

Análisis De La Relación Potencial Entre Las Variables Hidrológicas y Las
Concentraciones De Mercurio En El Río Suratá

Kevin Jerey Gomez Quintero

Marvin Albarracin Cortes

Trabajo De Grado Para Optar El Título De Ingeniero Civil

Director

Andrés Almeyda Ortiz

Magister En Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Codirector

Sandra Rocío Villamizar Amaya

Ph.D. Environmental Systems

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2025

Tabla de contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	9
1. OBJETIVOS	13
1.1. Objetivo General.....	13
1.2. Objetivos Específicos.....	13
2. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO	13
3. ¿QUÉ DICE LA LITERATURA SOBRE LA RELACIÓN ENTRE VARIABLES HIDROCLIMÁTICAS Y LA PRESENCIA DE MERCURIO EN LA COLUMNA DE AGUA DE LOS RÍOS?	15
3.1. Estrategia metodológica de la revisión bibliográfica.....	15
3.2. Resultados la revisión bibliográfica.....	16
4. METODOLOGÍA.....	20
4.1. Metodología para el análisis de relación potencial entre variables hidroclimáticas y las concentraciones de mercurio en la columna de agua	20
4.2. Caracterización de los patrones hidroclimáticos y de concentraciones de mercurio en la subcuenca del río Surata.	21
4.2.1. Caracterización de los patrones de la precipitación.....	22
4.2.2. Caracterización de los patrones del caudal	25
4.2.3. Caracterización de los patrones del mercurio	26
4.3. Identificación de las correlaciones potenciales entre variables hidroclimáticas y los niveles de mercurio en la subcuenca del río Surata.	27
5. RESULTADOS	32

5.1. Análisis de los patrones hidroclimáticos y las concentraciones de mercurio la subcuenca del río Suratá. 32

5.1.1. Análisis de los patrones de precipitación..... 32

5.1.2. Análisis de los patrones de caudal 36

5.1.3. Análisis de los patrones del mercurio 37

5.2. Análisis de las potenciales correlaciones entre las variables hidroclimáticas y las concentraciones de mercurio en la columna de agua del punto de captación de la planta de tratamiento de agua potable PTAT Bosconia. 39

5.2.1. Relación precipitación-mercurio..... 39

5.2.2. Relación Caudal-Mercurio..... 41

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 44

7. CONCLUSIONES..... 46

8. RECOMENDACIONES 47

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 49

10. APÉNDICES 53

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Estaciones convencionales del IDEAM</i>	22
Tabla 2. <i>Datos faltantes de precipitación en las ecuaciones</i>	23
Tabla 3. <i>Periodos bimodales de precipitación típicos en Colombia</i>	32

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Mapa de localización zona de estudio</i>	14
Figura 2. <i>Diagrama de flujo de la revisión bibliográfica</i>	15
Figura 3. <i>Equipo analizador del mercurio en agua</i>	26
Figura 4. <i>Serie mensual acumulada promedio de precipitación para la estación de Vivero Suratá</i>	33
Figura 5. <i>Vivero Suratá, valores máximos, promedios y mínimos anuales de precipitación</i>	34
Figura 6. <i>Vetas–El Pozo, valores máximos, promedio y mínimos anuales de precipitación</i>	35
Figura 7. <i>Cachiri, valores máximos, promedios y mínimos anuales de precipitación</i>	35
Figura 8. <i>Comportamiento del caudal en el río Suratá entre 1989-2021</i> .to del caudal en el río Suratá entre 1989-2021.....	36
Figura 9. <i>Concentraciones máximas anuales de Hg</i>	38
Figura 10. <i>Registro diario de concentraciones de mercurio y precipitaciones: Estación Cachirí, Río Suratá Cachirí, Río</i>	40
Figura 11. <i>Comportamiento histórico máximos enero</i>	42
Figura 12. <i>Comportamiento histórico máximos noviembre</i>	43

Lista de apéndices

“Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS”

APÉNDICE A. Ilustración 1

APÉNDICE B. Aspectos relevantes de los 22 artículos seleccionados

APÉNDICE C. Resumen de consideraciones de los artículos analizados

APÉNDICE D. Enlace al documento con el análisis estadístico realizado

APÉNDICE E. Revisión bibliográfica de todas las variables hidroclimáticas analizadas

APÉNDICE F. Evidencia fotográfica de la visita técnica a la PTAP Bosconia

APÉNDICE G. Coeficientes de Pearson – Estación Cachirí

APÉNDICE H. Coeficientes de Pearson – Estación Vetas–Pozo

APÉNDICE I. Coeficientes de Pearson – Estación Vivero–Suratá

APÉNDICE J. Coeficientes de Pearson – Caudales

Resumen

Título: análisis de la relación potencial entre las variables hidrológicas y las concentraciones de mercurio en el río Suratá*

Autor: Kevin Jerey Gomez Quintero, Marvin Albarracin Cortes**

Palabras clave: mercurio en columna de agua, minería, precipitación acumulada diaria, caudal promedio diario, correlación.

Descripción: La contaminación del agua por mercurio, derivado de actividades de minería artesanal y en pequeña escala en la parte alta del río Suratá, es un problema ambiental y de salud pública cuyos mecanismos no se conocen. El agua del río Suratá es una fuente de abastecimiento usada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP (amb S.A ESP); cuando los niveles de mercurio superan los límites permitidos para el tratamiento, se restringe la captación y se debe recurrir a otras fuentes hídricas para solventar las necesidades de abastecimiento de la población del área metropolitana. A la fecha, no existen estudios de asociación o causalidad que permitan determinar la ocurrencia de los picos de mercurio en esta fuente hídrica. Por lo tanto, este trabajo de investigación analizó la relación potencial existente entre variables hidrológicas y las concentraciones de mercurio observadas en la columna de agua del río Suratá en el punto de captación de la planta de tratamiento de agua potable de bosconia, localizada en la parte baja de la cuenca. Para ello, primero se indagó en la literatura (periodo 2008-2023) sobre las variables hidroclimáticas asociadas a picos de mercurio en fuentes hídricas. Luego, se realizó la caracterización de patrones de las variables de estudio y de las concentraciones de mercurio usando estadística descriptiva para datos obtenidos de entidades relevantes (IDEAM y amb S.A ESP). Finalmente, se analizaron las potenciales correlaciones entre las variables seleccionadas usando la prueba de correlación de Pearson. La revisión bibliográfica identificó 22 artículos relevantes. El análisis realizado sugiere el uso de la precipitación acumulada diaria en la subcuenca y el caudal diario promedio del río Suratá en el punto de estudio como variables hidroclimáticas relevantes. Los análisis de correlación revelaron una relación directa, fuerte y significativa entre las variables hidroclimáticas (precipitación diaria y caudal del río) y las concentraciones máximas de mercurio en la subcuenca del río Suratá. Esta asociación fue más evidente durante los meses de abril, mayo, octubre y noviembre, coincidiendo con los picos de precipitación. Se identificó una tendencia más marcada al analizar ventanas de tiempo de cinco días antes y después de los picos mensuales de mercurio, lo que sugiere una movilización del metal asociada a eventos de lluvia intensa y aumento del caudal. Estos hallazgos respaldan la hipótesis de que las condiciones hidrológicas influyen directamente en los niveles de mercurio, aunque se recomienda explorar otras variables del ciclo hidrológico en futuras investigaciones.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías. Escuela de ingeniería Ingeniería Civil. Director Andrés Almeyda Ortiz. Codirector Sandra Rocío Villamizar Amaya.

Abstract

Title: analysis of the potencial relationship between hydrological variables and mercury concentrations in the suratá river*

Author: Kevin Jerey Gomez Quintero, Marvin Albarracin Cortes**

Key words: mercury in water columna, mining, daily accumulated precipitation, daily average Flow, correlation

Description: Water contamination by mercury, derived from artisanal and small-scale mining activities in the upper part of the Suratá River, is an environmental and public health problem whose mechanisms are not fully understood. The Suratá River water is a supply source used by the Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP (amb S.A ESP). When mercury levels exceed the permissible limits for treatment, water intake is restricted, and other water sources must be used to meet the supply needs of the metropolitan area's population. To date, there are no association or causality studies to determine the occurrence of mercury peaks in this water source. Therefore, this research paper analyzed the potential relationship between hydrological variables and the concentrations of mercury observed in the water column of the Suratá River at the intake point of the Bosconia drinking water treatment plant, located in the lower part of the basin. To do this, first, the literature was reviewed (2008-2023) on the hydroclimatic variables associated with mercury peaks in water sources. Then, the patterns of the study variables and mercury concentrations were characterized using descriptive statistics for data obtained from relevant entities (IDEAM and amb S.A ESP). Finally, potential correlations between the selected variables were analyzed using the Pearson correlation test. The literature review identified 22 relevant articles. The analysis suggests the use of daily accumulated precipitation in the sub-basin and the daily average flow of the Suratá River at the study point as relevant hydroclimatic variables. The correlation analyses revealed a direct, strong, and significant relationship between the hydroclimatic variables (daily precipitation and river flow) and the maximum mercury concentrations in the Suratá River sub-basin. This association was more evident during the months of April, May, October, and November, coinciding with precipitation peaks. A more pronounced trend was identified when analyzing time windows of five days before and after the monthly mercury peaks, which suggests a mobilization of the metal associated with heavy rainfall events and increased flow. These findings support the hypothesis that hydrological conditions directly influence mercury levels, although it is recommended to explore other variables of the hydrological cycle in future research.

*Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías. Escuela de ingeniería Ingeniería Civil. Director Andrés Almeyda Ortiz. Codirector Sandra Rocío Villamizar Amaya.

Introducción

La minería artesanal y a pequeña escala también conocida por sus siglas (MAPE) representa una de las principales fuentes de contaminación por metales pesados, incluyendo mercurio (Hg), cianuro y cromo, en sistemas hídricos a nivel global (Sankhla et al., 2016), (Zhou et al., 2020). Particularmente, la minería artesanal de oro se erige como la mayor fuente antropogénica de emisiones de mercurio, debido a la facilidad y bajo costo de la amalgamación como método de separación. Este proceso implica la adición de mercurio elemental a sedimentos y rocas auríferas, seguida del calentamiento de la amalgama para evaporar el mercurio y obtener el metal precioso (Yoshimura et al., 2021), (Gallo Corredor et al., 2021), (Keane et al., 2023). En Colombia, aproximadamente 200 toneladas métricas de mercurio elemental se comercializan anualmente para la MAPE, lo que constituye más del 30% del mercurio total utilizado en aplicaciones industriales (Yoshimura et al., 2021), (Gallo Corredor et al., 2021), (Keane et al., 2023).

La adopción de técnicas artesanales en la minería de oro conlleva la dispersión indiscriminada de una fracción significativa del mercurio utilizado en el medio ambiente, generando altos niveles de contaminación en suelos y cuerpos de agua, con las consecuentes implicaciones para la salud humana y animal (Sankhla et al., 2016), (Pan et al., 2023). Adicionalmente, en ecosistemas acuáticos, el mercurio elemental experimenta un proceso de metilación mediado por organismos anaeróbicos, transformándose en metilmercurio, un catión de mayor toxicidad y con una elevada capacidad de bioacumulación y biomagnificación a lo largo de la cadena trófica, incrementando su peligrosidad para el ser humano (Nogara et al., 2019), (Habashi, 2013).

El río Suratá, un tributario crucial para la provisión de agua potable para el área metropolitana de Bucaramanga, aporta entre el 45% y el 55% del agua tratada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb S.A ESP), recibe importantes cargas contaminantes de mercurio provenientes de las actividades mineras que se desarrollan en la parte alta de su cuenca (Sierra, 2023), (Redacción Vanguardia, 2022). En los últimos años, la captación de agua de este río se ha visto comprometida por las elevadas concentraciones de mercurio registradas en su columna de agua en el punto de captación de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) bosconia, alcanzando valores hasta de 850 $\mu\text{g/l}$, detectados el 20 de septiembre de 1994 (amb S.A. E.S.P., 2023).

Estas cargas contaminantes han exigido el desarrollo de un plan de acción por parte del amb S.A. ESP para asegurar el cumplimiento de la normativa vigente para el tratamiento de agua en la PTAP bosconia (Ministerio de Ambiente & Ministerio de Protección Social, 2007), (Ministerio de Agricultura, 1984). La empresa realiza un monitoreo continuo (cada 2 horas) de la concentración de mercurio metálico en fase vapor en el punto de captación mediante un analizador especializado. La frecuencia de monitoreo se intensifica a intervalos de 1 hora y posteriormente a 30 minutos a medida que las concentraciones se acercan al límite máximo de tratamiento de la planta, el cual está establecido en 15 $\mu\text{g/l}$.

El amb S.A. ESP realiza la captación de agua del río Suratá únicamente cuando las concentraciones de mercurio se mantienen por debajo de 15 $\mu\text{g/l}$, ya que el pretratamiento y el tratamiento convencional del cual dispone la planta permite reducir las concentraciones hasta niveles seguros para el consumo humano de 0.001 $\mu\text{g/L}$ (Ministerio de Ambiente & Ministerio de Protección Social, 2007). Cuando los niveles de mercurio en el río superan este umbral, la captación en la PTAP bosconia se suspende, y la empresa depende de otras fuentes hídricas para

abastecer la demanda en su área de cobertura (Ministerio de Ambiente, 2014). Si bien el amb S.A. ESP sigue el protocolo establecido para la captación de agua del río Suratá, hasta el momento no se han llevado a cabo estudios de correlación o causalidad que permitan dilucidar los procesos subyacentes a la ocurrencia de los picos de concentración de mercurio en el agua cruda.

Desde una perspectiva teórica, la potencial correlación entre variables hidrológicas como la precipitación y el caudal con las concentraciones de mercurio puede explicarse a través de diversos mecanismos como la resuspensión de sedimentos por el aumento del caudal del río, la dilución del mercurio por el incremento del volumen del agua, la interacción con materia orgánica disuelta, y procesos de metilación del metal pesado principalmente (EPA, 2008). Un aumento en la precipitación puede intensificar la escorrentía superficial, transportando sedimentos contaminados con mercurio desde las zonas de actividad minera hacia los cuerpos de agua (De Klerk et al., 2013), (Wang et al., 2019).

Asimismo, las variaciones en el caudal pueden influir en la dilución o concentración del mercurio presente en la columna de agua (U.S. Environmental Protection Agency [EPA], 2008). Adicionalmente, procesos biogeoquímicos como la metilación del mercurio, que se ve influenciada por las condiciones redox y la actividad microbiana en los sedimentos y la columna de agua, podrían estar relacionados con los patrones hidrológicos, afectando la disponibilidad y la forma del mercurio detectado, en consecuencia, los cambios en precipitación y caudal no solo modifican la cantidad de mercurio transportado, sino también su forma química y toxicidad, lo cual tiene implicaciones directas sobre la bioacumulación en organismos acuáticos y el riesgo posterior para la salud humana (Singer et al., 2016), (López, 2018).

La literatura científica reporta diversos estudios en contextos similares de minería artesanal de oro en otras cuencas a nivel global, que han identificado relaciones significativas entre variables

hidrológicas y la dinámica del mercurio (Zhou et al., 2020), (Gallo et al., 2021). Por ejemplo, investigaciones en la Amazonía peruana y en algunas regiones de África han demostrado cómo los eventos de lluvia intensa pueden movilizar grandes cantidades de sedimentos mercuriales hacia los ríos, generando picos de contaminación (De Klerk et al., 2013), (Ansah et al., 2022). Asimismo, se ha observado que las fluctuaciones estacionales del caudal pueden alterar la concentración de mercurio disuelto y particulado en los sistemas hídricos afectados por la MAPE. Comprender estas dinámicas en otros contextos puede ofrecer valiosas perspectivas para el caso del río Surata.

En este contexto, este estudio se dedicó a analizar la relación potencial que existe entre variables hidrológicas y las concentraciones de mercurio observadas en la columna de agua del río Surata en el punto de captación de la PTAP bosconia. Para esto, inicialmente, se identificaron las variables hidrológicas relevantes que se asocian a la presencia de mercurio en la columna de agua de ríos, a partir de un ejercicio de revisión bibliográfica. Posteriormente, se caracterizaron los patrones hidroclimáticos y de mercurio en la columna de agua mediante estadística descriptiva. Finalmente, se buscó identificar las correlaciones potenciales entre las variables hidrológicas seleccionadas y las concentraciones de mercurio en la columna de agua. El documento culmina con la discusión de los resultados obtenidos y la formulación de conclusiones relevantes para la gestión de la calidad del agua en la cuenca del río Surata.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Analizar la relación potencial entre variables hidroclimáticas y las concentraciones de mercurio observadas en la columna de agua del río Suratá en el punto de captación de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) Bosconia.

1.2. Objetivos Específicos

Identificar las variables hidroclimáticas que pueden estar relacionadas con la presencia de mercurio en la columna de agua de ríos, a partir de una revisión bibliográfica.

Caracterizar los patrones hidro climáticos y de mercurio en la subcuenca del río Suratá a partir de estadística descriptiva.

Identificar las correlaciones potenciales entre las variables hidro climáticas y las concentraciones de mercurio en la columna de agua en el punto de medición, a partir de análisis estadísticos relevantes.

2. Descripción del sitio de estudio

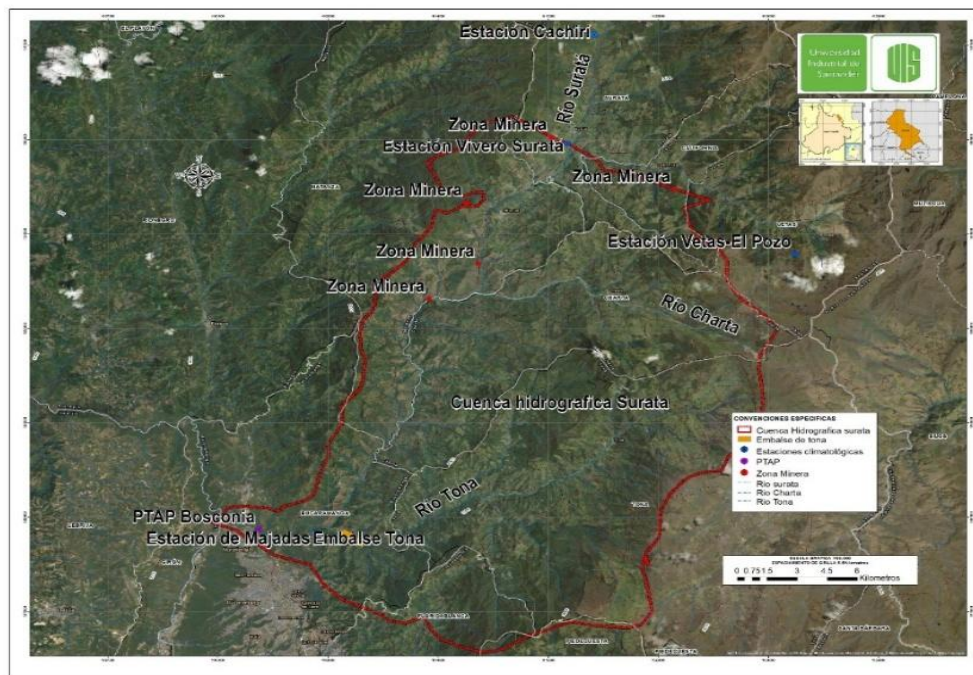
La subcuenca del río Suratá, localizada al noreste de la ciudad de Bucaramanga en la provincia de Soto Norte, hace parte de la cuenca del Alto Lebrija. En su extensión geográfica se ubican los municipios de California, Charta, Matanza, Suratá, Tona y Vetas sumando una población rural y urbana aproximada de 35.000 habitantes. Como actividades económicas principales se destacan la minería en Vetas y California, acompañada por desarrollos agrícolas y ganaderos en los demás municipios. La subcuenca tiene relieves moderados a fuertemente escarpados, con un desnivel que varía entre los 4200 m.s.n.m. hasta los 550 m.s.n.m. La

precipitación anual varía entre los 660 mm y 1200 mm, y la temperatura entre los 0 °C en las zonas más altas hasta 35 °C en las más bajas (Sierra, 2023).

La información hidro climatológica de la subcuenca está disponible en la página del IDEAM a través de la plataforma DHIME (IDEAM, 2020). Se cuenta con tres estaciones de precipitación (pluviógrafos) con ventana de tiempo hidrológicamente significativa (mayor a 30 años): Cachirí, Vetas-El Pozo y Vivero Suratá. También se cuenta con información hidrométrica para la estación Majadas para la ventana de tiempo de 32 años (1989-2021); esta estación está localizada, aproximadamente, 2.5 km aguas arriba del punto de captación. Por otra parte, los datos de concentración de mercurio son recolectados por el amb S.A. ESP, que monitorea la calidad del agua desde el año 1989 en el punto de captación de la PTAP Bosconia (apéndice A).

Figura 1.

Mapa de localización zona de estudio.



Nota: El gráfico representa la ubicación geográfica de todos los elementos y lugares que son de interés de la investigación; como lo son los ríos de la zona, las estaciones hidrológicas, las zonas mineras y la demarcación perimetral de la cuenca.

3. ¿Qué dice la literatura sobre la relación entre variables hidroclimáticas y la presencia de mercurio en la columna de agua de los ríos?

3.1. Estrategia metodológica de la revisión bibliográfica

Para la identificación de las variables hidroclimáticas relevantes, en los motores de búsqueda se aplicaron criterios de inclusión/exclusión tales como: uso de palabras clave en español e inglés como mercurio, minería, precipitación, caudal, columna de agua, correlación, río Suratá; se identificaron (1015 artículos). Se limitó la ventana de tiempo de publicación a los últimos 15 años (2008-2023) buscando identificar los avances más recientes y significativos, y se excluyeron libros y capítulos de libro (364 artículos). A partir de la lectura del título y del resumen del documento se descartaron artículos y referencias con información no relevantes para el tema de estudio (51 artículos). Estos 51 documentos fueron revisados en detalle y se filtraron con base en su contenido bibliográfico quedando, finalmente, 22 artículos (Figura 2). El apéndice B presenta aspectos relevantes de estos 22 artículos.

Figura 2.

Diagrama de flujo de la revisión bibliográfica



Nota: La figura 2 representa la metodología que uso para hacer la escogencia de los artículos en los cuales se basó la investigación.

3.2. Resultados la revisión bibliográfica

Se identificaron variables hidrológicas claves mediante una detallada revisión bibliográfica (apéndice C), en la cual por medio de palabras claves en los motores de búsqueda para determinar la posible correlación con la concentración de mercurio en el punto de captación de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) Bosconia. Las variables identificadas son las precipitaciones y los caudales, cuyos datos fueron tratados, depurados y organizados de acuerdo con la metodología de los incisos 4.1, 4.2 y 4.3. El tratamiento de datos, organización y depuración se contemplan más a detalle en el apéndice D.

La tabla del apéndice E fue llamada “Revisión bibliográfica de todas las variables hidrológicas analizadas inicialmente en la selección de las más adecuadas en el proyecto de investigación”; en esta se analizaron 51 fuentes bibliográficas en las cuales se buscaba determinar qué variables serían escogidas como las más importantes de la investigación; las variables analizadas en esta tabla fueron: precipitación, escorrentía, temperatura, evaporación y evapotranspiración. Esta revisión permitió determinar entonces que dichas variables presentaban mayor recurrencia en la bibliografía analizada, relevancia científica y aplicabilidad en contextos similares a los de este proyecto.

Por otra parte, para la tabla del apéndice B llamada “Resultados de la revisión bibliográfica de las 22 fuentes de información destacable”; en esta tabla se hizo un tamizaje adicional con base a los artículos obtenidos de la revisión bibliográfica, en donde se destacaron características como

lo son los autores, el año de publicación y el objeto de cada artículo; de esta última tabla se determinó que sería la precipitación y los caudales las variables de estudio en la investigación.

También se aborda la relación entre las condiciones ambientales y las concentraciones del mercurio en diferentes ecosistemas (Temme et al., 2004), (De Klerk et al., 2013), y (Singer et al., 2016). Adicionalmente se muestra evidencia de cómo un aumento en la precipitación se correlaciona con un incremento de los niveles de mercurio acumulado, afectando así los ciclos biogeoquímicos existentes en los ecosistemas de montaña subtropicales.

Se analiza las concentraciones de mercurio en el agua y sedimentos de un humedal estacional, dando como resultado que tanto el metilmercurio como el mercurio inorgánico aumentan durante las temporadas de bajos caudales (Singer et al., 2016). Adicionalmente se enfoca en las concentraciones atmosféricas de mercurio, aplicando procesos de descomposición estacional a sus series temporales para interpretar la variabilidad de este contaminante. Estos estudios sirvieron como guía para la selección y análisis de las variables hidroclimáticas en la presente investigación.

Se encontró que, durante la temporada de lluvias, el incremento en los flujos hídricos facilita la resuspensión de sedimentos contaminados, elevando la biodisponibilidad del mercurio. Esta observación justificó la inclusión del caudal en este estudio (De Klerk et al., 2013).

Se evidenció una relación estadísticamente significativa entre los niveles de mercurio en los ríos y factores climatológicos como la precipitación (Gratz et al., 2009). Este hallazgo refuerza la importancia de monitorear la precipitación acumulada diaria, ya que este parámetro es importante para determinar la cantidad de mercurio en la cuenca del río.

Se analizaron la acumulación de mercurio en suelos forestales con respecto a los patrones de precipitación en regiones subtropicales montañosas, llegando a la conclusión de que las lluvias intensas provocan un mayor arrastre del mercurio hacia sistemas acuáticos (Wang et al., 2019). Este estudio respalda aún más la necesidad de incluir la precipitación como variable crítica para caracterizar los picos de carga de mercurio inducidos por eventos hidrometeorológicos extremos.

A partir de esta revisión, se identificó un conjunto de variables potencialmente relevantes, incluyendo precipitación, caudal, temperatura del agua, evaporación, humedad, cantidad de materia orgánica, y pH en la cuenca alta.

Para la selección final de las variables a analizar, se estableció el criterio de frecuencia de mención en la literatura revisada y la disponibilidad de datos continuos y confiables para el periodo de estudio en la cuenca del río Suratá (IDEAM, 2020).

Se emplearon datos meteorológicos de largo plazo de la precipitación diaria acumulada, para establecer correlaciones entre eventos de deposición húmeda y niveles de mercurio en ríos, por lo tanto, se hace necesario contar con datos que permitan realizar los análisis correspondientes entre las variables estudiadas, que serían las concentraciones pico de mercurio y las precipitaciones diarias acumuladas y los niveles de caudal diario promedio (Gratz et al., 2009).

Estas investigaciones previas no solo muestran una alta frecuencia de uso de estas variables, sino que también evidencian la viabilidad técnica de trabajar con series de tiempo continuas, lo que es consistente con la disponibilidad de datos en estaciones hidroclimáticas dentro de la cuenca del río Suratá.

Como resultado de esta revisión (apéndice D), las variables seleccionadas para el análisis de correlación fueron el caudal diario promedio y la precipitación total diaria, ya que estuvieron

consistentemente identificadas en el mayor número de estudios como factores influyentes en la movilización y concentración de mercurio en sistemas hídricos afectados por la minería.

Si bien otras variables como la temperatura del agua, evaporación y cantidad de materia orgánicas son relevantes para comprender la dinámica del mercurio en el sistema hídrico (López, 2018), (EPA, 2008), su inclusión en el análisis de correlación se vio limitada por la disponibilidad de series de tiempo con la misma resolución temporal que los datos de mercurio y las variables hidrológicas primarias. Se encontraron datos de temperatura del agua dentro de la cuenca con cobertura entre 2008 y 2020 en la estación del IDEAM llamada “Uña de Gato” con código de identificación (SA- 07), adicionalmente para el caso de evaporación se encontraron datos desde el 2016 hasta el 2020 en la estación Puente de Panega (SA-06) , y para la materia orgánica desde el 2018 al 2020 en puntos de monitoreo de La Plata identificado con código del IDEAM (SA-05),por lo tanto, resultó insuficiente para su uso en el análisis, y no fueron considerados en la correlación final.

Lo anterior, se justifica porque si bien es cierto algunas variables como la temperatura del agua, la evaporación y la concentración de materia orgánica son relevantes para comprender la dinámica del mercurio en los sistemas hídricos, su inclusión en el análisis de correlación fue limitada por la falta de series de tiempo con la misma resolución temporal que los datos de mercurio y las variables hidroclimáticas principales de acuerdo a los resultados del apéndice D, tanto para precipitación como para caudal. (López, 2018), (EPA, 2008).

4. Metodología

4.1. Metodología para el análisis de relación potencial entre variables hidroclimáticas y las concentraciones de mercurio en la columna de agua

La hipótesis planteada en este trabajo sostiene que las elevadas concentraciones de mercurio presentes en el río Suratá tienen su origen principalmente en las actividades de minería de oro artesanal y en pequeña escala (MAPE), reconocidas como la principal fuente antropogénica de emisiones de este metal. Asimismo, se establece la existencia de una relación significativa entre las variables hidroclimáticas y las concentraciones de mercurio registradas en la columna de agua del río, específicamente en el punto de captación de la PTAP Bosconia.

La selección de estas variables se basó en una revisión bibliográfica detallada que consideró dos criterios fundamentales:

- **Relevancia científica:** Las variables seleccionadas han sido consistentemente identificadas en la literatura como los factores hidroclimáticos con mayor influencia en la movilización y concentración de mercurio en sistemas hídricos impactados por actividades mineras.
- **Viabilidad técnica:** Se comprobó la disponibilidad de series de tiempo continuas y confiables para el periodo de estudio en la cuenca del río Suratá (IDEAM, 2020).

La literatura consultada respalda la inclusión de las siguientes variables:

- **Precipitación:** La ocurrencia de lluvias intensas o acumuladas se correlaciona directamente con el incremento de mercurio, debido al arrastre y lavado del contaminante desde los suelos forestales y la cuenca hacia el cauce del río.

- Caudal: El aumento de los flujos hídricos durante la temporada de lluvias genera la re-suspensión de sedimentos contaminados, lo que eleva significativamente la biodisponibilidad del mercurio en la columna de agua (De Klerk et al., 2013).

Otras variables potencialmente relevantes para la dinámica del mercurio, como la temperatura del agua, la evaporación y la presencia de materia orgánica, fueron excluidas del análisis de correlación final. Esta decisión se fundamentó en la ausencia de series de tiempo con resolución temporal y cobertura comparables a las disponibles para las concentraciones de mercurio y las variables hidroclimáticas principales, lo cual limitaba su uso efectivo en el análisis.

4.2. Caracterización de los patrones hidroclimáticos y de concentraciones de mercurio en la subcuenca del río Suratá.

La caracterización de los patrones hidroclimáticos y de concentraciones de mercurio en la subcuenca del río Suratá tuvo como insumo las series históricas obtenidas del IDEAM y del amb S.A. ESP.

Los datos de los niveles de mercurio provienen de mediciones realizadas por el amb S.A. ESP en la captación de la PTAT bosconia y la información sobre las precipitaciones se obtuvo de tres estaciones climáticas del IDEAM ubicadas en la región: Cachirí, Vetas-El Pozo y Vivero Suratá. Estos datos fueron organizados y analizados en series temporales de las cuales se tomó el día del mes de todo el periodo de estudio donde se presentó el pico máximo de mercurio y se emparejó con su respectivo caudal y precipitación. Se aplicó la prueba del coeficiente de Pearson para evaluar la relación entre los caudales y las precipitaciones con los niveles de mercurio en el río Suratá.

4.2.1. Caracterización de los patrones de la precipitación

Para el análisis de las tendencias de precipitación se usaron tres estaciones convencionales del IDEAM: Vetas-El Pozo, Cachirí y Vivero Suratá (Tabla 1). Estas estaciones están ubicadas en el perímetro de la subcuenca del río Suratá (Ilustración 1) y cuentan con registros históricos de precipitación total diaria suficientes para el análisis en la ventana de tiempo del estudio (1989-2021), correspondiente con la disponibilidad de datos de mercurio en la columna de agua del río Suratá.

Tabla 1.
Estaciones convencionales del IDEAM

Nombre Estación	Coordenadas	Municipio	Tipo Estación
CACHIRÍ	Long: - 72.99 Lat: 7.47	Suratá/ Stder	Climática ordinaria
VETAS- EL POZO	Long: - 72.88 Lat: 7.31	Vetas/ Stder	Climática ordinaria
VIVERO SURATÁ	Long - 72.99 Lat: 7.37	Suratá/ Stder	Climática ordinaria

Nota: Coordenadas geográficas y ubicación espacial de las estaciones. Fuente propia.

Se realizó un análisis de calidad de la información para identificar los datos faltantes y la consistencia temporal, de acuerdo con la metodología de análisis de integridad y validación temporal de las series de precipitación (Temme et al., 2004).

Tabla 2.

Datos faltantes de precipitación en las ecuaciones

Estación	Año	Datos Faltantes
Cachirí	2003	15
	2009	30
	2012	22
	2014	16
	2015	19
	2017	33
	2019	25
	2020	49
	2021	37
	Vetas-El Pozo	1991
1999		30
2009		28
2018		31
2021		20
Vivero-Suratá	2000	11
	2005	15
	2009	154

Nota: Resultado del análisis de calidad de datos faltantes hecho para cada una de las estaciones.

El análisis de la calidad de los datos es fundamental para cualquier estudio hidrológico. Inicialmente, se llevó a cabo una inspección exhaustiva para identificar y gestionar los registros faltantes y nulos en las variables de estudio, empleando herramientas estadísticas para lograr ese fin. El proceso se llevó a cabo utilizando Microsoft Excel como herramienta principal. Se

emplearon filtros automáticos y formatos condicionales para resaltar registros anómalos, así como la herramienta Buscar y Seleccionar para identificar rápidamente valores nulos o duplicados.

Para la detección de registros faltantes, se realizó una inspección manual de las fechas correspondientes al conjunto de datos de precipitación acumulada diaria y caudal promedio diario, con el propósito de identificar discontinuidades en la serie temporal, como saltos entre fechas consecutivas que evidenciaran días sin información (Tabla 2). De manera complementaria, se elaboraron tablas dinámicas en Microsoft Excel para analizar la frecuencia de registros por día y por estación, lo que permitió corroborar la continuidad de las series y confirmar la ausencia de datos vacíos (De Klerk et al., 2013), (Gratz et al., 2009).

Como resultado de este procedimiento, no se identificaron vacíos consecutivos mayores a cinco días, por lo cual se tomó la decisión de no realizar ningún tipo de interpolación de datos. Esta decisión se fundamentó, por un lado, en la necesidad de preservar la integridad estadística de las series temporales, evitando la incorporación de valores estimados que pudieran sesgar los análisis de correlación; y, por otro lado, en la naturaleza no sistemática ni extensa de los datos faltantes, los cuales se presentaron de forma esporádica y con brechas temporales pequeñas (iguales o inferiores a cinco días), sin comprometer de manera significativa la calidad global de las series analizadas.

En cuanto a los valores atípicos, se elaboraron gráficos de las series temporales para cada variable, lo cual permitió una inspección visual del comportamiento de los datos. Los puntos que mostraban variaciones abruptas o fuera de los rangos esperados fueron verificados utilizando el criterio del tiempo de rezago, conforme a lo establecido en la sección 4.2.3 de la metodología. Este procedimiento consistió en comparar el valor crítico con los datos inmediatamente anteriores y

posteriores, determinando si correspondía a un evento hidrológicamente plausible (por ejemplo, un pico de precipitación en temporada de lluvias).

Este proceso de detección de anomalías y vacíos no solo garantizó la integridad de la información, sino que también aseguró que los datos fueran robustos y aptos para los análisis subsiguientes. Posteriormente, se evaluó la consistencia temporal de las series, verificando que las secuencias de eventos críticos, como los picos de precipitación, fueran coherentes y se alinearan con las expectativas hidrológicas.

La validación de la consistencia temporal, en particular en series de precipitación, es un paso crítico para relacionar correctamente los eventos extremos con las concentraciones de metales pesados como el mercurio. Este método, respaldado por la literatura técnica es crucial para detectar patrones esperados en las series de tiempo y para minimizar los errores causados por discontinuidades o registros inadecuados. Al asegurar la integridad de estas series temporales, se facilita la validación de la correlación entre la precipitación y la concentración de contaminantes, lo que es vital para la modelación precisa y el diseño de estrategias de mitigación en la gestión de aguas (Gallo et al., 2021), (De Klerk et al., 2013), (Gratz et al., 2009).

4.2.2. Caracterización de los patrones del caudal

El análisis de tendencias de caudal se basó en los datos de la estación Majadas, proporcionados por el Amb S.A. E.S.P. Esta estación, ubicada 2.5 km aguas arriba de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) Bosconia, posee un registro histórico de caudal promedio diario que abarca el periodo de estudio (1989-2021).

Se ejecutó un control de calidad riguroso sobre la serie de caudal con el fin de identificar y gestionar valores atípicos y/o datos faltantes. La solidez y coherencia de los datos se confirmó,

ya que la serie fue generada a partir del promedio de tres mediciones directas realizadas en el río Surata por parte de Amb S.A. E.S.P. Finalmente, para el análisis de tendencias (Temme et al., 2004), la serie de caudal promedio diario se transformó en una serie de caudal promedio mensual.

4.2.3. Caracterización de los patrones del mercurio

Inicialmente, se realizó una visita técnica a la PTAT bosconia que tuvo como finalidad dialogar e indagar sobre testimonios del líder encargado de la supervisión de la calidad del agua y operación de la planta. Esta persona explicó el proceso del monitoreo del mercurio y manifestó que cuando se presentan eventos de precipitación y aumento en los caudales, las concentraciones de mercurio aumentan por lo cual él supone que se debe al movimiento y arrastre de sedimentos contaminados y relaves de mercurio. En el apéndice F se adjunta evidencia fotográfica de la visita técnica a la PTAP bosconia.

Figura 3.
Equipo analizador del mercurio en agua



Nota: Equipo encargado de detectar presencia del mercurio en el agua y registrar las lecturas de este mismo.

Estos datos, registrados originalmente con una frecuencia horaria, fueron procesados para obtener un valor máximo diario. Este paso a un valor máximo diario se realizó debido a la inconsistencia en la frecuencia de muestreo a lo largo del tiempo, donde no todos los días contaban con registros horarios completos. La adopción del valor máximo diario permitió unificar la resolución temporal para el análisis con las series diarias de precipitación total y caudal promedio.

Como parte del análisis metodológico, se realizó una exploración preliminar de la serie temporal de concentraciones de mercurio con el objetivo de identificar valores atípicos potencialmente relevantes, como el caso de un pico de 850 $\mu\text{g/L}$ registrado en 1994. Estos valores extremos fueron seleccionados para un análisis más detallado en el marco del estudio del tiempo de rezago entre eventos de precipitación, caudal y variaciones en la concentración de mercurio. Se planteó evaluar si dichos picos coincidían o seguían a eventos hidrológicos extremos, con el fin de considerar su inclusión en el análisis de las posibles dinámicas de transporte y movilización del mercurio durante estos episodios.

4.3. Identificación de las correlaciones potenciales entre variables hidroclimáticas y los niveles de mercurio en la subcuenca del río Suratá.

Se estudiaron las concentraciones máximas de mercurio frente a las precipitaciones diarias totales y los caudales promedios diarios con el fin de confirmar o rechazar la hipótesis principal de la investigación; se planteó que el aumento de los caudales del río y las precipitaciones en la subcuenca del río Suratá está correlacionado con el aumento de las concentraciones de mercurio, para lo cual se hicieron gráficas que analizaban el comportamiento de ambas variables (se adjuntan en el apéndice D) usando la metodología encontrada en la revisión bibliográfica (Gratz et al., 2009).

En dicha bibliografía se elaboraron gráficos que permitieron determinar la relación entre variables hidroclimáticas como la precipitación con los niveles de mercurio, caracterizando especialmente así los eventos pico de mercurio para brindar una visión de los patrones climáticos a largo plazo (Gratz et al., 2009).

Para este proceso se utilizó una tabla única que incluía dicha información (caudales y concentraciones de mercurio), para cada uno de los meses estudiados, es decir, los meses en la ventana de estudio que fue de 1989 al 2021, se consignó la concentración máxima de mercurio, junto a los valores de caudal asociados en ese día, para así organizar los datos y comprender la variabilidad de los niveles de mercurio y su potencial relación con los caudales en diferentes momentos del año (De Klerk et al., 2013).

Para analizar los caudales se generaron gráficas que incluyeron niveles máximos mensuales de mercurio (Hg) contra su respectivo valor de caudal, es decir, se seleccionaron los valores máximos para cada mes durante todos los años de estudio y se compararon con los valores medidos de caudal promedio diario en las mismas fechas (Temme et al., 2004).

Este proceso fue replicado para analizar las precipitaciones, agregando series mensuales acumuladas, esto permite determinar patrones a largo plazo, comprendiendo cómo son las variaciones en las precipitaciones cada mes y cada año respectivamente, identificando además los meses con altos y bajos niveles de lluvia, para poder analizar los periodos bimodales de precipitación dentro de la subcuenca del río Suratá, lo cual, se explicó en el inciso 4.2.1 de la metodología.

Además, se identificaron los eventos pico de mercurio y su relación con los periodos bimodales de precipitación (periodos secos y lluviosos) ocurridos en la subcuenca del río Suratá para caracterizar los patrones hidroclimáticos y de concentraciones de mercurio.

Adicionalmente se investigó el tiempo de rezago entre la ocurrencia de las precipitaciones y la presencia de niveles extremos de mercurio, para ello se obtuvieron las fechas donde se presentaron las concentraciones máximas de mercurio para cada uno de los meses de los años estudiados (1989-2021), y se compararon con los valores encontrados de precipitación (en las tres estaciones estudiadas) correspondientes a los 5 días anteriores a cada uno de esos días de concentración pico de mercurio de acuerdo con la metodología encontrada de evaluación del rezago hidroclimático por mercurio en la búsqueda bibliográfica (De Klerk et al., 2013). Dicha metodología se centró en realizar gráficos para analizar la relación entre el mercurio y las precipitaciones estudiando el tiempo de rezago, al comparar los días con niveles pico de mercurio frente a las lluvias que se reportaron los cinco días anteriores.

Para definir este tiempo de rezago, se revisaron estudios previos en cuencas similares, donde se han documentado tiempos de respuesta entre 1 y 7 días, dependiendo de factores como el tamaño de la cuenca, la pendiente, la cobertura del suelo y las condiciones climáticas (De Klerk et al., 2013), (Temme et al., 2004). A partir de esta revisión y considerando las características fisiográficas de la cuenca alta del Suratá, se adoptó un rezago de 5 días como valor representativo para el análisis exploratorio.

Este valor permitió analizar si existía un efecto diferido entre la precipitación y el aumento en el caudal o la concentración de mercurio, evaluando, por ejemplo, si los máximos de precipitación podían estar asociados con picos en las concentraciones de mercurio observados varios días después. El rezago de 5 días también fue utilizado como criterio de validación para la

identificación de valores atípicos, verificando si los eventos extremos se correspondían con patrones de precipitación recientes en ese intervalo de tiempo. Aunque se consideraron rezagos más cortos (1 a 3 días), se observó que los cambios más relevantes en la dinámica del sistema ocurrían típicamente entre 4 y 5 días después de las lluvias intensas, justificando así su uso como referencia en los análisis.

Para poder entender la relación temporal entre ambas variables, y cómo las precipitaciones pueden influir en los niveles de mercurio en función de los tiempos de transporte de este metal pesado en la subcuenca se llevó a cabo un análisis del tiempo de rezago entre dichas variables (Sierra, 2023), (López, 2018). En el Apéndice D se presentan los datos y criterios utilizados para este análisis, los cuales permitieron establecer un rezago representativo de cinco días, con base en la dinámica hidrológica local y en evidencia previa documentada en la literatura científica.

Finalmente se utilizó el coeficiente de Pearson, porque permite evaluar la relación entre precipitaciones, caudales y concentraciones de mercurio, asumiendo un enfoque de linealidad, y aunque existen métodos no lineales más robustos como la correlación de Spearman, de Kendall o una regresión multivariada, se optó por el coeficiente de Pearson debido a su amplio uso en estudios anteriores, por lo que facilita su comparación con estas investigaciones y además ofrece una interpretación clara de la magnitud y dirección de la correlación (De Klerk et al., 2013), (Gratz et al., 2009), (Wang et al., 2019).

Este coeficiente adicionalmente fue seleccionado debido a su precisión en la medición de estas correlaciones, a diferencia de otros como la regresión Spline o polinómica, más adecuados para datos ordinales o de orden jerárquico.

En este contexto, un coeficiente de 1 indica una correlación ideal, mientras que un resultado de 0 muestra una ausencia total de correlación (Pan et al., 2023).

Sí bien inicialmente se compararon los niveles extremos de mercurio frente a los datos de caudales y precipitaciones asociadas, con el fin de tener una visión general de cómo se vinculan estas variables, la prueba de Pearson ayudó a comprobar la correlación entre los caudales y precipitaciones contra las concentraciones de mercurio (Hg), determinando el nivel de asociación correspondiente. Es importante mencionar que el coeficiente de Pearson se calcula con la siguiente ecuación.

$$r = \frac{\sum[x_i - \bar{x}][y_i - \bar{y}]}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

Ec. 1

x_i, y_i son los valores de las variables X, Y

\bar{x}, \bar{y} son las medias de las variables X, Y

Es importante mencionar que no se utilizó el coeficiente de determinación (R^2), ya que no se buscó cuantificar la proporción de la varianza explicada, sino únicamente identificar la existencia y magnitud de una correlación lineal entre los conjuntos de datos analizados.

5. Resultados

5.1. Análisis de los patrones hidroclimáticos y las concentraciones de mercurio la subcuenca del río Suratá.

5.1.1. Análisis de los patrones de precipitación

Se planteó la necesidad de analizar todas y cada una de las variables involucradas en el estudio de manera individual antes de realizar correlaciones. Este proceso inició con la creación de series mensuales acumuladas promedio de precipitación para las tres estaciones climatológicas estudiadas (Cachirí, Vetas-El Pozo, Vivero Suratá).

Dichas series corresponden a la cantidad total promedio de precipitación acumulada registrada en cada uno de los meses estudiados y se realizaron con el objetivo de observar patrones bimodales de precipitación lo cual se pudo comprobar caracterizando dos temporadas distintas: una seca y otra lluviosa, típicas de zonas de convergencia intertropical como Colombia (Ilustración 4), (IDEAM. 2020), (Ministerio de Ambiente, 2014), (Banco de la República, 2023).

Los periodos secos abarcan desde diciembre hasta principios de marzo, y desde principios de junio hasta principios de septiembre (Tabla 3). Por otro lado, las temporadas lluviosas se encuentran en los meses restantes, destacándose por incrementos significativos en la precipitación acumulada.

Tabla 3.
Periodos bimodales de precipitación típicos en Colombia

periodos Secos	diciembre - febrero
	junio - agosto

periodos Húmedos

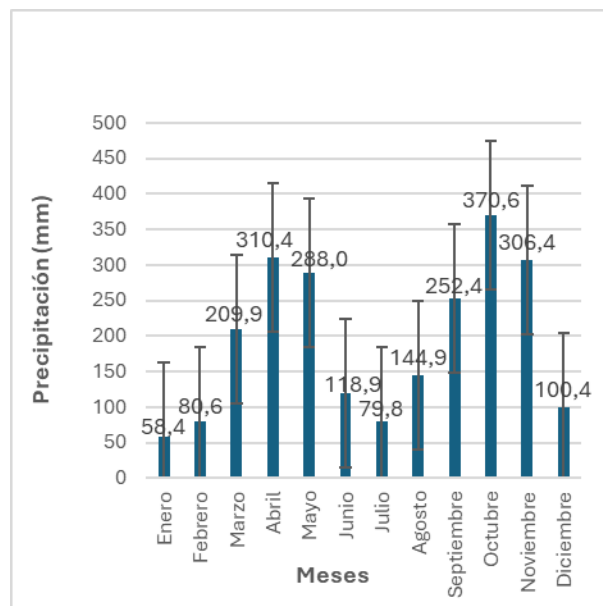
marzo – mayo

septiembre - noviembre

Nota: Los anteriores periodos bimodales de precipitación se determinaron al realizar las series mensuales de precipitación para las tres estaciones climatológicas. Se observó además un patrón bimodal evidente caracterizado por dos temporadas distintas: una seca y otra lluviosa, típicas de zonas de convergencia intertropical como Colombia. A continuación, se presenta la gráfica de una de las estaciones (Vivero Surató) a modo de resumen de los resultados de estas series mensuales acumuladas promedio de precipitación (mm).

Figura 4.

Serie mensual acumulada promedio de precipitación para la estación de Vivero Surató



Nota. A partir de la figura4 se evidencia la validez de los periodos de precipitación que se definieron anteriormente en la subcuenca del río Surató.

Aunque en esta sección se presenta únicamente la información correspondiente a la estación Vivero Surató, esta selección se realizó con el objetivo de sintetizar los resultados y centrar el

análisis en la estación más representativa y relevante para los objetivos del estudio, debido a su ubicación sobre la subcuenca del río Suratá.

El resto de las estaciones consideradas, junto con sus respectivas características (ubicación, cobertura temporal, calidad de los datos y diferencias observadas), se presentan en el Apéndice D a modo de respaldo y para facilitar futuras comparaciones. Se evaluó también la posibilidad de realizar análisis combinados o promediar los registros entre estaciones, pero esta opción fue descartada debido a las variaciones espaciales en el comportamiento hidrológico y a la distancia relativa entre algunas estaciones y el punto de interés del estudio, lo que podría introducir sesgos en los resultados. Adicionalmente se realizó un análisis de la precipitación anual en las estaciones Cachirí, Vetas-El Pozo y Vivero Suratá, con el fin de comprender la variabilidad interanual de las lluvias en la cuenca. Este enfoque se fundamenta en estudios, que resaltan la influencia de la precipitación acumulada en los sistemas fluviales (De Klerk et al., 2013), (Singer et al., 2016).

Figura 5.

Vivero Suratá, valores máximos, promedios y mínimos anuales de precipitación.

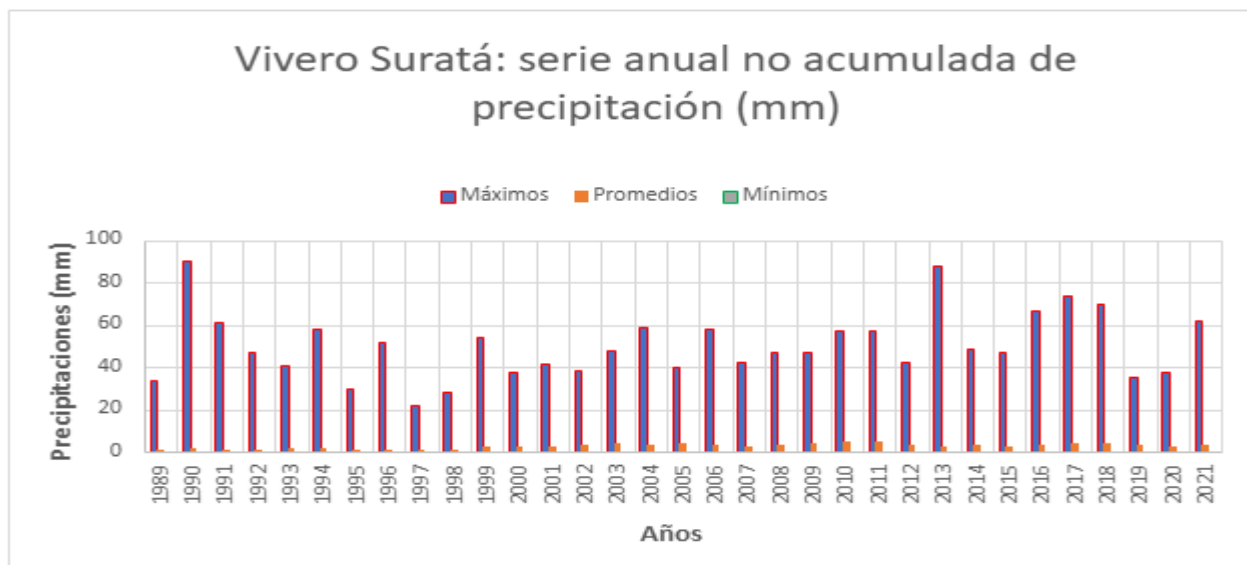


Figura 6.

Vetas–El Pozo, valores máximos, promedio y mínimos anuales de precipitación

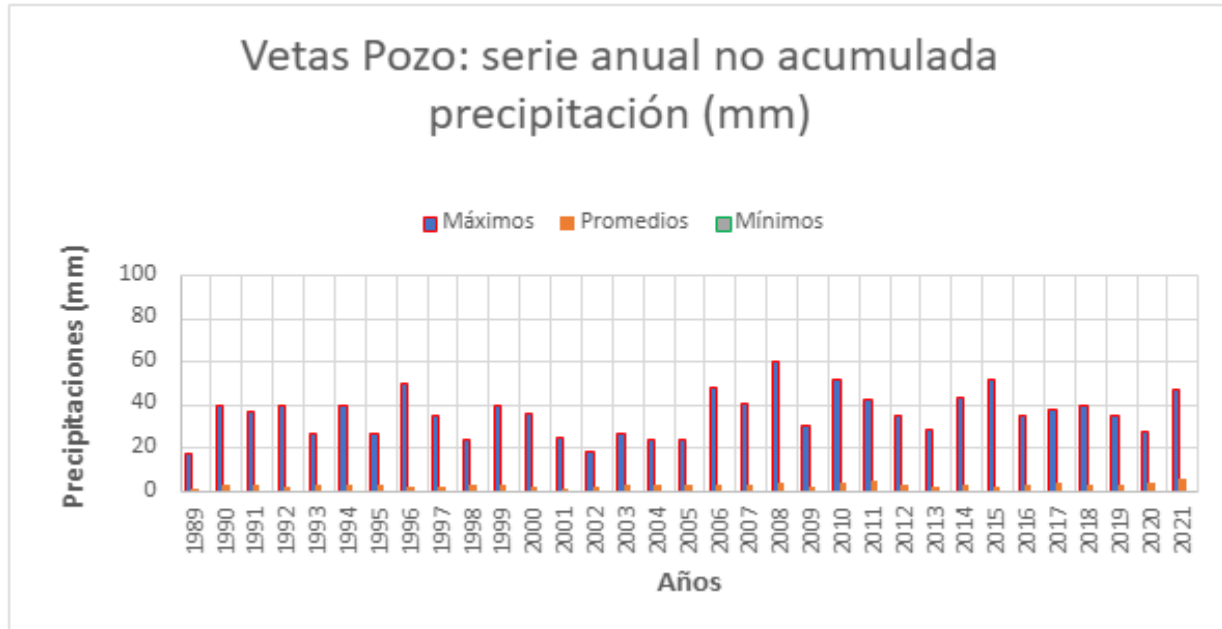
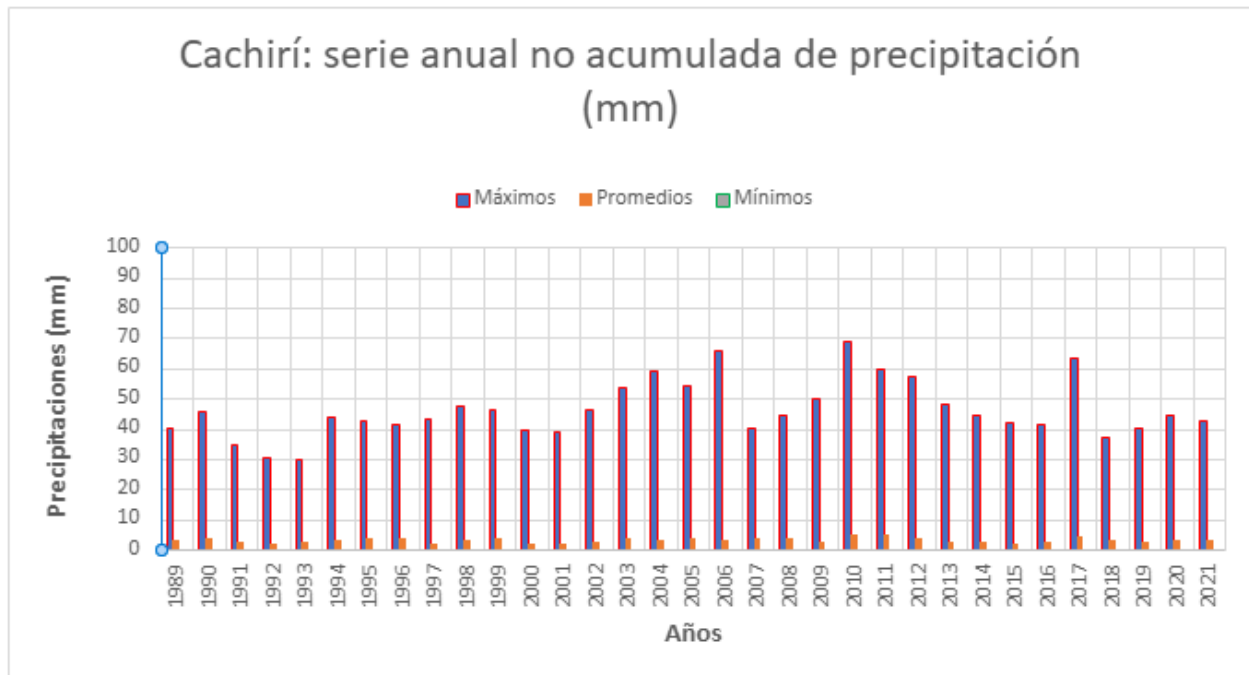


Figura 7.

Cachiri, valores máximos, promedio y mínimos anuales de precipitación



Nota: En las figuras 5, 6 y 7 se observa la variación multianual de la precipitación en las estaciones analizadas, por lo que se concluye que existe influencia de fenómenos climáticos como

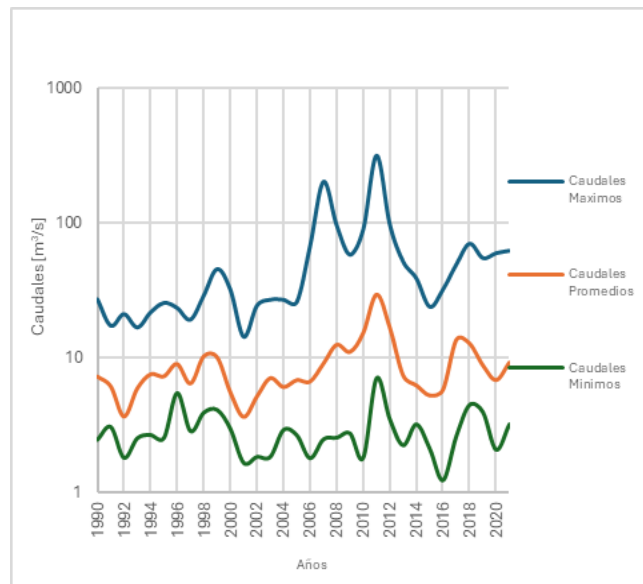
El Niño y La Niña en los valores acumulados de precipitación. Estos resultados permitieron entender la distribución y comportamiento de las precipitaciones en la subcuenca del río Suratá.

5.1.2. *Análisis de los patrones de caudal*

Se planteó analizar el comportamiento del río Suratá haciendo uso de la estadística descriptiva a las mediciones de caudal y así se caracterizó el afluente, obteniendo las gráficas de caudales máximo, promedios y mínimo.

Para obtener las gráficas se tomó el valor máximo, promedio y mínimo por cada año, en la ventana de tiempo en la que se realizó la investigación.

Figura 8.
Comportamiento del caudal en el río Suratá entre 1989-2021.



Nota: En la figura 8 se observa que los caudales máximos están contenidos entre el rango de 14.23 m³/s y 314.11 m³/s, lo que evidencia eventos de alta magnitud posiblemente asociados a lluvias intensas o crecientes súbitas.

Los promedios entre 5.28 m³/s y 29.62 m³/s, representando las condiciones hidrológicas medias del río, que son útiles para evaluar su comportamiento típico anual y por último los mínimos en el rango de 1.22 m³/s y 7.09 m³/s, reflejan los periodos de estiaje o baja disponibilidad hídrica; de esta manera se caracterizó el comportamiento del afluente.

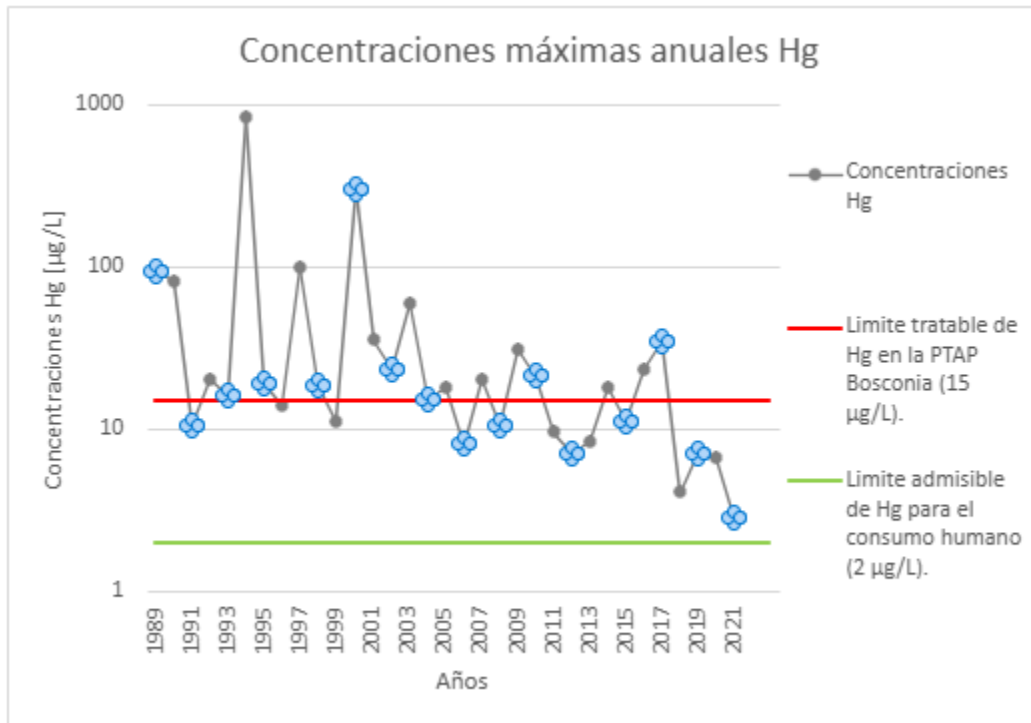
El análisis muestra una alta variabilidad interanual en los caudales máximos, lo que podría estar relacionado con la variabilidad climática regional. La diferencia significativa entre los valores máximos y mínimos sugiere que el río experimenta periodos de alta escorrentía alternados con fases de bajo caudal, lo que puede generar estrés tanto en los ecosistemas como en los usos antrópicos del recurso hídrico.

Asimismo, al comparar los valores promedio con los extremos (máximos y mínimos), se puede concluir que, aunque el comportamiento medio del río es relativamente estable, existen eventos extremos que modifican significativamente la dinámica del caudal.

5.1.3. Análisis de los patrones del mercurio

Al igual que las demás variables se quiso analizar y caracterizar el comportamiento del mercurio; para esta variable el ítem de mayor interés son las concentraciones máximas, porque son los valores que afectan directamente la captación y tratamiento del agua del río Suratá en la PTAP bosconia, así que se obtuvo la siguiente gráfica, es importante mencionar que la ilustración fue el resultado de filtrar los datos de mercurio buscando la máxima concentración anual durante los 32 años de estudio (1989-2021). Esta gráfica muestra la problemática por la cual se llevó a cabo esta investigación, ya que sirve para monitorear los eventos extremos donde se presentaron los mayores niveles de este metal pesado.

Figura 9.
Concentraciones máximas anuales de Hg.



Nota. En la figura 9 se evidencia una alta variabilidad en las concentraciones de mercurio en el río Suratá entre los años 1992 y 2004. Esta variabilidad podría estar relacionada con diversos factores hidrológicos y antrópicos, como fluctuaciones en el caudal, variaciones en la precipitación, y actividades mineras intensivas en la cuenca durante ese periodo.

A partir del año 2010, se observa una disminución progresiva en los niveles de mercurio, lo cual podría asociarse a cambios en las prácticas de extracción minera o a una mejora en las condiciones de tratamiento y control en la cuenca. No obstante, persisten algunos picos significativos, como los registrados en 2017 y 2021, lo que indica que aún existen fuentes intermitentes de contaminación o eventos de remoción y transporte de sedimentos contaminados.

5.2. Análisis de las potenciales correlaciones entre las variables hidroclimáticas y las concentraciones de mercurio en la columna de agua del punto de captación de la planta de tratamiento de agua potable PTAT Bosconia.

5.2.1. Relación precipitación-mercurio

Si bien los diagramas de dispersión iniciales, que exploraron el tiempo de rezago entre las precipitaciones y los niveles extremos de mercurio (Hg), no arrojaron resultados concluyentes, los coeficientes de correlación de Pearson para los datos diarios de precipitación y mercurio indicaron una relación fuerte entre estas variables. considerar el panorama completo del periodo de estudio (De Klerk et al., 2013), (Gratz et al., 2009), (Wang et al., 2019). Cabe mencionar que dichos resultados del coeficiente de Pearson se encuentran en los apéndices G,H,I,J

El análisis de los diagramas de dispersión, que examinaron las concentraciones máximas de mercurio en cada mes en relación con las precipitaciones en las tres estaciones climatológicas del IDEAM (Cachirí, Vetas-EL Pozo, Vivero Suratá), adjuntos en el apéndice D, no logró identificar patrones de relación inmediatos (Wang et al., 2019). No obstante, al considerar la totalidad de los datos y la consistencia de los coeficientes de Pearson a lo largo de los meses y las tres estaciones, se observa una asociación marcada que indica una influencia significativa de los regímenes de precipitación en los niveles de mercurio en el río Suratá, al contribuir a la movilización y presencia de mercurio en el sistema hídrico estudiado (Wang et al., 2019).

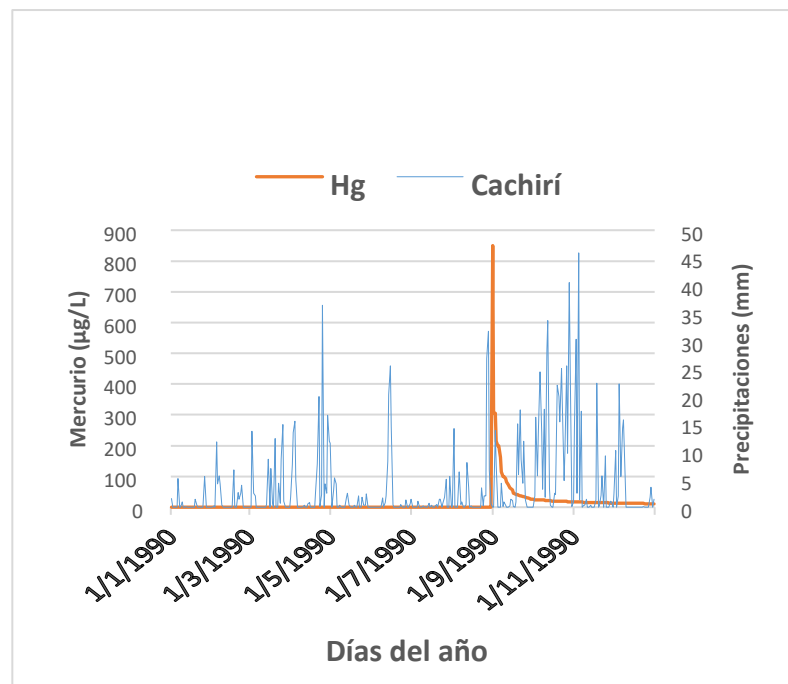
Se identificó una relación entre las concentraciones máximas de mercurio y las variaciones en las precipitaciones diarias totales, así como en los caudales promedios diarios del río. Los análisis permitieron evaluar la validez de la hipótesis principal de la investigación, según la cual el aumento en los caudales del río y en las precipitaciones dentro de la subcuenca del río Suratá

estaría correlacionado con un incremento en las concentraciones de mercurio (De Klerk et al., 2013), (Gratz et al., 2009). Estos resultados obtenidos muestran evidencia que respalda esta correlación, lo que sugiere que los eventos de mayor precipitación y los aumentos en el caudal podrían estar asociados con una mayor movilización de mercurio en el río.

Posteriormente se decidió crear una gráfica para mostrar el comportamiento de las precipitaciones totales, es decir, de todos los datos diarios de precipitaciones, para visualizar si existía algún patrón o relación adicional que no fue encontrado previamente. De igual manera se llevó a cabo para las otras dos estaciones durante la ventana de tiempo de estudio, pero no se descubrió alguna correlación complementaria entre las variables estudiadas. A continuación, se presenta la gráfica para la estación Cachirí.

Figura 10.

Registro diario de concentraciones de mercurio y precipitaciones: Estación Cachirí, Río Suratá Cachirí, Río



Nota: En la figura 10 se observan los niveles de mercurio en un año específico con las precipitaciones de ese mismo año.

Cabe señalar que el anterior proceso se realizó para todos los años de la ventana de estudio 32 años (1989-2021), en las 3 estaciones analizadas, Cachirí, Vetas- El Pozo y Vivero Suratá. Todas las gráficas correspondientes a estos análisis se encuentran disponibles en el Anexo D, donde se muestran los resultados completos para cada estación y año.

Adicionalmente se presentó como ejemplo el gráfico donde se observó el valor más alto de mercurio, que fue de 850 ($\mu\text{g/L}$) en 1990. Se seleccionó este ejemplo debido a que representa el valor máximo registrado en toda la serie temporal, lo cual es relevante para ilustrar el comportamiento extremo del mercurio en el área de estudio. Esta elección permite destacar un punto crítico dentro de la evaluación de la calidad del agua y contextualizar el rango de variabilidad de los datos analizados.

5.2.2. *Relación Caudal-Mercurio*

Tras analizar los datos de concentraciones máximas de mercurio y caudales de 1989 a 2021, se realizó una evaluación detallada del comportamiento histórico de ambas variables mes tras mes durante el periodo de estudio (De Klerk et al., 2013), (Wang et al., 2019). Adicionalmente, se aplicó el coeficiente de Pearson para identificar posibles correlaciones entre los niveles de mercurio y los caudales (De Klerk et al., 2013), (Wang et al., 2019). Si bien un análisis inicial no reveló patrones claros de correlación respaldados por diagramas de dispersión y coeficientes de Pearson (Anexo D) (cuyo procedimiento de cálculo se detalla en la sección 4.3), una tendencia fuerte se hizo evidente al enfocar el análisis en el comportamiento del caudal en ventanas de tiempo específicas alrededor de los picos mensuales de mercurio.

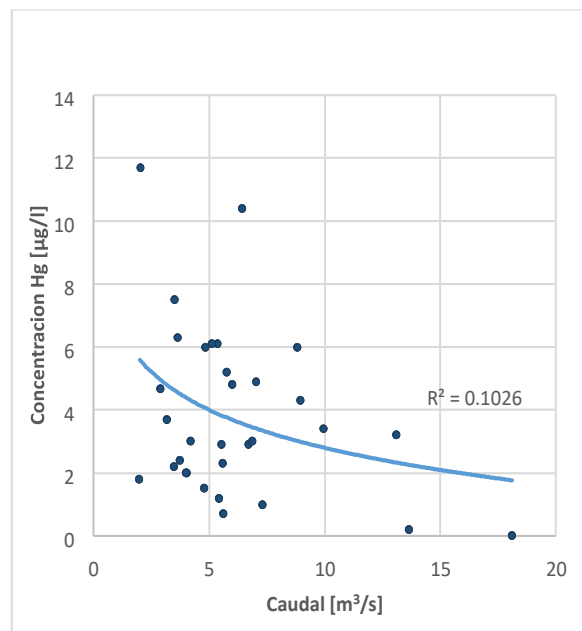
Específicamente, al examinar los datos de caudal comprendidos en un lapso de cinco días previos y cinco días posteriores a la ocurrencia de cada pico mensual de mercurio, se identificó

una relación notable que sugiere una influencia del caudal en los niveles de mercurio dentro de estas ventanas temporales. Esta tendencia, aunque no capturada en el análisis general de correlación, resalta la posible existencia de una dinámica más compleja entre estas variables en momentos críticos de elevación del mercurio.

Adicionalmente al coeficiente de Pearson, se calculó el coeficiente de determinación (R^2).

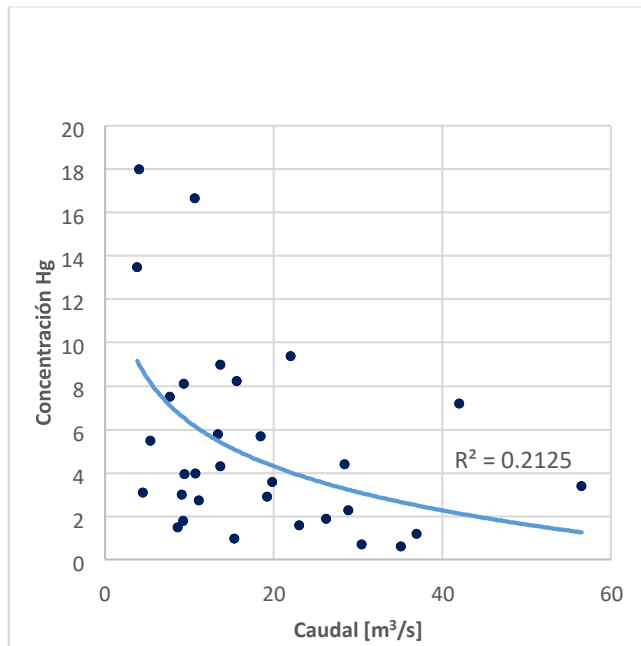
Es importante destacar que, si bien se calculó el coeficiente de determinación (R^2), el análisis principal de la relación entre las variables se fundamentó en la interpretación del coeficiente de correlación de Pearson. El R^2 se presentó como una medida complementaria para entender la proporción de la varianza explicada por un modelo lineal, esto se debe a que el coeficiente de Pearson proporciona información directa sobre la dirección (positiva o negativa) y la magnitud de la relación lineal, mientras que el R^2 se centra en la varianza explicada sin especificar la dirección de la correlación (Wang et al., 2019).

Figura 11.
Comportamiento histórico máximos enero



Nota: En la ilustración 11 se observa la serie histórica representativa de los caudales y las concentraciones máximas de mercurio para el mes de enero que corresponde al análisis de uno de los meses de la temporada seca.

Figura 12.
Comportamiento histórico máximos noviembre



Nota: En la ilustración 12 se observa la serie histórica de caudales y concentraciones máximas de mercurio correspondientes al mes de noviembre, que representa la temporada húmeda.

En este análisis se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.2125$, lo que indica, en principio, una baja correlación entre el caudal promedio mensual y las concentraciones máximas de mercurio durante los noviembrs del periodo 1989-2021 (Wang et al., 2019).

No obstante, al aplicar la prueba de correlación de Pearson para evaluar la relación entre los niveles de mercurio (Hg) y los caudales cuyos resultados se presentan en los apéndices G, H, I

y J se observa una asociación más fuerte entre ambas variables. Esto contrasta con lo que sugiere el valor de R^2 mostrado en la ilustración 12.

Los resultados de la prueba de Pearson indican de forma consistente que existe una correlación significativa, lo que permite concluir que las variaciones en el caudal influyen de manera importante en los niveles de mercurio detectados en el río Suratá. En relación con estudios previos, los hallazgos de esta investigación sobre la tendencia fuerte entre el caudal y los picos de mercurio, y la asociación marcada entre la precipitación diaria total y los niveles de mercurio, guardan similitudes con las elevadas concentraciones de mercurio encontradas en zonas de MAPE en Colombia (Gallo et al., 2021).

6. Discusión de resultados

A pesar de la ausencia de una correlación lineal directa entre las variables hidroclimáticas (precipitación y caudal) y las concentraciones de mercurio en la PTAP Bosconia (periodo 1989-2021), el coeficiente de Pearson (Anexo D) y los diagramas de dispersión se identificó una fuerte tendencia no lineal entre ellas, utilizando la metodología detallada en el inciso 4.3 (De Klerk et al., 2013; Gratz et al., 2009).

Esta tendencia implica que, si bien las fluctuaciones de las variables hidroclimáticas por sí solas no explican completamente los cambios en los niveles de mercurio, sí ejercen una influencia que se ve modulada por la complejidad inherente al sistema ambiental de la subcuenca del río Suratá (Sierra, 2023), (López, 2018). Los niveles de mercurio responden a una combinación de factores como la geología local, el uso del suelo y las actividades mineras, además la transformación y movilidad del mercurio dependen de variables como el pH, la actividad

microbiana y la materia orgánica, las cuales interactúan con, pero no dependen exclusivamente del clima (López, 2018), (Marques, 2021).

Adicionalmente el transporte y destino del mercurio en una cuenca están determinados por la interacción entre condiciones hidrológicas y características físicas y biológicas del ecosistema. En conjunto, estas fuentes evidencian que el comportamiento del mercurio resulta de una red compleja de interacciones donde el clima es un factor importante, pero no determinante por sí solo (Keane et al., 2023).

La dificultad para establecer una correlación lineal directa resalta la probable interacción multifactorial que controla la dinámica del mercurio en este entorno (Keane et al., 2023). Es meritorio que la respuesta de los niveles de mercurio a las variables esté condicionada por factores como la historia de la contaminación por mercurio en la cuenca, particularmente asociada a la actividad minera, estos aportes pasados, aún si ya no están activos, pueden seguir afectando los niveles actuales debido a su persistencia en sedimentos y ecosistemas acuáticos, como es el caso de este proyecto (Gallo et al., 2021), (Keane et al., 2023), (Redacción Vanguardia, 2022).

Además, la geología de la cuenca juega un papel fundamental en la línea de base de mercurio presente en el sistema (EPA, 2008). Esto ocurre ya que ciertas formaciones como rocas volcánicas, y rocas sedimentarias con alto contenido de materia orgánica, contienen minerales naturalmente ricos en mercurio. Estos procesos como la meteorización y la erosión pueden liberar mercurio al ambiente, afectando su transporte y transformación dentro de la cuenca. Esto permite distinguir entre aportes naturales y fuentes antropogénicas en los niveles observados.

La actividad biológica y geoquímica dentro del río y sus sedimentos, crucial para la metilación del mercurio, podría también responder de manera compleja a las fluctuaciones

hidrológicas, introduciendo una capa adicional de no linealidad en la relación observada (Nogara et al., 2019).

La limitación en la resolución temporal de los datos de caudal es un factor metodológico importante que podría haber ocultado correlaciones a corto plazo entre los eventos de lluvia y los picos de concentración de mercurio (De Klerk et al., 2013). La falta de una correlación lineal directa no implica una ausencia de influencia, sino más bien una interacción compleja.

7. Conclusiones

La revisión bibliográfica y el análisis de datos permitieron identificar la precipitación y el caudal como las variables hidroclimáticas más relevantes para estudiar la concentración de mercurio en la subcuenca del río Surató. Cabe resaltar que otras variables como temperatura y materia orgánica son importantes, pero fueron descartadas por la falta de datos con resolución temporal adecuada, en la ventana de tiempo de estudio de esta investigación (1989-2021). Entonces se priorizó el uso de variables de caudal y precipitación con respaldo científico y disponibilidad de información consistente (apéndice B,C).

El análisis de las series de precipitación y caudal en las estaciones del IDEAM estudiadas (Cachirí, Vivero Surató y Vetas-El Pozo) mostró un patrón bimodal típico de regiones con influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2014), (Banco de la República, 2023), así como una alta variabilidad anual asociada a fenómenos como El Niño y La Niña. Estas variaciones se reflejan directamente en el comportamiento del río Surató, evidenciado en los valores extremos de caudal registrados entre 1989 y 2021, con datos máximos entre 14.23 y 314.11 m³/s, promedios entre 5.28 y 29.62 m³/s, y mínimos entre 1.22 y 7.09 m³/s.

Respecto a las concentraciones de mercurio, se identificaron niveles elevados durante varios años, especialmente entre 1992 y 2004, con picos importantes en 2017 y 2021. Cabe señalar que en todos los casos se superó el límite admisible para consumo humano ($2 \mu\text{g/L}$) y, en varios años, incluso el umbral tratable por la PTAP bosconia ($15 \mu\text{g/L}$).

Finalmente, mediante el análisis de correlación de Pearson, se encontró una relación directa entre las variables hidroclimáticas estudiadas (precipitación y caudal) y las concentraciones pico de mercurio (Anexo D), específicamente, se observó que los aumentos en las precipitaciones y los incrementos en el nivel del caudal del río coincidieron con crecimientos relevantes en los niveles de mercurio en el agua.

Estos hallazgos coinciden con estudios previos que destacan el papel de los eventos extremos en la dinámica del mercurio en ecosistemas fluviales, lo cual respalda la hipótesis de que estas variables (precipitación y caudal) influyen significativamente en la movilización y las cantidades del metal en la subcuenca del río Suratá (Ansah et al., 2022), (Wang et al., 2019).

8. Recomendaciones

Para avanzar significativamente en la comprensión de la relación entre las variables hidroclimáticas y los niveles de mercurio en la subcuenca del río Suratá, se proponen las siguientes recomendaciones detalladas:

Implementación de un Monitoreo Hidrológico y de Mercurio de Alta Resolución Temporal y Espacial: Establecer estaciones de monitoreo continuo de caudal con registros horarios o incluso sub-horarios en puntos estratégicos de la subcuenca, incluyendo áreas cercanas a actividades mineras y la PTAP de bosconia. Implementar un programa de muestreo de agua para mercurio con una frecuencia similar (horaria o diaria durante eventos de lluvia) en los mismos puntos de

monitoreo de caudal. Esto permitirá capturar la dinámica de respuesta del mercurio a los eventos hidrológicos de manera más precisa. Considerar también el muestreo de sedimentos en diferentes épocas del año y durante eventos de crecida para evaluar la acumulación y resuspensión de mercurio (Wang et al., 2019).

Investigación Detallada de las Fuentes y Rutas de Mercurio: Realizar un inventario exhaustivo de las actividades mineras (formales e informales) en la subcuenca, incluyendo la caracterización de las técnicas de extracción y el uso de mercurio (Yoshimura et al., 2021) (Gallo et al., 2021) (Keane et al., 2023). Llevar a cabo estudios geoquímicos detallados del suelo y las rocas en la cuenca para identificar las fuentes naturales de mercurio y evaluar su potencial de lixiviación bajo diferentes condiciones hidrológicas (Sierra, 2023). Utilizar técnicas de trazadores isotópicos para identificar las fuentes de mercurio encontradas en el agua y los sedimentos.

Desarrollar modelos hidrológicos detallados de la subcuenca que permitan simular el flujo de agua bajo diferentes escenarios de precipitación y uso del suelo (EPA, 2008). Integrar estos modelos hidrológicos con modelos biogeoquímicos del ciclo del mercurio, incorporando procesos como la adsorción, desorción, metilación y volatilización (Nogara et al., 2019). Utilizar estos modelos para simular la respuesta de los niveles de mercurio a diferentes patrones de lluvia y caudal, considerando las fuentes y los procesos de transformación del mercurio en la cuenca (Wang et al., 2019).

Análisis Estadístico Avanzado y Aprendizaje Automático: Aplicar técnicas de análisis de series de tiempo y análisis más avanzados para identificar patrones y relaciones no lineales entre las variables hidroclimáticas y los niveles de mercurio con los datos de alta resolución que se obtengan (Temme, et al., 2004). Explorar el uso de algoritmos de aprendizaje automático para

poder predecir los picos de concentración de mercurio, considerando múltiples variables ambientales y de actividad humana.

9. Referencias Bibliográficas

- Ansah, E., Bak, J. L., Sørensen, P., & Darko, G. (2022). Modelling mercury concentration in Ghanaian soil. *Chemosphere*, 307, 135553. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135553>
- Banco de la República. (2023). Caracterización del fenómeno de El Niño en Colombia (Informe de Política Monetaria, octubre 2023). Bogotá, Colombia.
- De Klerk, L. P., De Klerk, A. R., & Wepener, V. (2013). An assessment of mercury contamination and the relationship between environmental variables and mercury concentrations in a seasonal wetland. *Water, Air, and Soil Pollution*, 224(5). <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1547-8>
- Gallo Corredor, J. A., Pérez, E. H., Figueroa, R., & Figueroa Casas, A. (2021). Water quality of streams associated with artisanal gold mining: Suárez, Department of Cauca, Colombia. *Heliyon*, 7(6), e07047. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07047>
- Gratz, L. E., Keeler, G. J., & Miller, E. K. (2009). Long-term relationships between mercury wet deposition and meteorology. *Atmospheric Environment*, 43(39), 6205–6212. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.040>
- Habashi, F. (2013). *Encyclopedia of Metalloproteins* (Vol. 4). New York: Springer.
- IDEAM. (2020.). Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos (DHIME). <https://dhime.ideam.gov.co>

- Keane, S., Bernaudat L., & Davis K. (2023). Mercury and artisanal and small-scale gold mining: Review of global use estimates and considerations for promoting mercury-free alternatives. *Ambio*, 52(5). <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01843-2>
- López, M. R. (2018). El mercurio: sus fuentes de emisión, usos e impactos (27ª ed., Vol. 1). Madrid: Editorial CSIC.
- Marqués, A. L. (2021). Modelización de la incidencia de la minería abandonada de mercurio en la cuenca del río Nalón: correlación de eventos y análisis de riesgos (Vol. 1). Universidad de Oviedo.
- Ministerio de Agricultura. (1984). Decreto No. 1594 de 1984. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2014). Oferta del agua. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, & Ministerio de Protección Social. (2007). Resolución No. 2115 de 2007. Bogotá, Colombia.
- Nogara, P. A., Farina, M., Aschner, M., & Rocha, J. B. T. (2019). Mercury in our food. *Chemical Research in Toxicology*, 32(8). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.9b00126>
- Pan, J., Ming C., Zhe Z., & Jing Z. (2023). Risk assessments of plant leaf and soil mercury pollution in different functional areas of Changchun City. *Forests*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/f14061108>
- Redacción Vanguardia. (2022, octubre 10). Impacto ambiental en el río Suratá generado por la minería ilegal no da más espera: Minesa. Vanguardia. Bucaramanga.

- Sankhla, M. S., Kumari, M., Nandan, M., Kumar, R., & Agrawal, P. (2016). Heavy metals contamination in water and their hazardous effect on human health: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 5(10). <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2016.510.082>
- Sierra, J. (2023). Diagnóstico geoquímico ambiental de la cuenca del río Suratá. *Servicio Geológico Colombiano*, 1(1), 1–43.
- Singer, M. B., Harrison, L. R., Donovan, P. M., Blum, J. D., & Marvin-DiPasquale, M. (2016). Hydrologic indicators of hot spots and hot moments of mercury methylation potential along river corridors. *Science of the Total Environment*, 568, 697–708. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.005>
- Temme, C., Ebinghaus, R., Einax, J. W., Steffen, A., & Schroeder, W. H. (2004). Time series analysis of long-term data sets of atmospheric mercury concentrations. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 380(3), 380–389. <https://doi.org/10.1007/s00216-004-2715-x>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2008). Mercury transport and fate through a watershed (Vol. 1). Washington, D.C.: Office of Research and Development, National Center for Environmental Research.
- Wang, X., Xinbin J., Runsheng Y., & Zhiyun L. (2019). Effects of precipitation on mercury accumulation on subtropical montane forest floor: Implications on climate forcing. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(4). <https://doi.org/10.1029/2018JG004809>
- Yoshimura, A., Suemasu, K., & Veiga, M. M. (2021). Estimation of mercury losses and gold production by artisanal and small-scale gold mining (ASGM). *Journal of Sustainable Metallurgy*, 7(3). <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00394-8>

Zhou, Q., Yang N., Youzhi L., & Xiaohui D. (2020). Total concentrations and sources of heavy metal pollution in global river and lake water bodies from 1972 to 2017. *Global Ecology and Conservation*, 22, e00925. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00925>

10. Apéndices

“Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS”