

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<https://dx.doi.org/10.14482/inde.43.02.612.084>

Calidad fisicoquímica y microbiológica de la quebrada Pavayaco: Resguardo Indígena Inga de Condagua, Mocoa, Putumayo (Colombia)

Physicochemical and microbiological quality of the Pavayaco Stream: Inga Indigenous Resguardo of Condagua, Mocoa, Putumayo (Colombia)

LADY XIOMARA SÁNCHEZ *

JACSON ALEXIS PÉREZ **

LORENA AGUDELO OBANDO ***

* Semillero de Investigación Hinchas del Medio Ambiente, Instituto Tecnológico del Putumayo (ITP), Putumayo (Colombia). Ingeniería Ambiental.
Orcid-ID: <https://orcid.org/0000-0003-0641-4231>. lady.sanchez2021@itp.edu.co

** Semillero de Investigación Hinchas del Medio Ambiente, Instituto Tecnológico del Putumayo (ITP), Putumayo (Colombia). Ingeniería Ambiental.
Orcid-ID: <https://orcid.org/0000-0002-5509-7845>. jacsonperez2021@itp.edu.co

*** Profesora-investigadora. Grupo de Investigación en Recursos Naturales Amazónicos (GRAM). Directora semillero Hinchas del Medio Ambiente, Centro de Investigación y Extensión Científica y Tecnológica, Instituto Tecnológico del Putumayo (ITP), Putumayo (Colombia). Ingeniería Ambiental.
Orcid-ID: <https://orcid.org/0000-0003-1627-3401>.
lorena.agudelo@itp.edu.co

Correspondencia: Lorena Agudelo Obando. Calle 8 n.º 2-50, barrio San Agustín. Mocoa, Putumayo (Colombia). Celular: +57 314 320 60 12.



Resumen

El objetivo de esta investigación fue analizar la calidad de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la quebrada Pavayaco, localizada en la vereda Condagua, Mocoa, Putumayo (Colombia). Para tal fin, y con el acompañamiento de la comunidad, se hizo un recorrido por su cauce y se dividió en tres zonas (alta, media y baja), identificando y georreferenciando los puntos de vertimiento. La caracterización del cuerpo de agua comprendió parámetros fisicoquímicos (nivel de oxígeno en el agua, alcalinidad, demanda bioquímica y química de oxígeno, dureza, fósforo, sólidos disueltos y suspendidos y turbiedad), lo mismo que microbiológicos (coliformes totales y *Escherichia coli*). Se utilizaron cuatro índices de contaminación: ICOMI (mineralización), ICOMO (materia orgánica), ICOSUS (sólidos suspendidos) e ICOTRO (contaminación trófica). Los resultados del análisis evidenciaron una alta presencia de materia orgánica y coliformes totales en la zona alta, con un ICOMO de 0.701, que representa un riesgo sanitario significativo. Sin embargo, a medida que desciende la quebrada aumenta su caudal y sufre un proceso autodepurador. Por último, se proponen como alternativas eficientes la conexión con el sistema de alcantarillado, la educación ambiental y la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, para preservar la integridad ecológica de la quebrada y la salud de la comunidad.

Palabras clave: aguas residuales domésticas, caudal, contaminación del agua, saneamiento básico, vertimientos.

Abstract

The objective of this research was to analyze the quality of the physicochemical and microbiological parameters of the Pavayaco stream, located in the Condagua district, Mocoa, Putumayo (Colombia). To this end, and with the community's support, a tour of its course was conducted and divided into three zones (upper, middle, and lower), identifying and georeferencing the discharge points. The characterization of the water body included physicochemical parameters (oxygen level in the water, alkalinity, biochemical and chemical oxygen demand, hardness, phosphorus, dissolved and suspended solids, and turbidity), as well as microbiological parameters (total coliforms and *Escherichia coli*). Four pollution indices were used: ICOMI (mineralization), ICOMO (organic matter), ICOSUS (suspended solids), and ICOTRO (trophic pollution). The analysis results showed a high presence of organic matter and total coliforms in the upper zone, with an ICOMO of 0.701, which represents a significant health risk. However, as the stream descends, its flow increases and it undergoes a self-purification process. Finally, efficient alternatives are proposed such as connecting to the sewage system, environmental education, and the implementation of wastewater treatment systems, to preserve the ecological integrity of the stream and the health of the community.

Keywords: basic sanitation, domestic wastewater, dumping, flow, water pollution.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental e indispensable para la vida, cuya disponibilidad ha influido históricamente en la selección de lugares para los asentamientos humanos [1]. Sin embargo, este recurso ha sufrido impactos negativos como consecuencia del desarrollo industrial, el aumento de la población y la falta de saneamiento básico, contribuyendo al deterioro ambiental y la afectación de la salud de las comunidades ribereñas [2]. Lo anterior ha ocasionado numerosas problemáticas ambientales, entre las cuales se resalta el deterioro de las fuentes hídricas.

A nivel global, se estima que 2400 millones de personas no tienen acceso a servicios esenciales de saneamiento, lo que refleja que más del 80 % de las aguas residuales se descargan en ríos o mares sin ningún tipo de tratamiento previo [3]. En América Latina y el Caribe, únicamente entre el 30 y el 40 % del agua residual recolectada recibe tratamiento adecuado [4], con el agravante de que hay poblaciones donde no existen estudios de agua actualizados ni sistemas efectivos para tratar las aguas residuales, lo cual dificulta disminuir los impactos en la salud humana y el equilibrio ambiental.

Aunque Colombia es uno de los países con mayores recursos acuáticos [5], enfrenta desafíos significativos debido al crecimiento poblacional, la limitación de recursos económicos, la infraestructura insuficiente y la ineficacia de las políticas de gestión del agua por parte del Estado [6]. Esta situación no solo afecta el ecosistema de manera adversa, sino que también impacta en la sanidad pública y el bienestar de los habitantes, al comprometer la disponibilidad de agua de calidad [7].

Pese a su riqueza natural, las fuentes hídricas de la Amazonía colombiana afrontan perturbaciones antropogénicas tales como vertidos de aguas residuales sin tratar, la disposición inadecuada de residuos sólidos y las prácticas agrícolas y extractivas que alteran las características del agua. Estas actividades disminuyen la capacidad que tienen los cuerpos de agua para autodepurarse y provocan un deterioro en su calidad [8].

Los estudios realizados en los cuerpos de agua de los ríos Leticia, Puerto Nariño y Amazonas revelan que, en los puntos estudiados, el índice de calidad de agua (ICA) evidencia un resultado regular del 56,67 % y un valor de calidad deficiente en el 43,33 %. Estos resultados demuestran que estos cuerpos de agua requieren medidas inmediatas para implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas y asegurar el uso adecuado y la gestión correcta del agua [9].

El agua es esencial para conseguir las metas de desarrollo sostenible, lo cual implica que los Estados deben asegurar su accesibilidad, conservación y un saneamiento adecuado para las generaciones actuales como para las futuras [10]. En las comunidades

indígenas, la administración del agua debe ocuparse de forma global, considerando los factores económicos, ambientales y sociales de los territorios [11]. Sin embargo, casi todos los resguardos indígenas en Colombia carecen de las condiciones mínimas para cubrir sus necesidades de agua y saneamiento, por lo cual son vulnerables ante los riesgos sanitarios y ambientales [12].

Ninguno de los 13 municipios del departamento del Putumayo dispone de un sistema de tratamiento de aguas residuales, lo cual resalta la urgencia de evaluar el grado de contaminación de las fuentes hídricas locales. En consecuencia, se ha considerado necesario evaluar el grado de contaminación de la quebrada Pavayaco, por su importancia para la comunidad. En la actualidad, los indicadores de calidad y contaminación constituyen una alternativa adecuada para evaluar las variables fisicoquímicas y microbiológicas, puesto que integran diversas variables en un valor que es fácil de interpretar para los especialistas y para la población, lo cual facilita evaluar varias opciones para implementar en la fuente hídrica [13]. Por lo tanto, y como una de las formas para mitigar el daño que las comunidades están haciendo al medio ambiente, cada vez se realiza más investigaciones en las cuales participan las poblaciones, con el propósito de lograr capacidad instalada y generar sensibilidad ambiental.

El objeto de esta investigación es la quebrada Pavayaco, ubicada en la región del piedemonte de la Amazonía, en el departamento de Putumayo y perteneciente a las cuencas de los ríos Caquetá y Amazonas, zona geográfica donde se encuentra ubicado el resguardo indígena Inga en una extensión de 227 005,25 m² de tierras baldías [14].

La quebrada Pavayaco hace parte de la problemática de los recursos hídricos del departamento, puesto que en el transcurso del tiempo ha sufrido perturbaciones antrópicas que ocasiona la comunidad de Condagua, en específico, por la descarga de aguas residuales domésticas. En consecuencia, este artículo busca presentar información acerca del análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos realizados para evaluar los índices de contaminación (ICO) de la quebrada.

METODOLOGÍA

El estudio se realizó con una metodología de diseño y enfoque descriptivo, en Mocoa, municipio situado en el piedemonte de la Amazonía del suroeste de Colombia, Putumayo (1° 08' 57" N, 76° 38' 47" O) [15]. La fuente hídrica objeto de estudio, la quebrada Pavayaco, se encuentra en la vereda Condagua, habitada de forma mayoritaria por 34 familias de la comunidad indígena inga que hacen parte de las reservas de su etnia, compuesta por los cabildos de Yunguillo, Osocochoa, Tandarillo y San Joaquín [16].

Para recolectar las muestras, la quebrada se dividió en tres zonas: alta (en su nacimiento), media (mayor presencia de vertimientos) y baja (desembocadura en el río Caquetá). La zona alta evidenció un flujo bajo, escasa vegetación y gran cantidad de material rocoso. Por su parte, en la zona media se observó un aumento significativo del caudal, abundante vegetación y menor presencia de material rocoso. Y en la zona baja se identificó un suelo de tipo arenoso-arcilloso, con vegetación moderada, sin material rocoso.

Se confirmaron 17 puntos de vertimientos (tabla 1), los cuales se clasifican de acuerdo con su flujo de descarga y tipo. La medición del caudal en estos puntos se realizó utilizando el método de aforo volumétrico y el caudal se calculó empleando la ecuación (1).

$$Q = V/T \quad (1)$$

Donde Q representa el caudal en litros por segundo, V es el volumen del recipiente utilizado y T es el tiempo promedio en segundos. Los puntos de vertimiento, que no presentan valores de caudal, corresponden a mediciones en las que no se observó flujo de descarga al momento de tomar los datos.

TABLA 1. PUNTOS DE VERTIMIENTO EN LA QUEBRADA PAVAYACO

| Número de monitoreo | Coordenadas | | Tipo de flujo de descarga | | Descripción (tipo) | Caudal (l/s) |
|---------------------|-----------------|------------------|---------------------------|--------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| | Latitud | Longitud | Continuo | Intermitente | | |
| 1 | N 01° 17' 27.9" | W 076° 35' 12.2" | | X | Aguas residuales domésticas- negras | 0.06 |
| 2 | N 01° 17' 20.3" | W 076° 35' 13.4" | | X | Aguas residuales domésticas | 0.019 |
| 3 | N 01° 17' 09.1" | W 076° 35' 09.1" | | X | Aguas residuales domésticas- negras | (No se observó flujo de descarga) |
| 4 | N 01° 17' 05.4" | W 076° 35' 17.3" | | X | Aguas residuales domésticas- negras | (No se observó flujo de descarga) |
| 5 | N 01° 16' 44.8" | W 076° 35' 11.1" | | X | Aguas residuales domésticas- negras | 0.031 |
| 6 | N 01° 16' 47.7" | W 076° 35' 11.1" | | X | Aguas residuales domésticas- negras | 0.02 |
| 7 | N 01° 16' 49.4" | W 076° 35' 10.4" | | X | Aguas residuales domésticas- negras | 0.037 |
| 8 | N 01° 16' 51.3" | W 076° 35' 10.7" | | X | Aguas residuales domésticas | 0.05 |

Continúa...

| | | | | | | |
|----|------------------|-------------------|--|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 9 | N 01° 16' 47.9'' | W 076° 35' 11.9'' | | X | Aguas residuales domésticas- negras | (No se observó flujo de descarga) |
| 10 | N 01° 16' 43.2'' | W 076° 35' 13.5'' | | X | Aguas residuales domésticas- negras | 0.09 |
| 11 | N 01° 16' 22.8'' | W 076° 35' 20.9'' | | X | Aguas residuales domésticas- negras | 0.03 |
| 12 | N 01° 16' 44.3'' | W 076° 35' 13.5'' | | X | Aguas residuales domésticas- negras | (No se observó flujo de descarga) |
| 13 | N 01° 16' 45.7'' | W 076° 35' 06.2'' | | X | Aguas residuales domésticas- negras | 0.04 |
| 14 | N 01° 16' 43.4'' | W 076° 35' 03.2'' | | X | Aguas residuales domésticas- negras | 0.05 |
| 15 | N 01° 16' 43.5'' | W 076° 35' 03.3'' | | X | Aguas residuales domésticas- negras | 0.008 |
| 16 | N 01° 16' 25.2'' | W 076° 35' 16.4'' | | X | Aguas residuales domésticas- negras | 0.035 |
| 17 | N 01° 16' 24.8'' | W 076° 35' 16.5'' | | X | Aguas residuales domésticas- negras | 0.04 |

Fuente: elaboración propia.

Aforo de la quebrada Pavayaco

Los resultados en la evaluación del caudal se muestran en la tabla 2. Se utilizó el método del flotador, que evidenció una fuente hídrica con flujo moderado y escasa vegetación, cuyo nacimiento presenta un pequeño caudal que aumenta al descender, lo cual favorece el proceso de autodepuración de la quebrada. El caudal (Q) se calculó empleando la ecuación (2):

$$Q = V/A \quad (2)$$

Donde V es la velocidad superficial promediada en metros por segundo (m/s) y A es el área transversal promediada en metros cuadrados (m²); se obtuvo:

TABLA 2. CAUDAL (Q) DE LA QUEBRADA PAVAYACO

| Zona | Área (A) | Velocidad (V) | Q = A*V |
|-------|----------------------|---------------|-------------------------|
| Alta | 0.449 m ² | 0.083 m/s | 0.037 m ³ /s |
| Media | 0.602 m ² | 0.108 m/s | 0,065 m ³ /s |
| Baja | 2.119 m ² | 0.139 m/s | 0.295 m ³ /s |

Fuente: elaboración propia.

Análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

Se llevó a cabo la medición *in situ* de parámetros fisicoquímicos como oxígeno disuelto, temperatura, conductividad y pH. Por otra parte, parámetros como el porcentaje de saturación de oxígeno, alcalinidad total, DBO, DQO, dureza total, fósforo total, sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales y turbidez se evaluaron de manera puntual y *ex situ*. Para tal fin, se utilizó la metodología propuesta por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la cual describe los procedimientos para los análisis correspondientes a cada parámetro evaluado [17]. A continuación, se incluyen los procedimientos empleados.

El porcentaje (%) de saturación de oxígeno se determinó considerando el valor máximo de oxígeno disuelto posible, basado en las variables de temperatura de cada sitio de muestreo y la presión atmosférica. El cálculo del porcentaje de saturación se consiguió dividiendo la concentración registrada por la concentración de saturación y luego multiplicando este valor por 100 [17]. La alcalinidad total se obtuvo mediante la titulación volumétrica, añadiendo un indicador mixto a la muestra, y se tituló con ácido sulfúrico estándar de 0,10 N y 0,02 N. Para asegurar la precisión, al ácido sulfúrico se le hizo una estandarización previa con titulación potenciométrica. Se tomaron 4 mL de una solución de Na_2CO_3 a 0,05 N, y se diluyó hasta un volumen total cercano a 50 mL, y se tituló hasta alcanzar un pH de 5,0. Respecto a la demanda química de oxígeno (DQO), la muestra fue preservada en campo, incorporando 2 mL de ácido sulfúrico por litro de muestra; se conservó refrigerada hasta el análisis que se hizo mediante un reflujo cerrado con dicromato de potasio en medio ácido y se calentó la muestra, midiendo el oxígeno consumido con el análisis colorimétrico.

Para establecer la dureza total, a la muestra preservada se le añadió HNO_3 o H_2SO_4 hasta alcanzar un $\text{pH} < 2$. La medición de la dureza se hizo utilizando EDTA, que forma un complejo con iones de calcio y magnesio. Después se añadió el indicador negro de Eriochrome T a la muestra ajustada a un pH de 10 ± 0.1 , lo cual generó un color rojo vino en presencia de los iones. La cuantificación del fósforo total se logró mediante el método del ácido ascórbico. En este procedimiento, los ortofosfatos reaccionaron en un medio ácido con molibdato de amonio y tartrato de antimonio y potasio, lo cual generó ácido fosfomolibdico, que, a su vez, resultó en la formación complejo de molibdeno de color azul intenso. La cantidad de fósforo total se expresó en miligramos de fósforo total por litro (mg P/L).

Los sólidos disueltos totales (SDT) se calcularon de forma gravimétrica; la muestra fue filtrada con una fibra de vidrio y después evaporada a 180°C hasta alcanzar un peso estable. Por otra parte, los sólidos suspendidos totales (SST) se obtuvieron filtrando la muestra a través de un filtro de fibra de vidrio con porosidad inferior a 15

micrómetros. El filtro se secó entre 103 y 105 °C hasta alcanzar un peso constante, y la concentración se expresó en mg/L.

Por último, la turbiedad se evaluó con un turbidímetro que mide la dispersión de la luz a un ángulo de 90° con respecto al haz inicial, expresada en unidades nefelométricas (NTU), en un rango de 2.0 a 1000 NTU.

Las muestras microbiológicas (coliformes totales y *Escherichia coli*) se inocularon en un medio de cultivo; la caja de cultivo se colocó en posición invertida a 36°C durante 24 horas. Tras la incubación, se examinó el medio para detectar la presencia de *E. coli*, se evaluó la fluorescencia y el cambio de color para confirmar su presencia. Los métodos utilizados y los resultados en las zonas de muestro se incluyen en la tabla 3.

TABLA 3. MÉTODOS DE MUESTREO Y VALORES DE LOS PARÁMETROS POR ZONA

| Parámetro | Método | Unidad | Zona alta | Zona media | Zona baja |
|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-----------|-------------|-------------|
| % Saturación de oxígeno | Electrométrico | % | 51.5 | 89.4 | 100.2 |
| Alcalinidad total | SM 2320 B | mg CaCO ₃ /L | 13.17 | 8.36 | 23.83 |
| Conductividad (<i>in situ</i>) | SM 2510 B | μS/cm | 23.64 | 15.17 | 42.54 |
| Demanda bioquímica de oxígeno | SM 5210B Y ASTM D888 MÉTODO C | mg O ₂ /L | < 10.0 | < 10.0 | < 10.0 |
| Demanda química de oxígeno | SM 5220 D | mg O ₂ /L | 41.3 | 45.8 | < 10.0 |
| Dureza total | SM 2340 | mg CaCO ₃ /L | 14.70 | 12.74 | 24.50 |
| Fósforo total | SM 4500 -P B,D | mg P/L | < 0.50 | < 0.50 | < 0.50 |
| NMP Coliformes totales | SM 9223B | NMP/ 100 ml | 240 x 100 | >2400 x 100 | >2400 x 100 |
| NMP <i>Escherichia coli</i> | SM 9223 B | NMP/ 100 ml | 41 x 100 | 33 x 100 | 240 x 100 |
| Oxígeno disuelto | ASTM D888 MÉTODO C | mg O ₂ / L | 3.90 | 6.87 | 7.52 |
| pH (<i>in situ</i>) | SM 4500-H+B | Unidades de pH | 6.35 | 6.57 | 7.24 |
| Sólidos disueltos totales | NMX-AA-034-SCFI | mg/L | 20 | 27.0 | 33.0 |
| Sólidos suspendidos totales | SM 2540 D | mg/L | < 15.0 | < 15.0 | < 15.0 |
| Temperatura | SM 2550 B | °C | 24.5 | 24.6 | 25.2 |
| Temperatura ambiente | SM 2550 B | °C | 28.2 | 28.7 | 28.9 |
| Turbiedad | SM 2130B | NTU | 4.68 | 9.18 | 6.01 |

Fuente: elaboración propia.

A continuación, y considerando los resultados de los parámetros evaluados, se determinaron los ICOS. Para hacer este cálculo se aplicaron los siguientes índices con base en [18]:

Índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO): se seleccionaron demanda bioquímica de oxígeno (DBO), coliformes totales y porcentaje de saturación de oxígeno.

$$ICOMO = \frac{1}{3} (I_{DBO} + I_{Coliformes} + I_{Oxígeno\%}) \quad (2)$$

Índice de contaminación por mineralización (ICOMI): agrupa la medición de la conductividad, reflejando la cantidad de sólidos disueltos en el agua, la dureza determinada por la concentración de cationes de calcio y magnesio, y la alcalinidad, que se expresa en los niveles de aniones de carbono y bicarbonato.

$$ICOMI = \frac{1}{3} (I_{Conductividad} + I_{Dureza} + I_{Alcalinidad}) \quad (3)$$

Índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS): este indicador se fundamenta en la cantidad de partículas sólidas, tanto orgánicas como inorgánicas, que se encuentran en suspensión dentro de una solución.

$$ICOSUS = -0.02 + 0.0003 \text{ Sólidos suspendidos } \left(\frac{mg}{l}\right) \quad (4)$$

Índice de Contaminación Trófico (ICOTRO): se establece a partir de la concentración de fósforo total, expresada en miligramos por litro (mg/L). Los rangos de clasificación son: oligotrófico (< 0.01 mg/L), mesotrófico (0.01 - 0.02 mg/L), eutrófico (0.02 - 1.00 mg/L) e hipertrófico (> 1.00 mg/L). La tabla 4 presenta el índice de contaminación según los rangos establecidos y la 5 los resultados para cada zona muestreada.

TABLA 4. GRADO DE CONTAMINACIÓN SEGÚN EL VALOR QUE SE OBTENGA DE LOS ICOS

| ICO | Contaminación | Escala de color |
|------------|---------------|-----------------|
| 0 - 0.2 | Ninguna | Azul |
| >0.2 - 0.4 | Baja | Verde |
| >0.4- 0.6 | Media | Amarillo |
| >0.6 - 0.8 | Alta | Naranja |
| >0.8 - 1 | Muy alta | Rojo |

Fuente: elaboración propia sobre adaptación de [18], 2024

TABLA 5. ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN DE LA QUEBRADA PARA CADA ZONA

| Zona | ICOMO | ICOSUS | ICOTRO | ICOMI |
|-------|-------|--------|-------------|-------|
| Alta | 0,701 | 0 | Mesotrófico | 0,013 |
| Media | 0,585 | 0 | Mesotrófico | 0,007 |
| Baja | 0,028 | 0 | Mesotrófico | 0,333 |

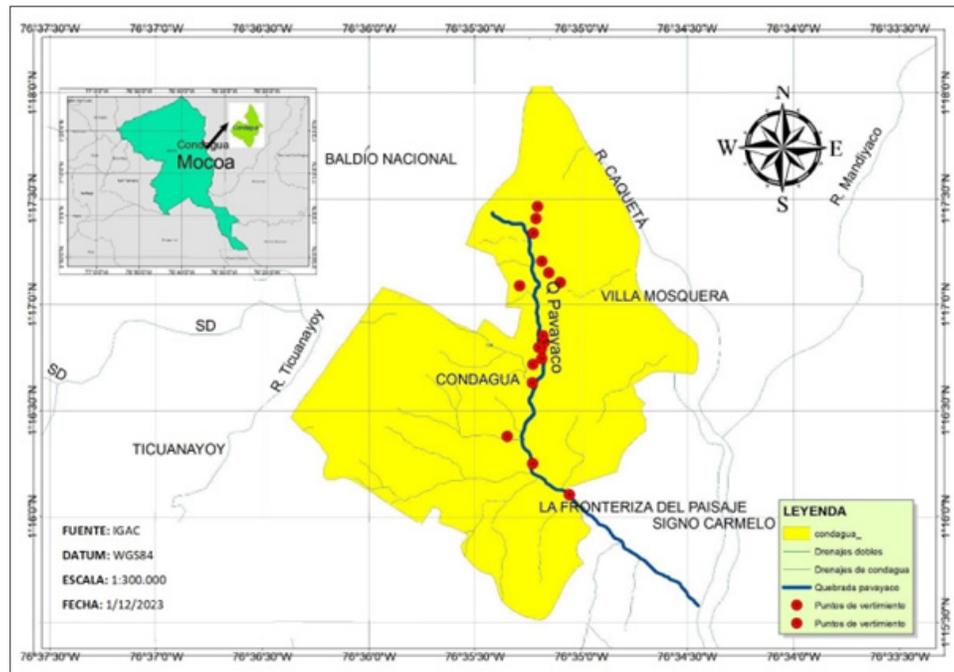
Fuente: elaboración propia.

Análisis estadístico

Para organizar y analizar los datos recolectados en los tres puntos de muestreo, se aplicó la estadística descriptiva, de acuerdo con las concentraciones de los parámetros establecidos, lo cual permitió determinar el estado de contaminación de la quebrada y, al final, se compararon los resultados con lo establecido en la Resolución 0631 de 2015, que define los parámetros y límites para el vertimiento de aguas residuales en cuerpos de agua en Colombia. Para el análisis de los datos de campo se tuvo en cuenta variables tales como las condiciones geográficas de la quebrada, el clima tropical característico de la zona y una temperatura ambiente de 28 °C.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

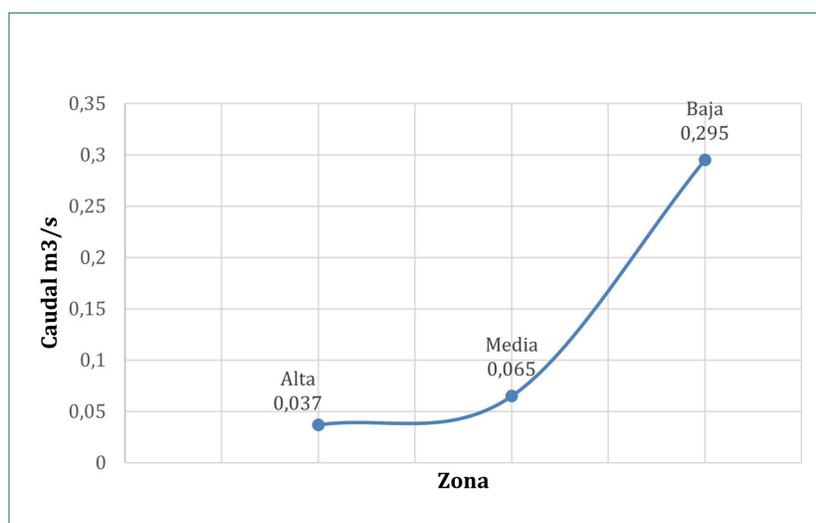
La determinación de los vertimientos se hizo de acuerdo con la metodología adoptada y los resultados del análisis del caudal de la quebrada, todo lo cual permitió establecer los parámetros físicos, químicos y microbiológicos para establecer el índice de contaminación de la quebrada Pavayaco. Al respecto, se caracterizaron 17 puntos de vertimiento distribuidos a lo largo de su cauce, procedentes de aguas domésticas de la población asentada en la vereda Condagua, cuya distribución se presenta en la figura 1.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE VERTIMIENTO EN LA QUEBRADA PAVAYACO EN SU TRAYECTO POR LA VEREDA CONDAGUA

El caudal evaluado presentó diferencias en las tres zonas de muestreo así: zona alta $0.037 \text{ m}^3/\text{s}$, la zona media $0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ y la zona baja $0.295 \text{ m}^3/\text{s}$ (figura 2). La quebrada nace en la montaña y aumenta su caudal a medida que recorre la pendiente, evidenciando que las fuentes hídricas del Putumayo están sometidas a precipitaciones que contribuyen con los procesos depurativos [18]. Debido al esfuerzo por conservar la flora y los cuerpos de agua, los resguardos indígenas preservan sus caudales y las condiciones fisicoquímicas del agua, en especial en las zonas altas, donde se originan las fuentes hídricas.



Fuente: elaboración propia

FIGURA 2. AFORO DE LA QUEBRADA PAVAYACO

Los parámetros fisicoquímicos analizados en cada zona en estudio se detallan en las figuras 3 y 4, para evidenciar su variación en los tres puntos muestreados. En el caso de la turbidez, la mayor alteración se registró en la zona media, asociada a los vertimientos en la quebrada, mientras que la reducción en la parte baja se explica por el aumento del caudal y la corriente del agua. La temperatura de la quebrada es constante con ligeras variaciones, a medida que desciende desde su nacimiento. El porcentaje de saturación de oxígeno evidencia un valor desfavorable del 51,5 % en la zona alta, donde se confirmó inexistencia de organismos. Para las zonas media y baja, el porcentaje de saturación de oxígeno es adecuado.

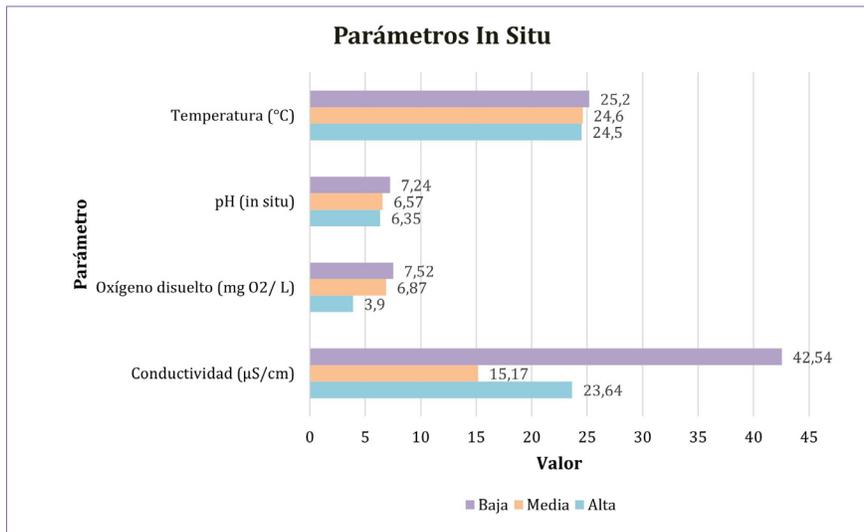
La fuente hídrica de Pavayaco muestra un pH en el rango de 6,35 a 7,27 unidades. En aguas naturales, el pH varía, por lo general, de 4 a 9 unidades. La presencia de bicarbonatos y carbonatos de metales alcalinos y alcalinotérreos puede elevar el pH por encima de 9 unidades. Según los resultados y los valores permitidos en la normatividad [19], el potencial de hidrogeniones en la quebrada Pavayaco cumple con los límites, al mostrar un carácter ligeramente ácido a neutro, tendiendo a la neutralidad en las zonas media y baja. En un estudio del río Ocoa se encontraron valores de pH similares de 6,6 a 7,5 [20]. Estas variaciones de pH reflejan condiciones ambientales favorables para la diversidad, siempre y cuando no haya cambios significativos debidos a los aportes de aguas contaminadas.

En cuanto a la conductividad, el monitoreo mostró un aumento hasta 42,54 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en su punto más bajo, correlacionado con el incremento en los iones, que contribuyen con la alcalinidad y la dureza total. La mayor conductividad registrada en áreas

afectadas se relaciona con un incremento en el aporte de materia orgánica, nutrientes y una elevada concentración de iones como consecuencia de actividades humanas [21]. Además, la falta de vegetación ribereña ha permitido aumentar la entrada de sedimentos, contribuyendo a valores altos de conductividad en lugares donde se disponen aguas residuales [22]. Por otra parte, en un estudio que se llevó a cabo en Villavicencio (Colombia) se observó que los valores de conductividad superaron ligeramente los rangos normales, lo cual restringe ciertos usos y, desde una perspectiva limnológica, genera condiciones adversas para el desarrollo del hábitat acuático [20]. Estas variaciones están asociadas principalmente con la presencia de vertimientos.

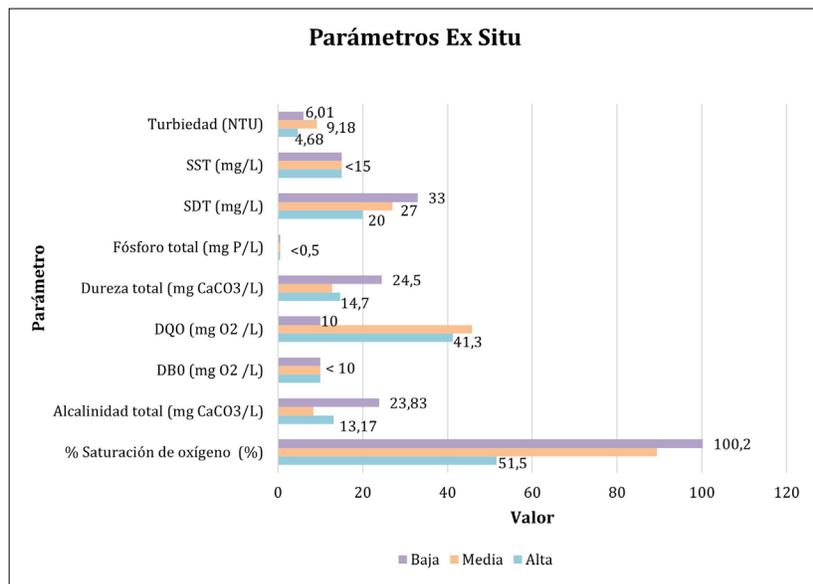
El nivel de oxígeno disuelto varía en la quebrada, siendo más bajo en la zona alta (3,90 mg/L), pero aumenta aguas abajo hasta alcanzar los 7,52 mg/L, tal vez debido al movimiento que oxigena el agua. En la parte alta no existen condiciones favorables para el crecimiento del hábitat acuático, pero se evidencia que la fuente se recupera a medida que desciende, puesto que el caudal inicia pequeño y al finalizar aumenta su tamaño, que incide en su proceso de autodepuración. La capacidad de una fuente hídrica receptora de autodepurarse está influenciada por diversos factores, entre ellos, el caudal superficial reducido, las modificaciones notables en el cauce y las riberas debido a actividades económicas y poblaciones asentadas, así como la existencia de fuentes de contaminación puntuales y difusas [23].

La demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) son indicadores importantes para evaluar la contaminación y la biodegradabilidad de las aguas residuales [24]. El índice DBO₅/DQO refleja el grado de biodegradabilidad del agua: valores bajos sugieren una biodegradabilidad limitada, mientras que valores altos indican alta biodegradabilidad. El DQO de las zonas media y alta de la quebrada Pavayaco se situó entre 41,3 y 45,8 mg O₂/L, con un promedio de 43,5 mg O₂/L. En cuanto a la DBO, se registraron resultados menores de 10,0 mg O₂/L en los tres puntos de muestreo.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 3. PARÁMETROS IN SITU QUEBRADA PAVAYACO

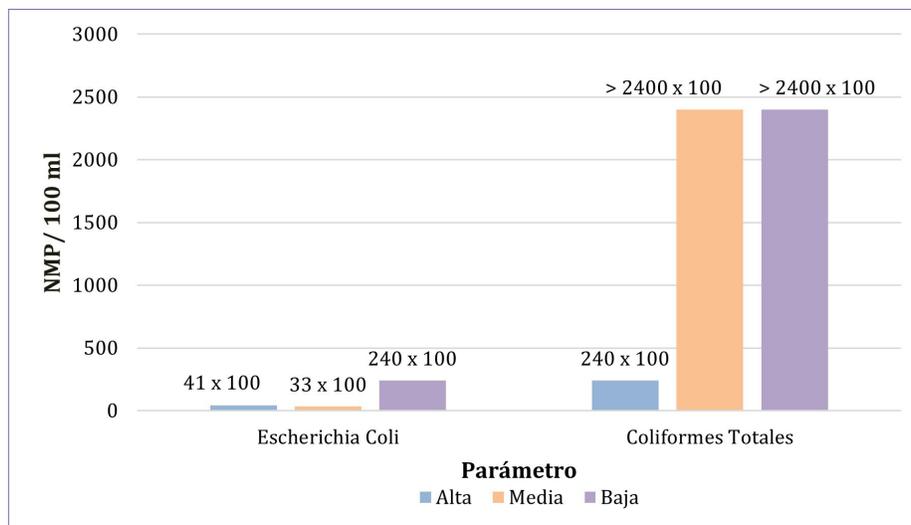


Fuente: elaboración propia.

FIGURA 4. PARÁMETROS EX SITU QUEBRADA PAVAYACO

Los análisis microbiológicos evidencian un incremento de coliformes totales, cuando la fuente hídrica llega a su parte baja, con valores superiores a 2400 x 100 NMP /100 ml, y de E. coli con concentraciones de 240 x 100 NMP /100 ml (figura 5). En un estudio de la cuenca del río Cauca se evidenciaron altos niveles de coliformes to-

tales, en especial, luego del segundo punto de muestreo, donde la calidad del agua fue calificada como mala. Este deterioro se atribuyó principalmente al aporte de materia orgánica originada en gran medida por las aguas residuales domésticas [25]. El análisis de las aguas residuales de la población Antonio Maceo reveló niveles de materia orgánica que superan los límites establecidos para su descarga, además de presencia de bacterias coliformes totales y fecales. Los valores encontrados fueron de $66 \cdot 10^4$ NMP/100 mL para coliformes totales (BCT) y de $36 \cdot 10^4$ NMP/100 mL para las bacterias coliformes fecales (BCF) [26]. Al analizar estos resultados, las aguas de la población muestran altas cantidades de material orgánico y bacterias. Además, el volumen de aguas residuales vertidas a diario podría causar contaminación y representar un posible riesgo sanitario para la comunidad.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 5. PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS EVALUADOS

Índices de contaminación (ICOS)

El análisis de los resultados respecto de los grados de contaminación, según los Índices de Contaminación Orgánica (ICO) (tabla 5), mostró que en la zona alta se presenta una contaminación alta (0,701) por materia orgánica, debido a la presencia de cocheras destinadas a la crianza de cerdos que vierten los residuos orgánicos en la quebrada y contribuyen en forma significativa con la carga contaminante. En la parte media se presenta una contaminación media (0,585), que se asocia a la presencia de viviendas que hacen vertimientos directos al cuerpo de agua. En la parte baja, donde desemboca la quebrada, se registró un nivel reducido de contaminación, atribuible

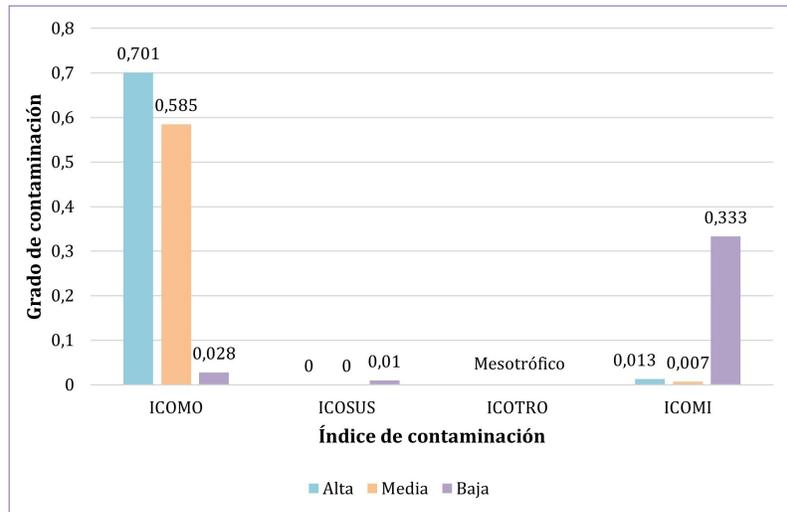
al proceso natural de autodepuración que ocurre conforme el agua avanza hacia las zonas más bajas.

En una investigación realizada en el río Teusacá se observaron resultados similares, evidenciando una considerable cantidad de materia orgánica descargada en el sitio de estudio. El índice calculado fue de 0,826, valor que al estar cerca de 1 indica un nivel elevado de contaminación. Esta acumulación de residuos provoca una reducción significativa del oxígeno en el agua, lo cual tiene efectos perjudiciales para los organismos acuáticos y el ecosistema en general [26].

El ICOMI en las partes alta y media no presenta un grado de contaminación, lo cual sugiere que la concentración de minerales en estas áreas de la quebrada no supera los límites establecidos como indicadores de contaminación, aunque en la zona baja se confirma una contaminación baja (0,333), que implica que hay una presencia ligeramente elevada de minerales disueltos. En los ríos Oro y Vetas, el punto de monitoreo 1 mostró resultados de 0,173, con una mínima cantidad de sólidos disueltos, que determina una conductividad baja, así como baja dureza y alcalinidad, sin ningún grado de contaminación. El tercer seguimiento reportó 0,221, que indica poca contaminación asociada a componentes, como sólidos suspendidos, calcio, magnesio y carbonatos, los cuales contribuyen para que las aguas sean de bajo rendimiento ecológico [28].

En el río Teusacá (Colombia), el análisis de la calidad del agua con el uso de indicadores biológicos arrojó resultados variables, mostrando una disminución progresiva en la calidad durante el curso del río. En las zonas media y baja, el agua fue calificada como moderadamente contaminada, con una tendencia hacia una contaminación considerable y aguas muy contaminadas. Por otra parte, aunque en la zona alta se observó favorable la calidad del agua, todavía se encontraron niveles presentes de contaminación [29].

De igual forma, no se evidencia un resultado anormal en los índices de contaminación por sólidos suspendidos ni por contaminación trófica. Este índice se encuentra en valores de 0.01 – 0.02 mg/l, establecido como mesotrófico. El estado mesotrófico se refiere a cuerpos de agua que tienen niveles intermedios de nutrientes y biomasa, situados entre los extremos de alta y baja concentración [30].



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 6. VALORES ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR ZONA MUESTREO

CONCLUSIONES

Parámetros fisicoquímicos como el porcentaje de saturación de oxígeno y oxígeno disuelto en la zona alta evidencian la falta de un ambiente adecuado para el sostenimiento de organismos acuáticos. El análisis microbiológico mostró una alteración significativa debido a la presencia de bacterias como *Escherichia coli* y coliformes totales, lo cual tiene repercusiones directas en la salud de la comunidad. Asimismo, la conductividad evidenció un aumento hasta $42,54 \mu\text{S}/\text{cm}$, relacionado con el incremento en el aporte de materia orgánica y nutrientes. Además, los sólidos disueltos totales y la turbiedad presentaron mayor variación en la zona media, donde se asienta la mayor parte de la comunidad.

Es importante resaltar que, aunque la mayoría de los parámetros están dentro de los valores permitidos que no afectan gravemente las condiciones del ecosistema, estos hallazgos evidencian que la quebrada Pavayaco recibe cargas contaminantes provenientes de los vertimientos de la población asentada en la vereda Condagua. Aunque la contaminación no representa un aporte significativo en la parte baja de la quebrada, es necesario sensibilizar la comunidad ubicada en la parte alta, acerca de la necesidad de adoptar prácticas sostenibles, en particular en la actividad porcina, para mitigar el impacto ambiental.

La educación ambiental, específicamente en la correcta disposición y manejo de las aguas residuales, se presenta como la alternativa más efectiva para contrarrestar las consecuencias negativas que estas aguas están causando a la comunidad del resguar-

do indígena Inga de Condagua, seguida de procesos de biorremediación que se ajusten a las necesidades del contexto y a la cosmovisión indígena. Estas medidas son cruciales para evitar la proliferación de vectores y sus repercusiones en la salud de las familias asentadas en la zona.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la gobernadora Gisella Garreta y a la comunidad indígena Inga del Resguardo de Condagua por su valiosa colaboración en este estudio.

REFERENCIAS

- [1] E. M. García Salazar, “El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México”, *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, vol. 29, n.º. 54, sep. 2019. doi: 10.24836/es.v29i54.741.
- [2] M. Brousett-Minaya, A. Chambi Rodríguez, M. Mollocondo Turpo, L. Aguilar Atamari y E. Lujano Laura, «Evaluación Físico-Química y Microbiológica de Agua para Consumo Humano Puno - Perú», *Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 2018. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.bo/pdf/rfer/v15n15/v15n15_a05.pdf. [Accedido: 3 julio 2024].
- [3] J. Sánchez , «Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México», vol. 5, pp. 119-143, 2017. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-65762017000200119&lng=es&tlng=es. [Accedido: 25 junio 2024].
- [4] Grupo Banco Mundial, «Banco Mundial», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/03/19/wastewater-a-resource-that-can-pay-dividends-for-people-the-environment-and-economies-says-world-bank>. [Accedido: 23 junio 2024].
- [5] IDEAM, «Oferta del agua». [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/siac/ofertaagua>. [Accedido: 23 junio 2024].
- [6] L. E. G. Durán, U. Libre y S. Socorro, «Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros fisicoquímicos y biológicos», 2018. doi: 10.18041/2590-6704/ambiental.1.2016.4593.
- [7] A. K. N. Vargas, J. Calderón, D. Velásquez, M. Castro y D. A. Núñez, «Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia», *Revista chilena de ingeniería*, vol. 28, n.º. 2, 2020. doi: 10.4067/S0718-33052020000200315.

- [8] IDEAM, «Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua». [En línea]. Disponible en: https://www.andi.com.co/Uploads/Cartilla_ENA_%202018.pdf. [Accedido: 25 junio 2024].
- [9] Corpoamazonia, «Caracterización Fisicoquímica y Microbiológica de las Aguas Superficiales en Fuentes Hídricas del Amazonas, en los Municipios de Leticia y Puerto Nariño, Departamento del Amazonas», 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.corpoamazonia.gov.co/files/tramites/rh/tr/2020_amazonas.pdf. [Accedido: 1 julio 2024].
- [10] Y. Palacios Valencia, «Acceso al agua potable y saneamiento: Desafío en las Américas para colectivos étnicos desde los estándares internacionales de protección de los derechos humanos», *Relac Int*, n.º. 45, pp. 137-162, oct. 2020. doi: 10.15366/relacionesinternacionales2020.45.006.
- [11] M. Ait-Kadi, “Water for Development and Development for Water: Realizing the Sustainable Development Goals (SDGs) Vision”, 2016. doi: 10.1016/j.aqpro.2016.06.013.
- [12] S. Méndez Fajardo, M. Opazo, Y. Romero y B. C. Pérez, “Metodología para la apropiación de tecnologías de saneamiento básico en comunidades indígenas”, *Cuadernos de desarrollo rural*, 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/cudr/v8n66/v8n66a07.pdf>. [Accedido: 25 junio 2024].
- [13] N. E. Samboni Ruiz, Y. Carvajal Escobar y J. C. Escobar, “Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación”, vol. 27, n.º. 3, pp. 172-181, 2007. doi: 10.15446/ing.investig.v27n3.14858.
- [14] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, «Por el cual se corrige el artículo décimo del Acuerdo 045 del 25 de enero de 2006 que amplió el resguardo indígena Inga de Condagua», 2022.
- [15] Alcaldía Municipal de Mocoa, «Municipio de Mocoa». [En línea]. Disponible en: <https://www.mocoa-putumayo.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>. [Accedido: 28 junio 2024].
- [16] Corpoamazonia, «Municipio de Mocoa, Putumayo». [En línea]. Disponible en: https://www.corpoamazonia.gov.co/region/putumayo/municipios/ptyo_mocoa.html. [Accedido: 28 junio 2024].
- [17] IDEAM, «Protocolos, procedimientos y metodologías». [En línea]. Disponible en: <https://www.ideam.gov.co/web/agua/protocolos-procedimientos-y-metodologias>. [Accedido: 17 enero 2025].
- [18] A. Ramírez, R. Restrepo, y G. Viña, «Cuatro índices de contaminación», *Tecnología y Futuro*, vol. 1, 1997. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/ctyf/v1n3/v1n3a09.pdf>. [Accedido: 3 julio 2024].

- [19] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 631 de 2015 «Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones». 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>. [Accedido: 4 julio 2024].
- [20] F. D. Cuadros Segura, A. J. Moyano Salcedo, A. M. Pabon Laverde y J. V. Trujillo Arias, «Impacto ambiental del vertimiento de aguas servidas en aglomerados urbanos ilegales del municipio de Villavicencio, Colombia», *Tecnura*, vol. 25, n.º. 68, pp. 43-62, abr. 2021. doi: 10.14483/22487638.16273.
- [21] A. Aveiga Ortiz, «Variaciones físico-químicas de la calidad del agua del río Carrizal en Manabí», vol. 3, pp. 30-41, 2019. doi: 10.29019/enfoqueute.v10n3.423.
- [22] V. Moreno-Jiménez, O. Castillo-Acosta, L. Gama-Campillo, J. Zavala-Cruz y M. A. Ortiz-Pérez, «Relación de vegetación ribereña and propiedades del suelo en un afluente del río tacotalpa, tabasco, méxico», *Madera Bosques*, vol. 23, n.º. 1, pp. 91-109, 2017. doi: 10.21829/myb.2017.231510.
- [23] A. Montalván-Estrada, D. Yuri Aguilera-Corrales, O. Brígido-Flores, E. Veitia-Rodríguez y L. Lázaro Rodríguez-LaO, «Procesos de contaminación-purificación en aguas superficiales afectadas por el vertimiento de efluentes de una tenería», *Revista Cubana de Química*, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v31n1/2224-5421-ind-31-01-65.pdf>. [Accedido: 4 julio 2024].
- [24] E. Raffo Lecca, «Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno», *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, 2014, [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/816/81640855010.pdf>. [Accedido: 5 julio 2024].
- [25] N. E. Samboni, A. Reyes y Y. Carvajal, «Aplicación de los indicadores de calidad y contaminación del agua en la determinación de la oferta hídrica neta», *Ingeniería y Competitividad*, vol. 13, n.º. 2, pp. 49-60, 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323530004>
- [26] S. Crombet-Grillet, N. Pérez Pompa y A. Ábalos Rodríguez, «Caracterización de las aguas residuales de la comunidad « Antonio Maceo» de la Universidad de Oriente», *Revista Cubana de química*. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4435/443543735003.pdf>. [Accedido: 9 julio 2024].
- [27] J. Sebastián y C. Arias, «Determinación y evaluación de índices de contaminación (ICOS) en cuerpos de agua», 2014. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10654/10901>. [Accedido: 5 de julio de 2024].
- [28] J. Esther y Z. Dávila, «Determinación de los índices de calidad y contaminación del agua (ICA e ICOS) sobre tramos superficiales del río Oro y río Vetas para el análisis y verificación del cumplimiento de la normatividad colombiana», 2018.

- [29] S. López Mendoza, D. F. Huertas Pineda, Á. M. Jaramillo Londoño, D. S. Calderón Rivera y J. L. Díaz Arévalo, «Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad del agua del río Teusacá (Cundinamarca, Colombia)», *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 37, n.º. 02, pp. 269-288, jun. 2022. doi: 10.14482/inde.37.2.6281.
- [30] E. Orquera y M. Cabrera, «Caracterización del estado trófico de la laguna de Yambo mediante análisis de fósforo», *infoANALÍTICA*, vol. 8, n.º. 1, pp. 99-111, enero 2020. doi: 10.26807/ia.v8i1.119.