedad (NTU)	9,25	9,50	48,50	9,25
Potasio (mg/L K)	2,41	2,20	19,27	2,44
Coliformes termotolerantes (QP)	4525	2975	68250	15500
Coliformes totales (QP)	3120	3375	116500	21425

Porcentaje general: 69.44%

Porcentaje aguas abajo: 72.22

El uso del agua para riego agrícola muestra el mayor porcentaje de compatibilidad, pero aun así se tiene que tener en cuenta de se deberá trabajar en disminuir valores como de DQO, DBO y nitrógeno amoniacal, esto debido a la alta presencia de materia orgánica en estas aguas, también se debe considerar la cantidad de coliformes presentes en esta agua para el riego agrícola, pero solo deben disminuir en un en un 5.72% para ser aptas.

Por parte de los vertimientos el numero 3 muestra una mayor disponibilidad para riego agrícola con un tratamiento adecuado para esto, mientras que el punto de aguas arriba ignorando la prueba de coliformes termo tolerantes resultaría acto para este uso, por lo cual es un punto perfecto dada su disponibilidad.

Tabla 8. *Compatibilidad de las muestras de agua para uso en recarga de acuíferos.*

Parámetro	Recarga de acuíferos			
	Vertimiento 1	Vertimiento 2	Vertimiento 3	Vertimiento 4
DQO (mg/L O₂)	300,33	237,67	140,33	209,33
DBO₅ (mg/L O₂)	129,33	98,00	69,33	91,67
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	53,00	29,33	34,13	30,33
Alcalinidad Total (mg/L CaCO₃)	248,67	117,33	118,33	253,00
Dureza Total (mg/L CaCO₃)	117,67	97,67	79,00	105,00
Nitrógeno Amoniacal (mg/L N-NH₃)	14,27	5,40	3,73	39,27
Nitrógeno Total Kjeldahl (mg/L N)	22,67	16,33	10,67	49,33
Nitratos (mg NO₃⁻-N/L)	0,17	0,12	0,34	0,14
Nitritos (mg NO₂⁻-N/L)	0,041	0,033	0,020	0,027
Sustancias Activas al Azul de Metileno (mg SAAM/L)	0,63	0,21	0,32	0,80
Grasas y Aceites (mg/L)	7,10	4,03	3,90	3,83
Ortofosfatos (mg/L P-PO₄⁻³)	3,03	1,90	2,30	4,50
Fósforo Total (mg/L P)	3,03	1,90	2,53	4,90
Sólidos Totales (mg/L)	455,67	274,00	269,67	419,67
Turbiedad (NTU)	32,00	17,00	19,67	28,67
Potasio (mg/L K)	13,60	9,54	26,83	18,23
Coliformes termotolerantes (QP)	68333	135000	113667	185000
Coliformes totales (QP)	109667	254667	183333	418000
	Punto blanco	Aguas arriba	Tributario	Aguas abajo

DQO (mg/L O₂)	21,25	14,00	130,50	36,50
DBO₅ (mg/L O₂)	10,50	5,75	59,75	20,50
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	16,75	15,20	25,45	18,25
Alcalinidad Total (mg/L CaCO₃)	58,75	58,50	295,00	59,75
Dureza Total (mg/L CaCO₃)	67,25	68,00	153,00	66,75
Nitrógeno Amoniacal (mg/L N-NH₃)	0,31	0,29	17,66	7,53
Nitrógeno Total Kjeldahl (mg/L N)	1,31	0,83	25,43	10,00
Nitratos (mg NO₃⁻-N/L)	0,10	0,14	0,13	0,16
Nitritos (mg NO₂⁻-N/L)	0,007	0,013	0,015	0,031
Sustancias Activas al Azul de Metileno (mg SAAM/L)	0,03	0,01	0,35	0,07
Grasas y Aceites (mg/L)	5,68	2,25	7,25	3,75
Ortofosfatos (mg/L P-PO₄⁻³)	0,04	0,04	5,30	0,10
Fósforo Total (mg/L P)	0,02	0,03	5,88	0,20
Sólidos Totales (mg/L)	127,75	112,00	550,25	130,25
Turbiedad (NTU)	9,25	9,50	48,50	9,25
Potasio (mg/L K)	2,41	2,20	19,27	2,44
Coliformes termotolerantes (QP)	4525	2975	68250	15500
Coliformes totales (QP)	3120	3375	116500	21425

Porcentaje general: 39.58%

Porcentaje aguas abajo: 50%

Para recarga de acuíferos estas aguas se encuentran con demasiados sólidos y grasas, lo que las hace inadecuadas además de un valor elevado de coliformes para este tipo de pruebas mostrando ser poco compatibles para este uso.

Si se desea utilizar estas aguas para recarga de acuíferos quedarían descartados los vertimientos y el tributario, mientras que los puntos restantes como lo son aguas arriba, aguas abajo y el punto blanco con el tratamiento adecuado podrían servir para emplearse en recarga de acuíferos.

Tabla 9. *Compatibilidad de las muestras de agua con uso industrial para empresas de cementos.*

	Uso industrial			
	Vertimiento 1	Vertimiento 2	Vertimiento 3	Vertimiento 4
*Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	53,00	29,33	34,13	30,33
*Alcalinidad Total (mg/L CaCO₃)	248,67	117,33	118,33	253,00
*Dureza Total (mg/L CaCO₃)	117,67	97,67	79,00	105,00
	Punto blanco	Aguas arriba	Tributario	Aguas abajo
*Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	16,75	15,20	25,45	18,25
*Alcalinidad Total (mg/L CaCO₃)	58,75	58,50	295,00	59,75
*Dureza Total (mg/L CaCO₃)	67,25	68,00	153,00	66,75

Para el uso de aguas industriales se establecen criterios de calidad diferentes según el artículo 48 del decreto 1594 de 1984 debido a que existen diferentes límites permitidos según el tipo de industria, en este caso se hizo para una industria de cemento ya que río abajo existen empresas relacionadas con esta actividad.

También se debe tener en cuenta que existe un límite para la materia orgánica permitida en estas aguas con un valor menor a 3 mg O₂/L muchas de las pruebas realizadas están relacionadas con este valor más sin embarco solo sirven de guía, se necesitaría hacer la prueba específica de materia orgánica para corroborar ese dato, pero aun así estas aguas son muy aptas para un uso industrial, se debería ver que uso se le podría dar en la industria cementera.

Tabla 10. *Compatibilidad de las muestras de agua para uso en agua apta para pesca.*

	Uso recreativo (Pesca)			
	Vertimiento 1	Vertimiento 2	Vertimiento 3	Vertimiento 4
DQO (mg/L O₂)	300,33	237,67	140,33	209,33
DBO₅ (mg/L O₂)	129,33	98,00	69,33	91,67
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	53,00	29,33	34,13	30,33
Nitrógeno Amoniacal (mg/L N-NH₃)	14,27	5,40	3,73	39,27
Nitratos (mg NO₃-N/L)	0,17	0,12	0,34	0,14
Ortofosfatos (mg/L P-PO₄⁻³)	3,03	1,90	2,30	4,50
Coliformes termotolerantes (QP)	68333	135000	113667	185000
Coliformes totales (QP)	109667	254667	183333	418000
	Punto blanco	Aguas arriba	Tributario	Aguas abajo
DQO (mg/L O₂)	21,25	14,00	130,50	36,50
DBO₅ (mg/L O₂)	10,50	5,75	59,75	20,50
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	16,75	15,20	25,45	18,25
Nitrógeno Amoniacal (mg/L N-NH₃)	0,31	0,29	17,66	7,53
Nitratos (mg NO₃-N/L)	0,10	0,14	0,13	0,16
Ortofosfatos (mg/L P-PO₄⁻³)	0,04	0,04	5,30	0,10
Coliformes termotolerantes (QP)	4525	2975	68250	15500
Coliformes totales (QP)	3120	3375	116500	21425

Los valores para decir si el agua es apta para la pesca suelen ser muy variados, esto debido a que es diferente para cada tipo de peces, sin embargo, teniendo en cuenta los peces presentes en

la zona, el agua resulta inadecuada, aunque los pescados puedan vivir en estas aguas no son aptos para el consumo humano.

Tabla 11. *Tabla de aguas arriba y aguas abajo.*

	Aguas arriba	Aguas abajo	Porcentaje de diferencia
DQO (mg/L O₂)	14,00	36,50	61,64%
DBO₅ (mg/L O₂)	5,75	20,50	71,95%
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	15,20	18,25	16,71%
Alcalinidad Total (mg/L CaCO₃)	58,50	59,75	2,09%
Dureza Total (mg/L CaCO₃)	68,00	66,75	1,87%
Nitrógeno Amoniacal (mg/L N-NH₃)	0,29	7,53	96,18%
Nitrógeno Total Kjeldhal (mg/L N)	0,83	10,00	91,75%
Nitratos (mg NO₃-N/L)	0,14	0,16	9,52%
Nitritos (mg NO₂-N/L)	0,01	0,03	56,91%
Sustancias Activas al Azul de Metileno (mg SAAM/L)	0,01	0,07	89,73%
Grasas y Aceites (mg/L)	2,25	3,75	40,00%
Ortofosfatos (mg/L P-PO₄³⁻)	0,04	0,10	62,50%
Fósforo Total (mg/L P)	0,03	0,20	86,25%
Sólidos Totales (mg/L)	112,00	130,25	14,01%
Turbiedad (NTU)	9,50	9,25	2,70%
Potasio (mg/L K)	2,20	2,44	9,86%
Coliformes termotolerantes (QP)	2975,00	15500,00	80,81%
Coliformes totales (QP)	3375,00	21425,00	84,25%

Comparación entre los puntos de aguas arriba y aguas abajo para mostrar la afectación del río por las descargas provocadas de la zona periurbana, que afecta la concentración de la materia orgánica, microbiológica y otros contaminantes presentes, junto con los porcentajes de diferencia entre los dos puntos

Figura 2

Resultados de los puntos aguas abajo y aguas arriba en potasio, turbiedad, solidos totales, dureza total, alcalinidad total, solidos suspendidos totales, DBO y DQO.

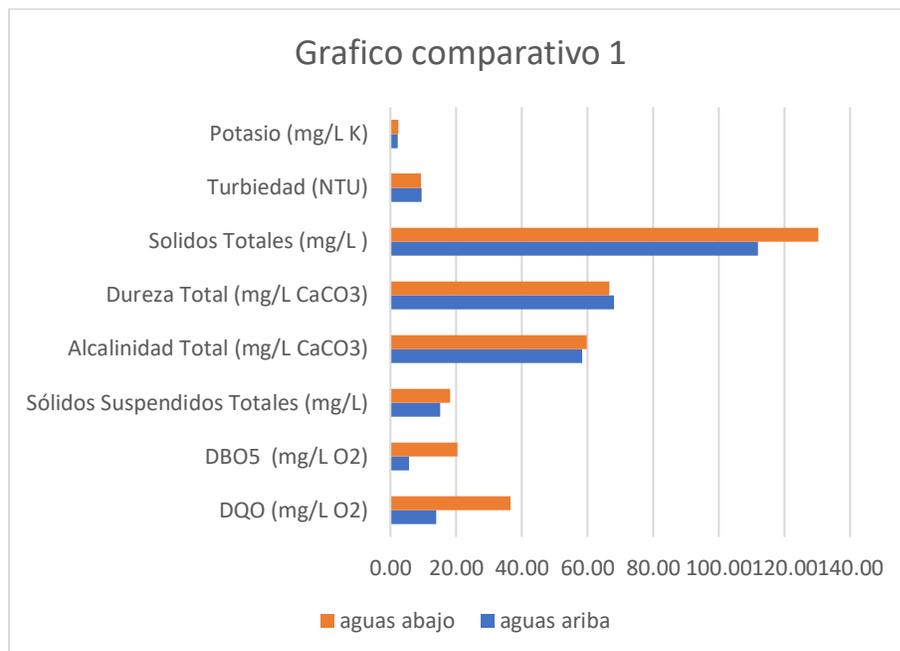


Figura 3

Resultados de los puntos aguas abajo y aguas arriba en fosforo total, ortofosfatos, sustancias activas al azul de metileno, nitritos y nitratos.

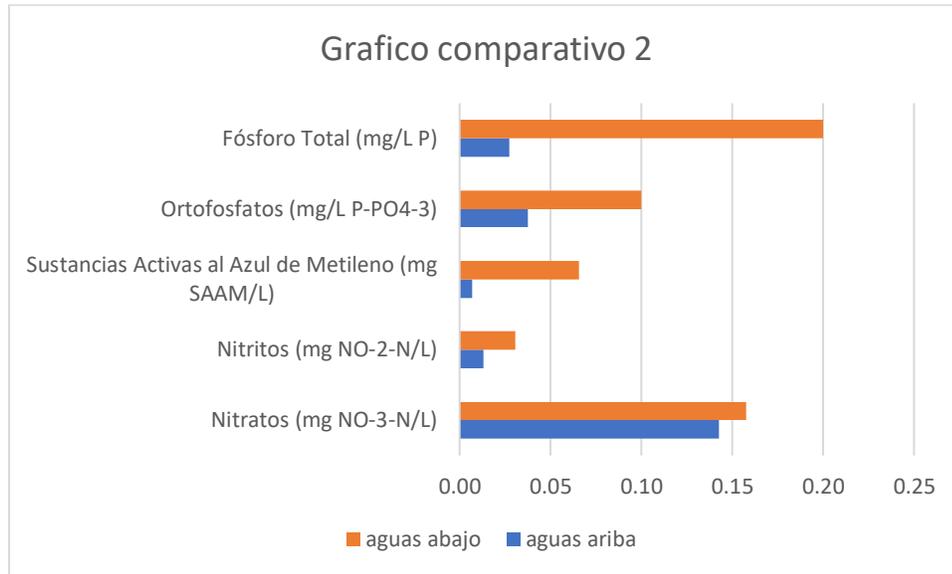


Figura 4

Resultados de los puntos aguas abajo y aguas arriba en grasas y aceites, nitrógeno total y nitrógeno amoniacal.

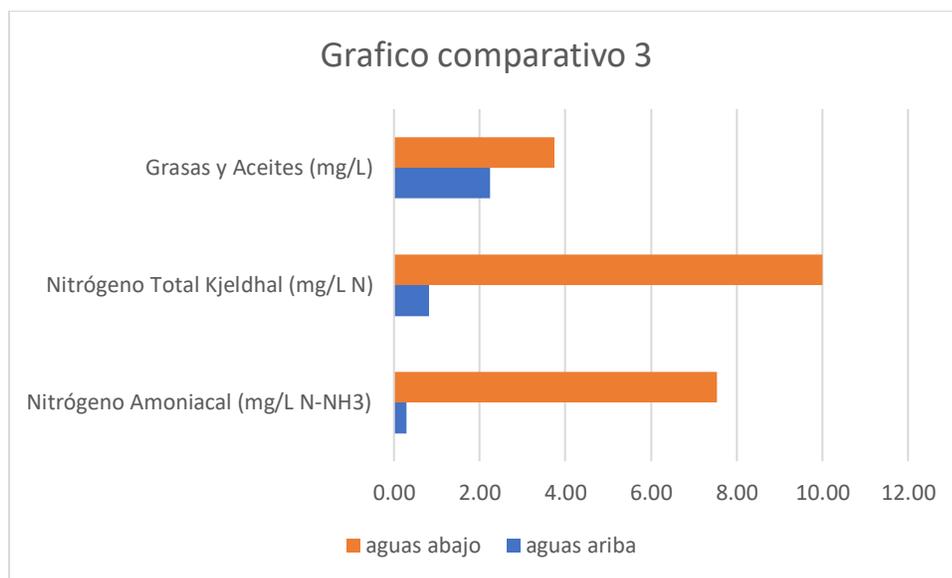
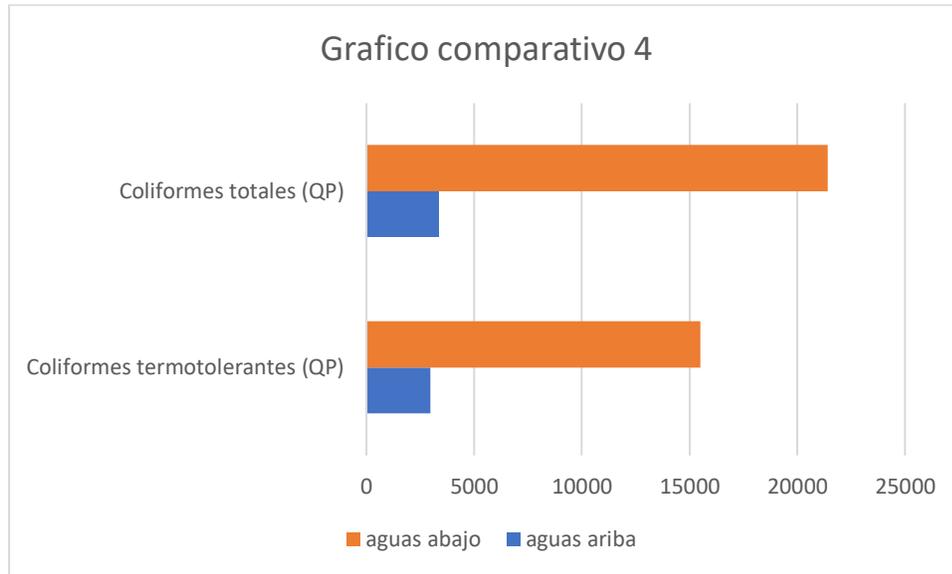


Figura 5

Resultados de los puntos aguas abajo y aguas arriba en coliformes totales y coliformes termotolerantes.



Se presentan los resultados de las pruebas de calidad del agua tomadas en puntos de monitoreo ubicados aguas arriba y aguas abajo. Los valores obtenidos muestran un incremento significativo en las concentraciones aguas abajo, atribuible a los aportes generados por los cuatro vertimientos y el tributario analizados. Esto evidencia el impacto acumulativo de estas fuentes en la calidad del agua, especialmente en parámetros como nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, fósforo total, coliformes termotolerantes y coliformes totales. Sin embargo, se observó que algunos parámetros, en lugar de aumentar su concentración, disminuyeron. Entre estos se encuentran la dureza total y la turbiedad. Esta disminución podría deberse a la mezcla con aguas de menor mineralización, pero dicha hipótesis se descarta al analizar las concentraciones en los vertimientos y el tributario. Por lo tanto, una posible causa de este fenómeno podría ser un proceso de coagulación o sedimentación, probablemente generado por zonas con menor velocidad de flujo o

por la presencia de sustancias en el agua que promueven la coagulación de partículas finas. Estas partículas podrían formar flóculos más grandes que sedimentan con mayor facilidad.

7. Conclusiones

Los resultados del análisis indican que la calidad del agua en los puntos muestreados presenta limitaciones significativas para el consumo humano debido a la contaminación bacteriológica. A pesar de esto, se identifican oportunidades para otros usos. El vertimiento 3 muestra potencial para riego agrícola, mientras que los puntos de aguas arriba, aguas abajo y punto blanco podrían ser considerados para la recarga de acuíferos con las medidas de tratamiento necesarias. Sin embargo, es fundamental destacar que el uso de estas aguas para cualquier propósito debe estar respaldado un tratamiento y la implementación de medidas de gestión adecuadas.

Los resultados del análisis de calidad del agua del Rio Alto Lebrija muestran una marcada heterogeneidad a lo largo del curso del río, con mayores niveles de contaminación en las zonas aguas abajo. Los altos valores de coliformes fecales y coliformes totales limitan severamente el uso del agua para consumo humano y recarga de acuíferos, ya que estos valores superan ampliamente los estándares aceptables para dichas aplicaciones.

La presencia de materia orgánica, reflejada en los niveles de DQO y DBO5 , junto con las concentraciones elevadas de nitrógeno amoniacal, indica una contaminación orgánica significativa. Estos parámetros, junto con los sólidos suspendidos, imponen restricciones al uso del agua para riego agrícola y recarga de acuíferos, ya que requieren una reducción sustancial para garantizar su viabilidad en estos contextos.

El agua analizada muestra potencial para usos industriales, particularmente en el sector cementero, debido a la cercanía de las fábricas presentes rio abajo y a que los valores presentes en sustancias como grasas y aceites, sólidos totales y DQO son más compatibles con los

requerimientos de calidad industrial. Aun así, es imprescindible implementar tratamientos específicos que reduzcan la materia orgánica y otros contaminantes clave para cumplir con los límites permisibles según la normativa vigente.

En cuanto al riego agrícola, el agua puede considerarse viable, pero es crucial mitigar la presencia de coliformes y reducir los niveles de materia orgánica, ya que estos afectan tanto la seguridad como la productividad de los cultivos. La reducción de nitrógeno amoniacal y el manejo adecuado de ortofosfatos también son necesarios para mejorar la calidad del agua en este sector.

Los resultados evidencian que los aportes de los vertimientos y el tributario generan un aumento significativo en las concentraciones de varios parámetros aguas abajo, lo que refleja el impacto contaminante en esta fuente hídrica.

8. Recomendaciones

Dado que la principal fuente de contaminación del río Alto Lebrija es un asentamiento urbano sin alcantarillado adecuado, es prioritario implementar sistemas de alcantarillado y plantas de tratamiento de aguas residuales para reducir la carga orgánica y microbiológica que ingresa al río.

Se deben desarrollar estrategias de tratamiento diferenciadas según el uso previsto: para riego agrícola, se enfocará en la reducción de nutrientes, patógenos y sólidos suspendidos; para uso industrial, en la eliminación de metales pesados, compuestos orgánicos y ajuste de parámetros físico-químicos.

Es fundamental involucrar a la comunidad en la toma de decisiones y en la implementación de las medidas de mejora de la calidad del agua. La educación ambiental y la participación ciudadana son clave para lograr un cambio a largo plazo.

Se debe adoptar un enfoque integral que combine medidas de control en la fuente, tratamiento de las aguas residuales, restauración de ecosistemas degradados y gestión sostenible de los recursos hídricos.

Un plan de monitoreo continuo, que incluya parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y biológicos, permitirá evaluar la evolución de la calidad del agua y la efectividad de las medidas implementadas. Se deben establecer indicadores clave de desempeño para medir el progreso hacia el logro de los objetivos.

Referencias Bibliográficas

- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). Washington, DC: Author.
- APHA, AWWA, & WEF. (Eds.). (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.
- Bohórquez Barrera, J., & Palacio Leal, G. E. (2008). La circulación y el consumo en las cuencas de los ríos Sogamoso y Lebrija: comerciantes y consumidores en el siglo XVIII. *Historia Crítica*, 35, 176-200. <https://doi.org/10.7440/historcrit35.2008.10>
- Cáñez-Cota, A. (2022). Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en México: diagnóstico y desafíos de política pública. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13(1), 184-245.
- Carreño Tarazona, C. I. (2010). Las vías hacia el Magdalena. Los caminos de Lebrija y Sogamoso en el siglo XIX. *Apuntes*, 23(2), 104-117.
- Colombia. (2015, 16 de junio). Decreto 1076 de 2015. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Colombia. Presidencia de la República. (26 de junio de 1984). Decreto 1594. Por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la Ley 9 de 1979, así como el capítulo II del título VI - parte III - libro II y el título III de la parte III - libro I - del Decreto 2811 de 1974, en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. *Diario Oficial*, n. 36.395.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2019). *Calidad del agua en los ríos de América Latina y el Caribe*. Santiago, Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Davis, M. L., & Cornwell, D. A. (2012). *Introducción al tratamiento de aguas residuales*. McGraw-Hill.

El Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015 (Minambiente, 2015). Establece los requisitos y procedimientos para obtener los permisos, concesiones y autorizaciones ambientales para el uso del agua.

García-Cárdenas, M. J. (2019). Contribución de las aguas residuales municipales a la contaminación de los ríos. *Revista Española de Ciencia y Tecnología del Agua*, 33(2), 143-153.

García-López, A. (2023). La contaminación de las aguas residuales en la cuenca del río Lebrija. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 15(1), 1-10.

Gómez, S., & Guzmán, J. (2011). Separación de flujo base en la cuenca superior del río Lebrija. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 61, 59-69

IDEAM. (2014). *Oferta del agua*. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/web/siac/ofertaagua>

Metcalf & Eddy. (2003). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento y reutilización*. McGraw-Hill.

Moreno-López, L. M., García-Cárdenas, A., & García-Salamanca, M. (2021). Composición y caracterización florística de relictos boscosos asociados a la cuenca superior del río Lebrija (Santander-Colombia). *Revista de Biología Tropical*, 69(1), 156-172.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (12 de julio de 2017). La falta de saneamiento es una de las principales causas de enfermedades diarreicas, que son responsables de la muerte de más de 2 millones de niños menores de 5 años cada año. <https://www.who.int/news/item/12-07-2017-2-1-billion-people-lack-safe-drinking-water-at-home-more-than-twice-as-many-lack-safe-sanitation>

- Organización Mundial de la Salud. (2023). El agua: un recurso esencial para la vida.
https://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/en/
- Pérez Sánchez, A., & Sánchez González, M. (2022). Techno-economic evaluation of a chromic wastewater treatment plant proposal. *Rev. ion*, 35(2), 33-48.
<https://doi.org/10.18273/revion.v35n2-2022003>
- Pérez-Martínez, A., Pérez-Martínez, B., & Pérez-Martínez, C. (2022). La falta de infraestructura de saneamiento básico y la contaminación de las aguas residuales en la cuenca del río Lebrija. *Revista de Ciencias Ambientales*, 20(2), 1-15.
- Plan de tratamiento de aguas residuales para la zona periurbana del río Paraná. (2023). Universidad de Buenos Aires.
- Rodier, J. (1998). *Analysis of water and wastewater* (6th ed.). Paris: John Wiley & Sons.
- Romero-Martínez, J. C., González-Gómez, J. J., & Fernández-Fernández, J. (2019). La sedimentación secundaria en los tratamientos biológicos de aguas residuales. *Ingeniería y Ciencia del Agua*, 10(2), 101-123.
- Universidad de Antioquia. (2023). Tratamiento de aguas residuales en zonas periurbanas: un estudio de caso en el río Medellín.
- Universidad Nacional de Colombia. (2023). Estudio de la contaminación de las aguas residuales urbanas en el río Bogotá.