

**Ruta estratégica del monitoreo participativo en la Unidad Hidrográfica del Río Tona para  
el fortalecimiento de la gobernanza del río y su territorio**

**Adriana del Pilar Córdoba Castellanos**

**Trabajo de grado para optar por el título de Magister en Ciencias y Tecnologías  
Ambientales**

**Director**

**Alexandra Cerón Vivas**

**Doctora en Ingeniería**

**Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**División de Ingenierías y Arquitectura**

**Maestría en Ciencias y Tecnologías Ambientales**

**2026**

### **Dedicatoria**

A mis padres, por su ejemplo de determinación y por inculcarme siempre el valor del conocimiento y el deseo de aprender.

A mis hijas, Valeria y Verónica, por ser el motor de mi vida y la razón que me impulsa a superarme cada día. Todo este esfuerzo es para ustedes, con la esperanza de que valoren el conocimiento y comprendan que, con amor y perseverancia, los sueños son posibles.

A Leo, por su apoyo y paciencia, por acompañarme en los traspasos y por motivarme a terminar este proceso.

### **Agradecimientos**

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) por su apoyo institucional, acompañamiento técnico y disposición para el desarrollo del presente trabajo, así como por su compromiso con la gestión sostenible del recurso hídrico en la región.

De manera especial, agradezco al equipo de monitoreo participativo, cuyo compromiso, dedicación y trabajo en campo hicieron posible la recolección de la información que sustenta este estudio; su disposición para aprender, aportar y construir colectivamente fue fundamental para el desarrollo de este proceso.

Asimismo, extendiendo mi gratitud a las comunidades de la Unidad Hidrográfica del río Tona, quienes, a través de su participación, conocimiento del territorio y sentido de pertenencia, contribuyeron de manera significativa al fortalecimiento del monitoreo participativo y a la comprensión de las dinámicas del recurso hídrico.

A los diferentes actores institucionales, técnicos y sociales que de una u otra manera participaron en este proceso, brindando información, orientación y apoyo, expreso también mi reconocimiento por sus valiosos aportes.

A todas las personas que hicieron posible este trabajo, el cual busca aportar al fortalecimiento de la gobernanza del agua y a la construcción de estrategias sostenibles para la gestión del recurso hídrico en el territorio.

Finalmente, a mi familia, por su apoyo constante, aliento y motivación durante este proceso.

## Contenido

Introducción .....	16
1. Objetivos.....	19
1.1 Objetivo general .....	19
1.2 Objetivos específicos.....	19
2. Marco referencial .....	20
2.1 Marco teórico .....	20
2.1.1 Calidad del agua .....	20
2.1.2 Cantidad del agua .....	20
2.1.3 Gobernanza del agua .....	21
2.1.4 Monitoreo participativo .....	21
2.1.5 Unidad Hidrográfica del Río Tona .....	22
2.2 Marco normativo .....	22
2.3 Estado del arte .....	25
3. Diseño metodológico .....	29
3.1 Fase 1. Evaluación de las actividades antrópicas en la UH del Río Tona.....	29
3.1.1 Recopilación de la información.....	29
3.1.2 Tabulación y análisis de la información.....	29
3.1.3 Evaluación de impactos ambientales por actividad antrópica .....	30
3.2 Fase 2. Sistematizar la metodología del protocolo de Monitoreo Participativo (MP) de calidad y cantidad del agua en la jurisdicción de la CDMB, a partir de la estrategia piloto de gobernanza implementada en la Unidad Hidrográfica del Río Tona .....	30
3.2.1 Revisión bibliográfica y análisis de antecedentes del MP en la UH del río Tona.....	31

3.2.2 Caracterización de la experiencia piloto de MP en la UH del Río Tona.....	31
3.2.3 Estructurar la metodología del protocolo de MP .....	32
3.2.4 Análisis de aplicabilidad y condiciones para la réplica en otros territorios de la CDMB .....	33
3.3 Fase 3. Definición de parámetros para la implementación de un sistema de alertas tempranas .....	37
3.3.1 Validación de los datos del monitoreo participativo .....	37
3.3.2 Análisis estadístico que permita establecer tendencias de los datos para cada parámetro medido. ....	37
3.3.3 Identificación de causas de reducción de caudal y calidad de recurso hídrico.....	38
3.3.4 Selección de criterios para implementar un sistema de alertas tempranas en términos de calidad y cantidad del agua.....	38
4. Análisis y resultados .....	39
4.1 Evaluación de las actividades antrópicas en la UH del Río Tona.....	39
4.1.1 Recopilación de la información.....	39
4.1.2 Tabulación y análisis de la información .....	44
4.1.3 Evaluación de impactos ambientales por actividad antrópica .....	48
4.2 Sistematizar la metodología del protocolo de Monitoreo Participativo (MP) de calidad y cantidad del agua en la jurisdicción de la CDMB, a partir de la estrategia piloto de gobernanza implementada en la Unidad Hidrográfica del Río Tona. ....	53
4.2.1 Objetivo general .....	55
4.2.2 Objetivos específicos.....	56
4.2.3 Justificación .....	56

4.2.4 Área de estudio del monitoreo participativo del rio Tona .....	57
4.2.5 Plan de monitoreo participativo.....	59
4.2.6 Análisis de aplicabilidad y condiciones para la réplica en otros territorios de la CDMB .....	93
4.3 Definición de parámetros para la implementación de un sistema de alertas tempranas. En Colombia, se encuentran instaladas diferentes redes de monitoreo hidro climatológicas en fuentes superficiales generalmente de órdenes superiores (I y II) con alto caudal, operadas por el IDEAM, Autoridades Ambientales y entes o proyectos privados. (IDEAM, 2023).....	97
4.3.1 Análisis de resultados monitoreo participativo (2022-2023) .....	101
4.3.2 Análisis comparativo de los datos del monitoreo participativo con campañas de monitoreo.....	152
4.3.3 Parametrización del SAT .....	162
5. Conclusiones.....	174
Referencias.....	176
Apéndices.....	183

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1.</b> <i>Marco normativo aplicable</i> .....	22
<b>Tabla 2.</b> <i>Estrategia de Sistematización del MP en la UH del Rio Tona</i> .....	31
<b>Tabla 3.</b> <i>Criterios para selección de monitores comunitarios</i> .....	34
<b>Tabla 3.</b> <i>Tipos de uso del recurso por concesiones de agua en el Rio Tona</i> .....	44
<b>Tabla 4.</b> <i>Caudal total y Distribución de caudal por uso en Rio Tona</i> .....	45
<b>Tabla 5.</b> <i>Actividades identificadas y las posibles fuentes de presión</i> .....	49
<b>Tabla 6.</b> <i>Matriz de Valoración de Leopold</i> .....	51
<b>Tabla 7.</b> <i>Valoración por tramos metodología Battle -Columbus</i> .....	52
<b>Tabla 9.</b> <i>Localización de puntos de monitoreo y actores responsables</i> .....	61
<b>Tabla 10.</b> <i>Frecuencia monitoreo participativo.</i> .....	63
<b>Tabla 11.</b> <i>Parámetros a monitorear</i> .....	68
<b>Tabla 12.</b> <i>Instrumentación monitoreo participativo-kit.</i> .....	69
<b>Tabla 13.</b> <i>Consolidado de especificaciones de medición de multiparámetro + kits (colorimetría + test cualitativo)</i> .....	71
<b>Tabla 14.</b> <i>Resultados de los caudales calculados a partir de los datos de MP (2022-2023)</i> ....	104
<b>Tabla 15.</b> <i>Análisis estadístico para el Caudal de los datos de MP en todos los puntos</i> .....	107
<b>Tabla 16.</b> <i>Resultados de pH medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)</i> .....	109
<b>Tabla 17.</b> <i>Análisis estadístico de los datos medidos de pH en los puntos de MP</i> .....	111
<b>Tabla 18.</b> <i>Resultados de Temperatura medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)</i> .....	113
<b>Tabla 19.</b> <i>Análisis estadístico de los datos medidos de temperatura en los puntos de MP</i> .....	115
<b>Tabla 20.</b> <i>Resultados de Conductividad eléctrica medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)</i> .....	117

<b>Tabla 21.</b> <i>Análisis estadístico de los datos medidos de CE en los puntos de MP</i> .....	119
<b>Tabla 22 .</b> <i>Resultados de Solidos Disueltos Totales medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)</i> .....	120
<b>Tabla 23.</b> <i>Análisis estadístico de los datos medidos de TDS en los puntos de MP</i> .....	122
<b>Tabla 24.</b> <i>Resultados de Fosfatos medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)</i> .....	124
<b>Tabla 25.</b> <i>Análisis estadístico de los datos medidos de Fosfatos en los puntos de MP</i> .....	125
<b>Tabla 26.</b> <i>Resultados obtenidos de E coli en los puntos 1,2 y 3</i> .....	126
<b>Tabla 27.</b> <i>Análisis integrado entre los puntos de MP para E-coli</i> .....	129
<b>Tabla 28.</b> <i>Resultados de OD. medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)</i> .....	129
<b>Tabla 29.</b> <i>Análisis estadístico de los datos medidos de OD en los puntos de MP</i> .....	130
<b>Tabla 30.</b> <i>Resultados de GH, medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)</i> .....	133
<b>Tabla 31.</b> <i>Análisis estadístico de los datos medidos de Dureza en los puntos de MP</i> .....	135
<b>Tabla 32.</b> <i>Resultados de KH medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)</i> .....	136
<b>Tabla 33.</b> <i>Análisis estadístico de los datos medidos de Alcalinidad en los puntos de MP</i> .....	138
<b>Tabla 34.</b> <i>Resultados de NO<sup>2-</sup>. medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)</i> .....	139
<b>Tabla 35.</b> <i>Análisis estadístico de los datos medidos de Nitritos en los puntos de MP</i> .....	141
<b>Tabla 36.</b> <i>Resultados de NO<sup>3-</sup> medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)</i> .....	143
<b>Tabla 37.</b> <i>Análisis estadístico de los datos medidos de Nitratos en los puntos de MP</i> .....	144
<b>Tabla 38.</b> <i>Resultados de Cloro libre medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)</i> .....	146
<b>Tabla 39.</b> <i>Análisis estadístico de los datos medidos de Cloro libre en los puntos de MP</i> .....	148
<b>Tabla 40.</b> <i>Puntos de monitoreo campañas</i> .....	154
<b>Tabla 41.</b> <i>Resultados Punto RT-01A TONA (campaña de monitoreo)</i> .....	154
<b>Tabla 42.</b> <i>Resultados Punto RT-02 EL PALMAR (campaña de monitoreo)</i> .....	157

<b>Tabla 43.</b> <i>Resultados Punto RT-01B CASA HOTEL (campaña de monitoreo)</i> .....	159
<b>Tabla 44.</b> <i>Experiencias de sistemas de alertas tempranas y criterios relevantes para el diseño del SAT del río Tona</i> .....	163
<b>Tabla 45.</b> <i>Parámetros, umbrales y niveles de alerta propuestos para el SAT del río Tona</i> .....	166
<b>Tabla 46.</b> <i>Niveles de alerta y acciones a implementar</i> .....	171

### Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> <i>Eje principal UH del Rio Tona y principales afluentes.</i> .....	41
<b>Figura 2.</b> <i>Frecuencia por tipo de uso en el rio Tona</i> .....	45
<b>Figura 3.</b> <i>Distribución del caudal por uso en e Rio Tona</i> .....	46
<b>Figura 4.</b> <i>Mapa de la subzona hidrográfica río Lebrija y la unidad hidrográfica Tona.</i> .....	59
<b>Figura 5.</b> <i>Puntos de Monitoreo sobre a UH del Rio Tona</i> .....	62
<b>Figura 6.</b> <i>Aforo volumétrico - medición de caudal</i> .....	75
<b>Figura 7.</b> <i>Equipo multiparámetro marca HANNA.</i> .....	79
<b>Figura 8.</b> <i>Test de fosfato y ortofosfato colorimétrico marca API.</i> .....	82
<b>Figura 9.</b> <i>Test E-Coli marca AQUAVIAL.</i> .....	84
<b>Figura 10.</b> <i>Test Oxígeno Disuelto marca Monitor</i> .....	86
<b>Figura 11.</b> <i>Procedimiento determinación de pH, KH, GH, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub> y Cl<sub>2</sub></i> .....	88
<b>Figura 12.</b> <i>Aplicación práctica en formato de flujo</i> .....	91
<b>Figura 13.</b> <i>Caudal calculado a partir del aforo volumétrico por MP en cada punto en el periodo 2022-2023</i> .....	106
<b>Figura 14.</b> <i>pH medido por MP en cada punto en el periodo 2022-2023</i> .....	111
<b>Figura 15.</b> <i>Temperatura medida por MP en cada punto en el periodo 2022-2023</i> .....	114
<b>Figura 16.</b> <i>Conductividad eléctrica medido por MP en cada punto en el periodo 2022-2023</i> .	118
<b>Figura 17.</b> <i>Solidos disueltos totales medidos por MP en cada punto en el periodo 2022-2023</i>	122
<b>Figura 18.</b> <i>Fosfatos PO<sub>4</sub>-3 medidos por MP en cada punto en el periodo 2022-2023</i> .....	125
<b>Figura 19.</b> <i>Oxígeno Disuelto medidos por MP en cada punto en el periodo 2022-2023</i> .....	130
<b>Figura 20.</b> <i>Dureza GH medidos por MP en cada punto en el periodo 2022-2023</i> .....	134

<b>Figura 21.</b> <i>Datos de Alcalinidad KH medidos por MP en cada punto en el periodo 2022-2023</i>	137
<b>Figura 22.</b> <i>Nitritos NO<sub>2</sub>-medidos por MP en cada punto en el periodo 2022-2023</i>	141
<b>Figura 23.</b> <i>Nitratos NO<sup>-3</sup> medidos por MP en cada punto en el periodo 2022-2023</i>	144
<b>Figura 24.</b> <i>Cloro libre medidos por MP en cada punto en el periodo 2022-2023</i>	147
<b>Figura 25.</b> <i>Diagrama del Protocolo de operatividad del SAT</i>	171

**Listado de apéndices**

<b>Apéndice A.</b> <i>Mapa de actores</i> .....	183
<b>Apéndice B.</b> <i>Mapas de Cobertura</i> .....	184
<b>Apéndice C.</b> <i>Mapa HRU Tona</i> .....	185
<b>Apéndice D.</b> <i>Mapa de servicios ecosistémicos Tona</i> .....	186

### **Resumen**

El monitoreo participativo es una estrategia de conservación, utilizada para recolectar datos en campo en términos de calidad y cantidad de agua, involucrando a los actores sociales que habitan y se benefician de la unidad hidrográfica. Los datos recolectados por las partes interesadas son transmitidos a la CDMB, para ser analizados, validados y divulgados para posteriormente discutir junto con las partes interesadas acerca de los diferentes conflictos y posibles soluciones. Considerando lo anteriormente expuesto, es necesario diseñar el Protocolo de monitoreo que contemple todas las acciones para el diseño, implementación y validación del monitoreo participativo de la Unidad Hidrográfica del Río Tona.

*Palabras clave:* agua, cantidad, calidad, monitoreo, río Tona, unidad hidrográfica.

**Abstract**

Participatory monitoring is a conservation strategy used to collect field data in terms of water quality and quantity, involving the social actors who inhabit and benefit from the hydrographic unit. The data collected by the stakeholders are transmitted to the CDMB to be analyzed, validated, and disseminated, and subsequently discussed jointly with the stakeholders regarding the different conflicts and possible solutions. Considering the above, it is necessary to design a monitoring protocol that encompasses all actions for the design, implementation, and validation of participatory monitoring of the Tona River Hydrographic Unit.

*Keywords:* hydrographic unit, monitoring, quality, quantity, Tona River, water

### Glosario

*Alcalinidad del agua:* mide la capacidad buffer de una solución dada principalmente por los iones carbonatos y bicarbonatos.

*Caudal:* medida de la cantidad del agua dada como flujo de volumen en el tiempo, se expresa como unidad de volumen sobre tiempo

*CAS:* Corporación autónoma regional de Santander

*CDMB:* Corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga

*Cloro total:* es la suma de cloro libre y cloro combinado, se encuentra frecuentemente en el agua debido a su uso como desinfectante y por lo anterior es perjudicial para gran cantidad de bacterias y microorganismo benéficos que mantienen las cadenas tróficas del agua.

*Conductividad del agua:* capacidad para conducir electricidad, la conductividad aumenta en presencia de electrolitos.

*Dureza:* concentración de sales de magnesio y calcio presentes en el agua.

*DWA:* autoridades holandesas del agua por sus siglas en inglés Dutch Water Authorities.

*InspirAgua:* programa de intercambio de conocimientos y experiencias en torno a la gobernanza del agua en Colombia con participación de las autoridades holandesas del agua Dutch Water Authorities (DWA), constituido desde 2015.

*Nitritos, Nitratos en agua:* medida importante de la calidad del agua está relacionado al ciclo del nitrógeno en el suelo y a la contaminación por fertilizantes químicos de tipo NPK.

*pH:* medida de acidez o basicidad de una solución acuosa.

*Unidad hidrográfica UH:* drenaje de agua superficial que pertenece al eje principal de un río.

### **Introducción**

La cuenca del río Tona en el Departamento de Santander tiene una gran diversidad de características físico-geográficas, económicas, culturales que permite el desarrollo de diferentes actividades que impactan en la variedad del uso del suelo. (Ingeniería Civil Ambiental Ltda y Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2005)

El río Tona nace a una altitud de aproximadamente 3850 m.s.n.m en el Páramo de Santurbán y fluye como un río de montaña característico con un área aproximadamente de 192.50 Km<sup>2</sup> y una longitud del cauce principal de aproximadamente 27.50 Km a través de un valle hasta su desembocadura en el Río Suratá a aproximadamente 800 m.s.n.m. (Carrillo Peña, 2018a). En su recorrido, aguas arriba de la confluencia con el río Suratá, se encuentra el embalse que permite almacenar y regular el caudal del cuerpo de agua. Además, es de gran importancia para el área metropolitana de Bucaramanga, ya que se proyecta que este permitirá garantizar el suministro de agua por 35 años y tener un reservorio por tres meses en caso de una época intensa de estiaje. (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2021b)

La capacidad de conservación y almacenamiento de la cuenca del río está disminuyendo como resultado del cambio en el uso del suelo, ya que se acentúan fenómenos tales como la deforestación y los monocultivos. Anteriormente el uso de la tierra era relativamente diverso y con actividades agropecuarias a pequeña escala, pero en la actualidad cultivos como el café a una mayor escala se intensifican alrededor de la UH. Otros factores como el cambio climático y una demanda creciente de agua, dado el aumento poblacional, pueden suponer un eminente riesgo de escasez de agua en términos de cantidad y frecuencia. (Cáceres Rivera et al., 2022)

En la UH del río Tona, se han determinado dos tipos de vertimientos líquidos que se están realizando: de origen doméstico de los centros poblados, en especial del casco urbano del

municipio de Tona, que vierten las aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento; y los vertidos agrícolas, generalmente procedentes de cultivo de café y su procesamiento. Lo anterior puede conducir entre otras cosas, a un aumento de los niveles de E-coli, nitrato y fosfato (Bolaños-Alfaro et al., 2017a). El cambio en el uso del suelo, la deforestación, la cría de animales y la reducción de la calidad del agua superficial también conducen a una disminución de la biodiversidad. (Leija et al., 2021)

La calidad del agua superficial en el río Tona ha sido monitoreada por la CDMB en un punto muy cercano al embalse, identificado como RT-01, y en cantidad es monitoreada en varios puntos por el acueducto metropolitano de Bucaramanga. Teniendo en cuenta la importancia de esta UH, es indispensable realizar diferentes tomas de muestras alrededor de la cuenca con el fin de determinar el impacto de las diferentes actividades antrópicas en la calidad y la cantidad del agua que abastece aproximadamente a un millón de habitantes (CDMB, 2019).

El plan de acción cuatrienal de la CDMB, “El agua nos une, es tiempo de la seguridad hídrica 2024-2027”, expone que la seguridad hídrica es un complejo sistema que involucra diferentes factores naturales y sociales que se articulan dentro de un territorio alrededor del agua. En este sentido establece que, con el fin de lograr esta articulación, se deben constituir diferentes mecanismos regionales con el objetivo de generar conocimiento a través de un sistema de red de monitoreo, información, datos, gestión, planeación y consulta, alrededor de la seguridad hídrica, la biodiversidad, la sostenibilidad de los suelos y un aire más saludable (CDMB, 2024b). Por lo anterior, es de suma importancia que, además de las instituciones gubernamentales y de conocimiento, las comunidades locales participen en la recopilación e interpretación de datos.

En Colombia, se han desarrollado diferentes estrategias de participación ciudadana en torno a la gobernanza y la gestión integral de los recursos naturales, pero actualmente no se cuenta con un diseño metodológico relacionado a cantidad y calidad del agua (Fernández-Vargas, 2020).

Por lo anterior, esta propuesta describe los lineamientos generales para el diseño de la metodología para la construcción de la ruta estratégica del monitoreo participativo en la Unidad Hidrográfica del Río Tona, como una estrategia para el fortalecimiento de la gobernanza en torno al recurso hídrico, dado que es el eje articulador del territorio y la población. Adicionalmente, al establecerse una metodología reproducible en la jurisdicción de la CDMB, esta puede extrapolarse a otras fuentes hídricas priorizadas dentro de los 13 municipios que conforman el área de influencia de la CDMB.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Diseñar la metodología para la construcción de la ruta estratégica del monitoreo participativo en la Unidad Hidrográfica del Río Tona, reproducible en la jurisdicción de la CDMB, para el fortalecimiento de la gobernanza del río y su territorio.

### **1.2 Objetivos específicos**

Evaluar las actividades antrópicas que puedan generar algún tipo de afectación a la calidad y/o cantidad del agua en la Unidad Hidrográfica del Río Tona

Sistematizar la metodología del protocolo de Monitoreo Participativo (MP) de calidad y cantidad del agua en la jurisdicción de la CDMB, a partir de la estrategia piloto de gobernanza implementada en la Unidad Hidrográfica del Río Tona.

Definir los parámetros necesarios para la implementación de un sistema de alertas tempranas relacionadas a cantidad y calidad del agua, a partir de los datos de recolectados en la Unidad Hidrográfica del Río Tona.

## **2. Marco referencial**

### **2.1 Marco teórico**

#### ***2.1.1 Calidad del agua***

En los últimos años el recurso hídrico ha sido impactado fuertemente causando un efecto negativo en la calidad del agua, debido al uso no sostenible del recurso, el aumento de la población, así como de las actividades industriales y agropecuarias que demandan gran consumo y generan cargas contaminantes que son vertidas a las fuentes superficiales o a los suelos que después, por procesos de escorrentía o infiltración, terminan en las fuentes hídricas (Chacón et al., 2024).

Las propiedades físicas y químicas del agua varían según el uso del suelo, es decir, la fisicoquímica del agua es alterada conforme se desarrollan actividades antrópicas, generalmente las partes de alta montaña, donde se conservan los sistemas forestales, cuentan con mejor calidad del agua (Guerra et al., 2024).

La calidad del agua de una fuente hídrica puede ser evaluada mediante parámetros fisicoquímicos, microbiológicos, bioindicadores o a través del cálculo de índices de calidad a partir del ponderado de parámetros establecidos (Saldaña et al., 2024).

#### ***2.1.2 Cantidad del agua***

Se define como la magnitud en unidades de volumen, disponibles que lleva la fuente hídrica, a lo largo de su cauce, sin contar el caudal ecológico o caudal mínimo para que subsista en normalidad el ecosistema alrededor de la cuenca. Nos indica la oferta en agua de la fuente en cuestión (Jujnovsky et al., 2010).

### ***2.1.3 Gobernanza del agua***

La gobernanza del agua constituye una herramienta colaborativa de la gestión integral del agua que involucra a los actores interesados, permitiendo la transformación de problemáticas ambientales (Giordano et al., 2023).

La gestión hídrica integral en una unidad hidrográfica está determinada por las particularidades físico-geográficas, la geopolítica, las sensibilidades ambientales, la escases del recurso, el manejo de cuerpos de agua contaminados y las relaciones entre las poblaciones aledañas (Bolívar y Montoya, 2021).

### ***2.1.4 Monitoreo participativo***

Es una estrategia participativa para recolectar y analizar los datos relacionados a la calidad y cantidad del agua, así como para socializar los resultados obtenidos, con el fin de tomar mejores decisiones hacia una gobernanza sobre la fuente de agua y su territorio. Se busca que un número amplio de actores que confluyen en la cuenca participen en todas las etapas del proceso, de manera que se agreguen métodos de análisis e indicadores de calidad acondicionados a cada fuente según las actividades desarrolladas y los intereses de los involucrados (Iribarne y Lavaggi, 2021).

Actualmente, la calidad del agua y la seguridad hídrica son determinantes esenciales en la formulación de políticas para el bienestar socioeconómico del país. La escasez del agua se proyecta como una posible causa de conflicto mundial, por lo tanto, es indispensable desarrollar investigaciones y establecer estrategias para fortalecer la gestión integral del recurso hídrico, recolectando información desde los diferentes actores sociales, que permita la gobernanza efectiva del agua (Mendoza et al., 2021).

### 2.1.5 Unidad Hidrográfica del Río Tona

La unidad hidrográfica del río Tona tiene área total de aproximadamente 194 Km<sup>2</sup>, su cauce recorre un poco más de 19 Km y su pendiente media se calcula en un 55,7% entre su punto de desembalse, que es alrededor de 800 msnm, y la parte más alta en los páramos de Pescadero y San Turbán del Macizo de Santander a aproximadamente 3.800 msnm (Carrillo Peña, 2018)

El cauce principal se extiende en dirección Sur-Suroeste, los principales aportantes del río son las fuentes hídricas de orden inferior Arnanía, Golondrinas, El Roble, El Brasil, El Puerto, El Volante, Hoyos, Campo Hermoso y Ranas. El caudal mínimo captado desde las plantas de Tratamiento de potabilización de la Flora y Morrórico es de 750 l/s, que abastecen gran parte del área metropolitana de Bucaramanga (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2021a).

## 2.2 Marco normativo

El marco normativo, está compuesto por todos los actos administrativos relacionados al cumplimiento ambiental, establecido en Colombia. A continuación, en la Tabla 1, se enuncia en orden jerárquico considerando la estructura legislativa colombiana y posteriormente en orden cronológico.

**Tabla 1. Marco normativo aplicable**

Norma	Descripción
Constitución Política de Colombia de 1991	<p>Artículo 79: “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo”.</p> <p>Artículo 80: “El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados:”</p>

Norma	Descripción
	Artículo 365: “La ley fijará las competencias y responsabilidades relativas a la prestación de los servicios públicos domiciliarios, su cobertura, calidad y financiación, y el régimen tarifario que tendrá en cuenta además de los criterios de costos, los de solidaridad y redistribución de ingresos. Los servicios públicos domiciliarios se prestarán directamente por cada municipio cuando las características técnicas y económicas del servicio y las conveniencias generales lo permitan y aconsejen, y los departamentos cumplirán funciones de apoyo y coordinación. La ley determinará las entidades competentes para fijar las tarifas”
Ley 09 de 1979	“Código Sanitario Nacional. Medidas sanitarias sobre manejo de residuos sólidos.”
Ley 142 de 1994	“Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.”
Ley 373 de 1997	Por la cual ordena la formulación de los Planes de Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA).
Ley 388 de 1997	“Capítulo II: ordenamiento del territorio municipal. Capítulo IV: clasificación del suelo”
Ley 99 de 1993	“Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. Títulos II, IV, VI: funciones y competencias del Sistema Nacional Ambiental. Título VIII: de las licencias ambientales.”
Ley 685 de 2001	“Código de Minas: el código tiene como objetivos fomentar la exploración técnica y la explotación de los recursos mineros de propiedad estatal y privada; estimular estas actividades en orden a satisfacer los requerimientos de la demanda interna y externa de los mismos y a que su aprovechamiento se realice en forma armónica con los principios y normas de explotación racional de los recursos naturales no renovables y del ambiente, dentro de un concepto integral de desarrollo sostenible y del fortalecimiento económico y social del país”
Ley 1450 de 2011	Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014. Establece el concepto de gestión integral del recurso hídrico.
Ley 1549 de 2012	Direcciona la educación ambiental con un enfoque en la protección del recurso agua.
Ley 1930 de 2018	“Ley de Páramos”. Protege los ecosistemas de páramos como fuentes hídricas estratégicas.
Decreto 2811 de 1974	“Código Nacional de Recursos Naturales”

Norma	Descripción
Decreto 1541 de 1978	"Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973.". Específico sobre la concesión y permisos para el uso del agua.
Decreto 3930 de 2010	"Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones". Regula el uso y control de vertimientos de aguas residuales
Decreto 303 de 2012	"Por el cual se reglamenta parcialmente el artículo 64 del Decreto - Ley 2811 de 1974 en relación con el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico y se dictan otras disposiciones"
Decreto 1463 de 2012	Por el cual se declara de Interés Nacional el Proyecto de Regulación del Río Tona - Embalse de Bucaramanga.
Decreto 1640 de 2012	"Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones"
Decreto 2667 de 2012	"Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones"
Decreto 1076 de 2015 Título 5. Capítulo 1. Sección 7	"Permiso de emisiones para fuentes fijas. Capítulo 3 Sección 1. Licencias ambientales- Sección 20 Concesión y permiso de vertimientos"
Decreto 2245 de 2017	"Por el cual se reglamenta el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 y se adiciona una sección al Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el acotamiento de rondas hídricas"
Decreto 050 de 2018	"Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en relación con los Consejos Ambientales Regionales de la Macrocuencas (CARMAC), el Ordenamiento del Recurso Hídrico y Vertimientos y se dictan otras disposiciones"
Decreto 1287 de 2020	Regula el reúso de aguas residuales tratadas.
Resolución 2115 de 2007	Establece los criterios de calidad del agua potable.
Resolución 0631 de 2015	Regula los límites permisibles de vertimientos industriales y domésticos.
Resolución 0362 de 2020	Por la cual se adopta el POMCA de la cuenca del Alto Lebrija. Resolución CDMB

Norma	Descripción
Resolución 699 de 2021	“Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas Tratadas al suelo, y se dictan otras disposiciones”
Resolución 1256 de 2021	Define lineamientos para la formulación de Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH).

### 2.3 Estado del arte

Los enfoques participativos en los programas de desarrollo que involucran recursos de uso común buscan revitalizar el rol de la comunidad en la gestión de estos recursos. Cuando se implementan procesos participativos en la gestión del agua, se puede empoderar a los participantes, fomentar una mayor conciencia social sobre los problemas relacionados con el agua, fortalecer la legitimidad de las intervenciones y mejorar la prestación, así como su sostenibilidad. Sin embargo, estos procesos requieren un diseño adaptado al contexto, respaldado por recursos financieros y capacidades técnicas adecuados. (Jiménez et al., 2019)

Varios autores han documentado diversas iniciativas de ciencia ciudadana en el monitoreo del recurso hídrico. (Muhamad et al., 2020) resaltan que el monitoreo comunitario se propone como una herramienta para impulsar la participación directa de la comunidad local. A través del monitoreo comunitario, la participación de la comunidad local no se limita a las actividades de monitoreo, sino que abarca todas las etapas del mismo. (Njue et al., 2019) realizó una revisión sobre ciencia ciudadana y recopilación de datos colaborativos en el contexto de la hidrología, encontrando que la mayoría de los programas se encuentran en Norteamérica y Europa. La participación se basa principalmente en un modelo de ciencia ciudadana contributiva, que involucra a la ciudadanía en la recopilación de datos. Recientemente, (Dominguez et al., 2024) realizó una revisión sobre el fortalecimiento comunitario a través del monitoreo ciudadano de la calidad del agua., encontrando que el mayor nivel de organización ciudadana alcanzado por los

participantes se reconoce comúnmente como "Comités de Agua". Sin embargo, aún existe resistencia a los datos de calidad del agua generados por monitores ciudadanos, especialmente en regiones con proyectos de minería a cielo abierto a gran escala.

En México se han reportado experiencias de trabajo con el monitoreo comunitario participativo (MCP) de las características del agua. Para lograr una participación adecuada de la comunidad, se realizaron talleres sobre técnicas básicas para monitorear y analizar diferentes parámetros fisicoquímicos y biológicos (Flores et al., 2013). Por otro lado, Perevochtchikova et al (2016) reportó la experiencia de la implementación de un esquema de MCP de la calidad del agua en Ajusco, México, en el que se encontraron aspectos positivos como la certificación de ocho monitores, continuidad del monitoreo y el interés por conocer la experiencia del MCP realizada por parte de otras comunidades.

A nivel nacional, el Ideam en su Informe del estado del ambiente y los recursos naturales, resalta la importancia de los procesos participativos y del monitoreo de los recursos naturales, como pilares de la gobernanza y la gestión efectiva y sostenible del ambiente. (IDEAM, 2024)

La Gestión Integral del recurso hídrico y la Gobernanza del agua en Colombia han sido abordadas desde diversas perspectivas. Como resultado, se han desarrollado múltiples experiencias orientadas a la integración de la conservación de las fuentes hídricas con el entorno socioeconómico y cultural.

El proyecto Mojana Clima y Vida, diseñó un modelo de MCP para el seguimiento con bioindicadores de las acciones de rehabilitación ecosistémicas y socio ecológica de La Mojana, a través de un proceso participativo que involucra los actores del territorio "Pares" en la transferencia del conocimiento técnico y vivencial del ecosistema de la Mojana. Lo anterior con el objetivo de

evaluar el cumplimiento de las metas de rehabilitación de la cuenca y generar mejoras en las acciones desarrolladas en el territorio. (Herrera, 2020).

El análisis de fragilidad del Río Sinú realizado en 2021, como iniciativa de Gobernanza del recurso hídrico, incorporó el uso de Sistemas de Información Geográfica para la evaluación de fenómenos ambientales sobre la cuenca, a partir de estimaciones para la identificación y valoración de los potenciales impactos sobre la calidad del agua, fundamentadas en el estudio integral de las variables ambientales del territorio y la dinámica de los usos y ocupaciones del suelo. (Mendoza et al., 2021).

En el informe realizado por el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt del Monitoreo Comunitario de la Biodiversidad en los Montes de María, se propone un ciclo metodológico compuesto por ocho (8) actividades distribuidas en tres (3) fases: Planeación, Implementación y Evaluación y divulgación, para el desarrollo de estos ejercicios colaborativos. (Arce et al., 2020).

A nivel local, para la microcuenca del Río Frío, ubicada en el municipio de Floridablanca-Santander, se propone una metodología de Monitoreo Comunitario compuesta por cinco pasos fundamentales, orientada a la definición de una ruta estratégica para el monitoreo de la calidad del agua. Esta metodología busca la articulación de los actores interesados, promoviendo la gobernanza participativa del recurso y el fortalecimiento de las capacidades locales. (Gómez y Rueda, 2021)

Entre 2021 y 2022 se desarrolló un proceso de MCP de la biodiversidad en la Ciénaga San Silvestre, colaborativamente con la comunidad de Campo Gala; resultado de este ejercicio, se concluye la necesidad de integrar estrategias orientadas al fortalecimiento de la restauración

ecológica, la gestión adecuada de residuos industriales derivados de la actividad petrolera y la implementación de mecanismos de alertas temprana. (Martinez et al., 2023).

Generalmente los estudios sobre el MCP del agua se han enfocado en crear estrategias que permitan vincular a las comunidades y obtener su consentimiento para la implementación de proyectos en sus territorios. Sin embargo, estos enfoques no logran una participación totalmente articulada, ya que implica no solo consultar a las comunidades, sino también empoderarlas mediante procesos colaborativos duraderos que fortalezcan su participación en la toma de decisiones y su comprensión técnica sobre la gestión de los recursos hídricos. (Flórez et al., 2025)

La CDMB es la autoridad ambiental responsable del monitoreo del recurso hídrico según lo establecido en la Ley 99 de 1993, en 13 municipios del departamento de Santander y dentro de su área de influencia se encuentra la Unidad Hidrográfica del río Tona, para lo cual implementa campañas de monitoreo de cantidad y calidad del agua en periodo seco y húmedo. Sin embargo, esta labor no resulta suficiente frente a las necesidades del territorio, por lo que se hace necesario complementar su gestión con estrategias como el Monitoreo Participativo, que permita una mayor inclusión social y eficacia en la vigilancia del recurso.

El Informe anual del estado de los recursos naturales del 2023, realizado por la CDMB, reporta que para el caso particular del Río Tona se monitorean bianualmente en 3 puntos sobre su cauce principal, registrando clasificaciones para el Índice de Calidad del Agua en “regular” y para el Índice de Contaminación ICO’s como “alto” para el punto RT-02 ubicado después del casco urbano. Teniendo en cuenta lo anterior es importante priorizar el cuidado de esta importante Unidad Hidrográfica abastecedora del agua potable en el área metropolitana de Bucaramanga (CDMB, 2024a)

### **3. Diseño metodológico**

La metodología utilizada en el presente estudio se dividirá en tres fases, de acuerdo con los objetivos específicos planteados y estableciendo las actividades necesarias para el desarrollo de cada uno de ellos.

La investigación propuesta es de tipo mixto, ya que combina métodos cualitativos y cuantitativos para el desarrollo de la investigación. (Hernández y Fernandez, 2014).

#### **3.1 Fase 1. Evaluación de las actividades antrópicas en la UH del Río Tona**

Esta fase de la investigación, se establece la línea base de las actividades antrópicas que se desarrollan alrededor del río Toná, y evaluar el impacto de las más significativas en la UH.

##### ***3.1.1 Recopilación de la información***

Buscar y consultar información secundaria en artículos, estudios institucionales, tesis de grado, textos, bases de datos, páginas web, registros, datos de indicadores, censos, informes, etc.

Revisar la información publicada por la CDMB y AMB, relacionada al estado del Río Tona y sus aportantes.

Recolectar la información que se registra en la CDMB, relacionada a las concesiones del Río Tona y que incluyen el volumen concesionado y el uso aprobado.

##### ***3.1.2 Tabulación y análisis de la información***

Compilar la información disponible y generar una tabulación teniendo en cuenta las fuentes de información y bases de datos, con el fin de ser analizadas. Adicionalmente se debe establecer

los criterios para depurar la información recolectada y realizar el respectivo análisis de los usos más frecuentes del suelo y su ubicación.

### ***3.1.3 Evaluación de impactos ambientales por actividad antrópica***

La calificación del impacto ambiental por actividad antrópica se realizará por la metodología propuesta en 2024 por Corregidor et al. (2024), la cual consiste en usar una combinación de los métodos de Superposición de Transparencia, Leopold y Battelle-Columbus. La combinación propuesta, permite una evaluación ambiental más integral, dado que la superposición de mapas facilita la identificación visual de zonas sensibles dentro del territorio, la matriz de Leopold permite establecer relaciones claras entre las actividades del proyecto y los posibles efectos sobre el ambiente, lo cual ayuda a comprender mejor la naturaleza de los impactos y finalmente, el método Battelle-Columbus complementa con una valoración cuantitativa que permite medir la magnitud de dichos impactos. En decir, esta sinergia metodológica ofrece una evaluación más sólida y detallada, lo cual contribuye a una mejor toma de decisiones en la gestión ambiental.

## **3.2 Fase 2. Sistematizar la metodología del protocolo de Monitoreo Participativo (MP) de calidad y cantidad del agua en la jurisdicción de la CDMB, a partir de la estrategia piloto de gobernanza implementada en la Unidad Hidrográfica del Río Tona**

Con el fin de establecer la metodología del Protocolo de Monitoreo Participativo (MP) para la jurisdicción de CDMB, a partir de la experiencia piloto de gobernanza del recurso hídrico implementada en la Unidad Hidrográfica (UH) del río Tona, se proponen las siguientes actividades teniendo en cuenta los elementos comunes de los procesos colaborativos revisados:

### ***3.2.1 Revisión bibliográfica y análisis de antecedentes del MP en la UH del río Tona***

En esta etapa de revisión y análisis documental se realizan las siguientes acciones:

Recopilar documentos técnicos, informes, actas, acuerdos y registros relacionados con la estrategia piloto.

Identificar enfoques metodológicos, instrumentos utilizados, actores involucrados y resultados obtenidos.

### ***3.2.2 Caracterización de la experiencia piloto de MP en la UH del Río Tona***

Identificación de actores clave: Realizar un análisis detallado de actores, basado en la revisión de información proveniente de entidades gubernamentales y privadas. Este análisis considerará criterios como la ubicación geográfica, actividades productivas, relación con la UH, misionalidad institucional, y capacidad de generación de información técnica, entre otros.

Definición de roles y responsabilidades: Establecer de manera clara las funciones y responsabilidades de cada actor identificado, con el fin de garantizar una participación articulada y efectiva en el proceso de monitoreo.

Establecer el contexto ambiental de la UH del Río Tona, a partir de los datos de cantidad y calidad del agua disponibles en las redes de monitoreo de la CDMB.

Documentación de convenios interinstitucionales: Referenciar los convenios de cooperación existentes en la UH del río Tona, incluyendo su alcance, objetivos y compromisos asumidos por las partes involucradas.

Sistematizar las fases, procesos, actores, herramientas y metodologías utilizadas en la implementación del monitoreo.

**Tabla 2.** *Estrategia de Sistematización del MP en la UH del Río Tona*

<b>Elemento</b>	<b>Establecer</b>
-----------------	-------------------

Fases	Etapas cronológicas del proceso de MP
Procesos	Acciones y dinámicas dentro de cada fase
Actores	Participantes y sus roles
Herramientas	Instrumentos y recursos utilizados
Metodologías	Enfoques y métodos aplicados para el MP
Aprendizajes y desafíos	Indicadores y acciones de mejora

### ***3.2.3 Estructurar la metodología del protocolo de MP***

Se requiere ordenar, definir y articular los elementos que componen el Protocolo de Monitoreo Participativo. Los componentes para estructurar son los siguientes:

**Objetivos y Fases del Protocolo:** Se definen considerando el enfoque técnico y comunitario del MP, a partir del análisis de casos de estudio similares considerados en la fase de revisión y análisis documental.

**Actores, roles y responsabilidades:** Se establecen roles y responsabilidades en la recolección, análisis y seguimiento de los datos.

**Puntos y parámetros para monitorear:** El monitoreo ambiental involucra diferentes aspectos ambientales, sociales, técnicos, prácticos y económicos. Estos se articulan para establecer protocolos y planes de monitoreo, con el objetivo de realizar seguimiento y control a afectaciones ambientales, conservación de ecosistemas, planes de manejo ambiental, entre otros. (Revista Internacional de Ciências, 2024). Para este caso en particular se establecerán los diferentes factores ambientales y socioeconómicos. Los puntos se seleccionan teniendo en cuenta la evaluación de las actividades antrópicas, la identificación de los actores interesados en participar y los recursos disponibles.

**Instrumentos y herramientas para la implementación del MP:** con base en los puntos y parámetros a monitorear y la caracterización de los actores se selecciona los instrumentos y herramientas más adecuadas.

Frecuencia y temporalidad del MP: se establece una muestra significativa de un año típico desde el factor climatológico.

Mecanismos de reporte y uso de la información: para esta acción se debe considerar las fuentes de error, sesgo, control de datos, atípicos, variabilidad aceptable. (Villasís et al., 2018)

Estrategias de sostenibilidad: establecer mecanismos para la formalización institucional del plan de monitoreo y desarrollar estrategias de divulgación que promuevan su apropiación y sostenibilidad en el tiempo.

Validar su coherencia con los marcos normativos y técnicos de la normatividad vigente: teniendo en cuenta el marco normativo establecido anteriormente, se verifica el alineamiento con los instrumentos establecidos.

### ***3.2.4 Análisis de aplicabilidad y condiciones para la réplica en otros territorios de la CDMB***

Identificar elementos transferibles y condiciones específicas de replicabilidad.

Plantear lineamientos para su adaptación a otras Unidades hidrográficas de la jurisdicción.

**3.2.4.1 Criterios para selección de monitores comunitarios.** Para la implementación del monitoreo participativo en la Unidad Hidrográfica del río Tona, se definieron criterios específicos para la selección de los monitores comunitarios, con el propósito de garantizar la calidad de la información recolectada, la sostenibilidad del proceso y la replicabilidad del modelo en otros territorios de la jurisdicción de la CDMB. La estrategia no asume una comunidad homogénea, sino que define competencias mínimas técnico-operativas y socioambientales para garantizar la calidad del monitoreo participativo, estas incluyen habilidades básicas de medición, registro y comprensión del territorio. La selección del grupo se plantea mediante criterios de

representatividad territorial, permanencia y apropiación del recurso hídrico. En la Tabla 3 se presentan los criterios establecidos para la selección de los monitores comunitarios.

**Tabla 3.** *Criterios para selección de monitores comunitarios*

<b>Tipo de criterio</b>	<b>Descripción</b>
Técnico-operativo	Manejo básico de equipos y registro de datos
Socioambiental	Permanencia, conocimiento del territorio
Compromiso	Disponibilidad y participación
Territorial	Representatividad de puntos de monitoreo

**3.2.4.2 Proceso de capacitación para el monitoreo participativo.** El proceso de capacitación constituye un componente estructural dentro de la estrategia de monitoreo participativo, que permite garantizar la apropiación técnica y social del modelo por parte de la comunidad, así como la calidad y confiabilidad de la información generada. En este sentido, la capacitación no se concibe únicamente como un proceso de transferencia de conocimiento, sino como un mecanismo de fortalecimiento de capacidades locales orientado a la sostenibilidad del monitoreo y a la consolidación de la gobernanza del recurso hídrico.

Bajo esta visión, el proceso formativo se diseñó a partir de un esquema progresivo, teórico-práctico, que integra componentes conceptuales, operativos y de análisis, adaptados a las condiciones conceptuales, socioculturales y técnicas de la población participante; este se estructura en cuatro fases interrelacionadas: sensibilización, formación técnica, registro de información y validación básica de datos.

**3.2.4.2.1 Sensibilización y apropiación del monitoreo.** La fase inicial tiene como objetivo generar conciencia sobre la importancia del recurso hídrico y el papel del monitoreo participativo en los procesos de gobernanza del aguase abordan conceptos relacionados con la calidad del agua,

las principales presiones antrópicas presentes en la cuenca (vertimientos domésticos, actividades agropecuarias), y la relación entre el estado del recurso y el bienestar de la comunidad.

Asimismo, se introduce el concepto de monitoreo participativo como una herramienta de gestión comunitaria, destacando su potencial para incidir en la toma de decisiones y en la generación de información útil para la autoridad ambiental. Esta fase busca fortalecer el sentido de pertenencia y corresponsabilidad de los participantes frente al cuidado del recurso hídrico.

**3.2.4.2 Formación técnica-operativa.** En esta fase se desarrollan las competencias necesarias para la ejecución del monitoreo, mediante actividades prácticas orientadas al manejo de equipos y la correcta toma de muestras. Esto incluye la capacitación en el uso de sondas multiparamétricas para la medición de variables como pH, conductividad eléctrica, temperatura y sólidos disueltos totales, así como el uso de kits colorimétricos para la determinación de oxígeno disuelto, nutrientes y presencia de E. coli.

Adicionalmente, se instruye a los participantes en los procedimientos adecuados de muestreo, incluyendo la selección del punto de toma (preferiblemente en el centro del cauce y a media profundidad), la manipulación de los recipientes para evitar contaminación cruzada y la importancia de realizar mediciones in situ para parámetros sensibles como el oxígeno disuelto.

Esta fase prioriza metodologías de aprendizaje práctico, con el fin de asegurar la correcta apropiación de los procedimientos por parte de los monitores comunitarios.

**3.2.4.3 Registro y sistematización de los datos.** La tercera fase se orienta al fortalecimiento de las capacidades para el registro adecuado de la información generada durante el monitoreo. En este sentido, se capacita a los participantes en el uso de formatos estandarizados

que incluyen variables como fecha, hora, punto de monitoreo, condiciones climáticas y resultados de medición.

Se hace énfasis en la importancia de la consistencia y completitud del registro, así como en la trazabilidad de los datos, entendida como la posibilidad de reconstruir las condiciones bajo las cuales se realizó cada medición, este componente resulta fundamental para el posterior análisis técnico y validación de la información por parte de la autoridad ambiental.

**3.2.4.4 Validación básica y lectura de resultados.** En la fase final se introducen conceptos básicos para la interpretación de los resultados, permitiendo a los participantes identificar comportamientos atípicos y comprender las implicaciones de los valores obtenidos con nociones sencillas de análisis de datos, como la identificación de valores fuera de rangos esperados y la comparación entre puntos de monitoreo.

De manera complementaria, se socializa el proceso de validación técnica que realiza la autoridad ambiental, incluyendo la aplicación de criterios como rangos operativos de los equipos y métodos estadísticos (por ejemplo, el uso del rango intercuartílico – IQR para la detección de valores atípicos).

Esta fase busca que la comunidad no solo genere datos, sino que desarrolle una comprensión básica de su significado, fortaleciendo su capacidad para participar activamente en procesos de toma de decisiones y en la activación de alertas tempranas.

En conjunto, el proceso de capacitación permite consolidar un modelo de monitoreo participativo basado en la corresponsabilidad entre comunidad y autoridad ambiental, donde la generación de información se sustenta en capacidades locales fortalecidas y en un acompañamiento técnico institucional.

Este enfoque por fases contribuye no solo a la calidad y validez del dato, sino también a la sostenibilidad del sistema y a su potencial de replicabilidad en otros territorios.

### **3.3 Fase 3. Definición de parámetros para la implementación de un sistema de alertas tempranas**

#### ***3.3.1 Validación de los datos del monitoreo participativo***

Validar los datos tomados del monitoreo participativo, con el fin de depurar los datos atípicos, que puedan afectar el análisis de los valores obtenidos.

Comparar los datos obtenidos por medio de parámetros estadísticos del monitoreo participativo con los tomados en las campañas de monitoreo por laboratorios acreditados ante el IDEAM, con el fin de establecer tendencias a partir de los máximos, mínimos, dispersión, etc.

Analizar los resultados obtenidos, con base en lo reportado en los informes del estado de los recursos naturales.

#### ***3.3.2 Análisis estadístico que permita establecer tendencias de los datos para cada parámetro medido.***

Desarrollar un análisis individual por parámetro, aplicando estadística descriptiva que permite, a través de tablas y gráficas, resumir y presentar el comportamiento de estos, y así realizar proyecciones y determinar tendencias.

Construir el análisis diferencial de la calidad y cantidad del agua para la corriente mencionada en el estudio, como referencia se tendrá en cuenta lo publicado por Gómez Miranda, Ingrid Natalia; Peñuela Mesa, Gustavo Antonio en su artículo de 2016, que explora los métodos

para el análisis estadístico multivariado de calidad del agua. (Gómez Miranda y Peñuela Mesa, 2016)

Establecer los criterios por parámetro que indiquen una posible afectación de la UH, con base en los datos procesados estadísticamente, a través de análisis de regresión.

### ***3.3.3 Identificación de causas de reducción de caudal y calidad de recurso hídrico***

Realizar con los datos procesados una revisión bibliográfica con el fin de identificar estudios similares y resultados que permitan realizar un análisis más nutrido del estado de la calidad y cantidad del agua.

### ***3.3.4 Selección de criterios para implementar un sistema de alertas tempranas en términos de calidad y cantidad del agua***

Revisión bibliográfica de los métodos y modelos usados para la implementación de un sistema de alertas tempranas.

Seleccionar el modelo y los parámetros iniciales más adecuados, a tener en cuenta para definir un sistema de alertas tempranas en términos de calidad y cantidad del agua, en la UH del Río Tona.

Finalmente, se elabora el documento que recopile toda la información de las etapas anteriores y las conclusiones establecidas para este estudio, que corresponde a la ruta estratégica del monitoreo participativo en la Unidad Hidrográfica del Río Tona, reproducible en la jurisdicción de la CDMB, para el fortalecimiento de la gobernanza del río y su territorio.

#### **4. Análisis y resultados**

El presente apartado expone los principales análisis y resultados obtenidos a partir del proceso de monitoreo participativo desarrollado en la Unidad Hidrográfica del Río Tona, integrando tanto la validación técnica de los datos como la interpretación estadística necesaria para identificar tendencias y variaciones en los parámetros de cantidad y calidad del agua y a partir del tratamiento de la información recolectada por las comunidades y contrastada con campañas realizadas por laboratorios acreditados ante el IDEAM, se construyen lineamientos sólidos para la definición de umbrales, patrones temporales y posibles condiciones de alerta. Estos resultados permiten comprender con mayor precisión el comportamiento hidrológico y fisicoquímico del río, y constituyen la base técnica para avanzar hacia la estructuración del sistema de alertas tempranas orientado al fortalecimiento de la gobernanza del agua en el territorio.

#### **4.1 Evaluación de las actividades antrópicas en la UH del Río Tona**

##### ***4.1.1 Recopilación de la información***

La evaluación, control y seguimiento de los recursos naturales, garantiza una gestión adecuada de los mismos, por tanto, es de gran importancia establecer las actividades que usan y/o aprovechan los recursos naturales que establecen determinantes en la interacción de las poblaciones con su entorno.

En la región se han realizado algunos estudios relacionados a determinar el impacto de actividades antrópicas sobre el recurso hídrico, pero en su mayoría como eje central está la minería en el Río Surata. Por ejemplo, en el análisis del recurso hídrico en la Subcuenca del río Suratá, los investigadores mencionan que "la manera en la cual son realizadas las actividades de extracción

de este servicio ecosistémico debe ser reguladas y encaminadas hacia procesos sostenibles" (Prada y Villamizar, 2012).

El Río Tona, se clasifica dentro del ordenamiento hídrico como una microcuenca nivel III, perteneciente a la subcuenca del Suratá y la Cuenca del Lebrija Alto. (CDMB, 2019).

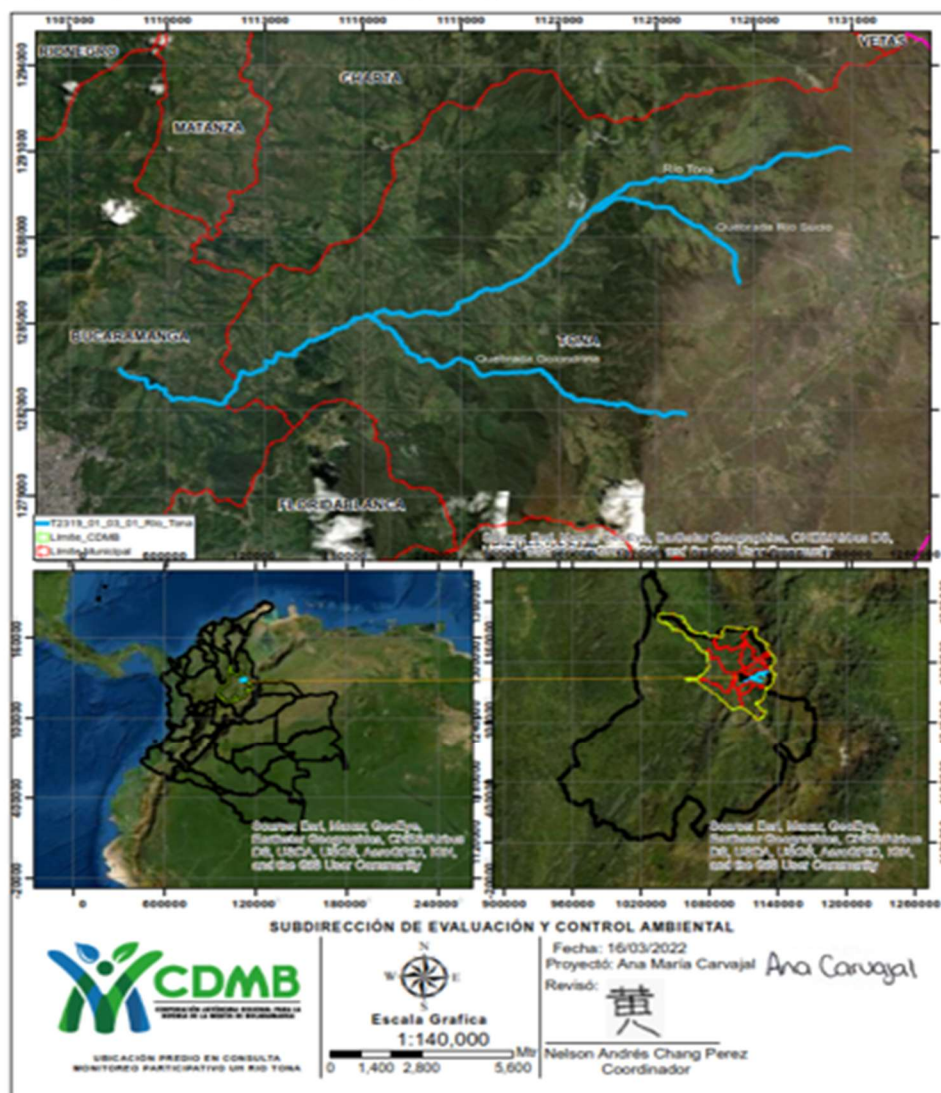
En estudios previos de la regulación hídrica del río Tona y su aprovechamiento, se han desarrollado modelos que permiten simular el comportamiento del embalse que se abastece de esta fuente hídrica, ante diferentes escenarios. En 2017, Salas y Manrique construyeron un modelo de balance hídrico diario usando datos de precipitación, evaporación y escorrentía superficial, con el cual pudieron evaluar la respuesta del embalse durante posibles fenómenos del niño; adicionalmente los autores resaltaron la importancia de contar con datos hidrológicos de calidad del agua, para la toma de decisiones sobre el abastecimiento de agua. (Salas Neira y Manrique Rios, 2017).

Según la revisión de los informes del estado de los recursos naturales de la CDMB, de los últimos años la calidad del agua en los puntos de monitoreo sobre la Unidad hidrográfica del Río Tona, se clasifica a partir del Índice de Calidad del agua calculado para Colombia, como "Aceptable". Los parámetros con los cuales se calcula el mencionado índice ICA son: oxígeno disuelto, sólidos en suspensión, demanda química de oxígeno, conductividad eléctrica, relación N total / P total, pH, coliformes fecales. (CDMB, 2024a).

Es importante mencionar, que, para efectos de la presente estrategia de monitoreo participativo, se ha definido trabajar específicamente en el tramo de la Unidad Hidrográfica del río Tona que recorre el municipio de Tona, ya que es allí donde se conservan importantes ecosistemas de regulación hídrica y donde se han venido desarrollando procesos comunitarios previos. Aunque el río Tona también atraviesa otros municipios como Girón, Floridablanca y Bucaramanga, se

considera significativo enfocar el análisis en el área bajo jurisdicción del municipio de Tona, lo que permitirá una mayor articulación con los diferentes actores locales y facilitará la implementación operativa de la estrategia participativa en campo. Adicionalmente, este tramo contiene nacimientos y zonas de recarga que tienen una alta importancia para el abastecimiento hídrico regional. (Carrillo, 2018b).

**Figura 1.** Eje principal UH del Rio Tona y principales afluentes.



Adaptado de CDMB

El municipio de Tona cuenta con una extensión aproximada de 35.000 hectáreas, de las cuales una parte significativa ha sido clasificada como suelo de protección, especialmente en las zonas de páramo y áreas abastecedoras de agua, según el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT), el suelo del municipio se divide en suelo urbano, rural, de expansión urbana y de protección ambiental, este último con fuerte presencia en la cuenca alta del río Tona y en los márgenes de la quebrada Arenales y río Jordán. En términos de uso del suelo, más del 30% del territorio está reservado para funciones de conservación, reguladas por normativa ambiental nacional (delimitaciones de ecosistemas estratégicos) y acuerdos locales de manejo.

Las principales actividades económicas son de tipo agropecuario, y están fuertemente influenciadas por la dinámica ecosistémica del territorio, ya que la mayoría de la población vive en áreas rurales, muchas de ellas directamente vinculadas a ecosistemas estratégicos como el Páramo de Santurbán, el cual cumple funciones fundamentales de regulación hídrica para el municipio y para el sistema regional de abastecimiento de agua de Bucaramanga. (Alcaldía Municipal de Tona, 2003). Es importante mencionar que el EOT, del municipio no ha sido actualizado desde el año 2003.

Actualmente, el territorio de Tona presenta una complejidad ambiental y social que incide directamente sobre el recurso hídrico, debido a que gran parte de sus suelos están ubicados en zonas de páramo o amortiguación del mismo, donde el uso del suelo para actividades agropecuarias intensivas no siempre es compatible con la conservación del agua. El Plan de Desarrollo Municipal de Tona “*Amor Por El Campo, Pasión Por Mi Gente 2024-2027*”, reconoce que uno de los mayores desafíos es lograr una articulación adecuada entre la producción agrícola tradicional, el manejo sostenible del territorio y la necesidad de proteger las fuentes abastecedoras del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga y de los centros poblados del municipio (Acueductos Veredales).

Se identifica en el mencionado plan, que la mayoría de la población (más del 88%) vive en zonas rurales, lo que refuerza la presión sobre ecosistemas estratégicos como las microcuencas de Pitones y Guarumales, el municipio tiene una ubicación geoestratégica en la provincia de Soto Norte y Metropolitana, siendo zona de captación hídrica para otras jurisdicciones, lo que aumenta su importancia geopolítica pero también genera tensiones por el uso compartido del agua y los efectos de este uso en las zonas altas de la unidad hidrográfica, lo cual hace urgente una planificación que concilie la producción rural con la protección de los ecosistemas, promoviendo el manejo colectivo y responsable del agua. (Alcaldía Municipal de Tona, 2024).

El municipio de Tona tiene una economía basada principalmente en el sector agropecuario, donde se destacan cultivos como la cebolla junca y el café, es el segundo productor nacional de cebolla junca, esta actividad se concentra en zonas frías y de alta montaña, lo que permite condiciones óptimas para su desarrollo, aunque también se enfrenta a problemas como los usos condicionados del suelo y el conflicto social por el uso. Por otro lado, el cultivo del café ocupa una fracción considerable del territorio en zonas medias y bajas de la microcuenca, y genera empleos rurales, tanto calificados como informales. Además de la agricultura, en Tona también se practica la ganadería como una actividad tradicional, sobre todo en veredas con suelos más aptos para pastos como el Gramal, principalmente de ganadería de leche, aunque también se cría ganado para carne en menor proporción y también en menor representatividad se realizan actividades de cría de cerdos, caprinos y ovinos. El Plan de Desarrollo indica que muchos productores aún mantienen prácticas extensivas, con poca asistencia técnica y un uso limitado de tecnologías para el manejo de potreros, lo que ha generado afectaciones sobre fuentes hídricas por el ingreso del ganado a las quebradas. Aunque estas actividades representan una fuente importante de ingresos para varias familias rurales, también se reconoce la necesidad de mejorar los sistemas productivos

para que sean más sostenibles y compatibles con la conservación del agua y el suelo, teniendo en cuenta que tienen una relevancia significativa en la economía local.

Además, en los últimos años el municipio ha venido fortaleciendo el turismo rural como estrategia complementaria, aprovechando sus paisajes de páramo, tradiciones y proximidad al área metropolitana de Bucaramanga, Lo anterior genera una nueva presión sobre la oferta hídrica ya que esta actividad requiere grandes volúmenes de agua para prestar los servicios de alojamiento, zonas húmedas y preparación de alimentos.

#### ***4.1.2 Tabulación y análisis de la información***

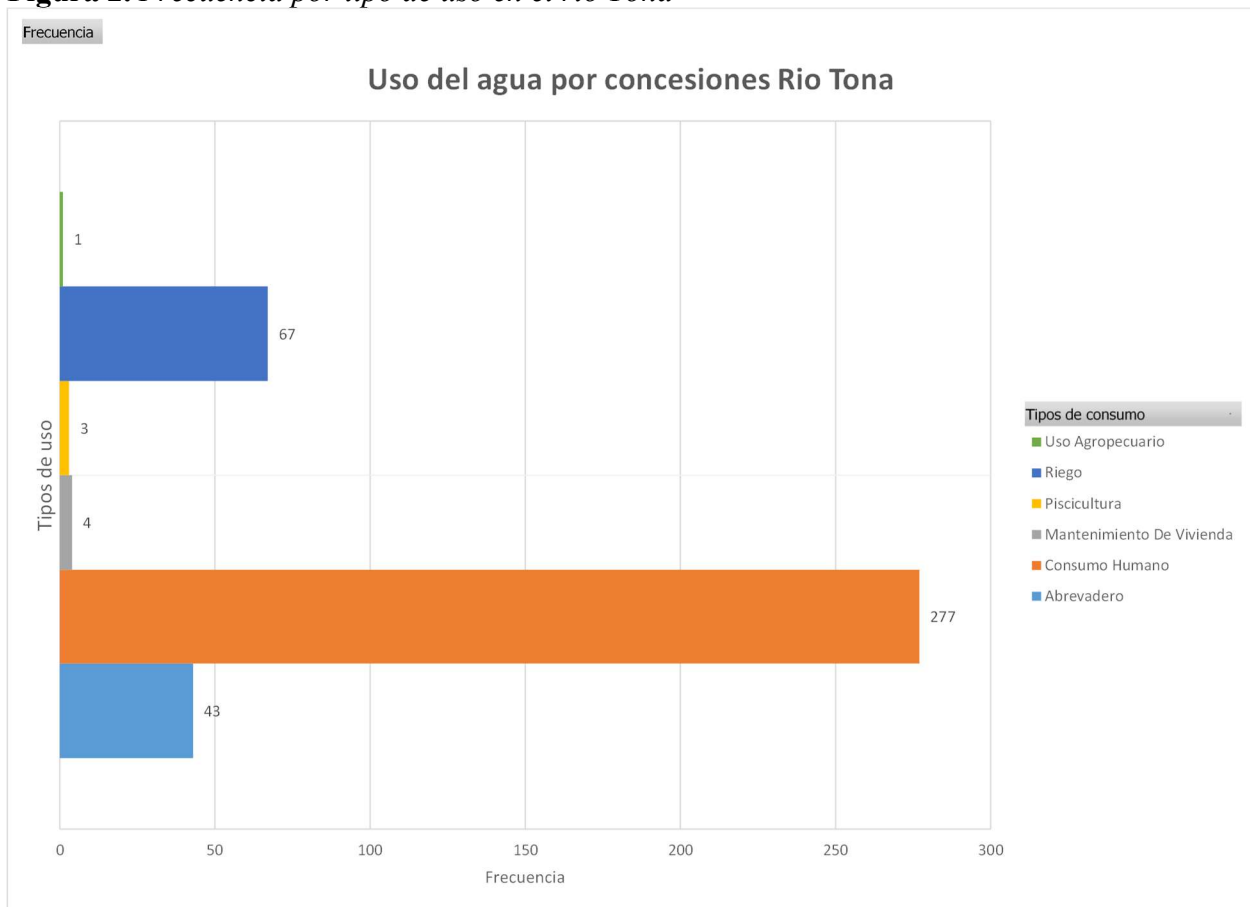
Se consultó el Sistema de Normatización Ambiental de la CDMB, y se generó el listado de concesiones sobre el Rio Tona, registrando un total de 395 concesiones de agua. A partir de la base de datos procesada, se analizaron las concesiones otorgadas en función de dos criterios principales:

Frecuencia: Número de concesiones registradas por tipo de uso. En la Tabla 4 y Figura 2, se presentan los datos del análisis por frecuencia.

**Tabla 4.** *Tipos de uso del recurso por concesiones de agua en el Rio Tona*

<b>Tipo de uso</b>	<b>Cuenta de Tipos de consumo</b>
Abrevadero	43
Consumo Humano	277
Mantenimiento De Vivienda	4
Piscicultura	3
Riego	67
Uso Agropecuario	1
<b>Total general</b>	<b>395</b>

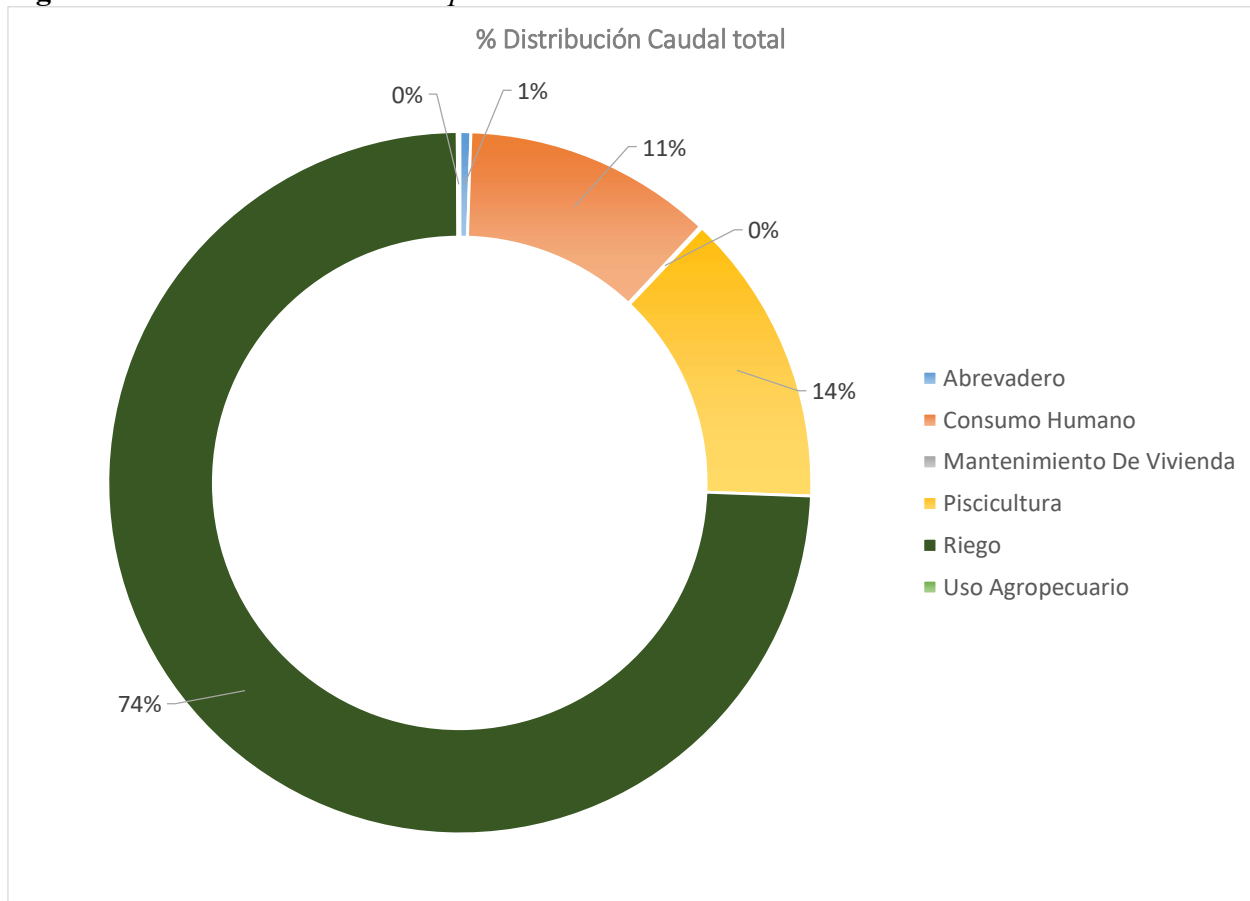
**Figura 2.** Frecuencia por tipo de uso en el rio Tona



Volumen total asignado: Suma del caudal en litros por segundo (l/s) concedido para cada uso, en la Tabla 5 y Figura 3 se muestra el análisis desarrollado.

**Tabla 5.** Caudal total y Distribución de caudal por uso en Rio Tona

Tipo de Uso	Suma de Caudal asignado l/s	% Distribución Caudal total
Abrevadero	0,2325	0,50
Consumo Humano	5,3466	11,49
Mantenimiento De Vivienda	0,0392	0,08
Piscicultura	6,2992	13,53
Riego	34,5721	74,27
Uso Agropecuario	0,0579	0,12
<b>Total, general</b>	<b>46,5475</b>	<b>100</b>

**Figura 3.** *Distribución del caudal por uso en e Rio Tona*

El procesamiento de los datos de las concesiones de agua registradas en la CDMB en el del Río Tona, muestra estándares diferenciados tanto en la frecuencia como en el volumen asignado a distintos usos, a continuación, se presenta los hallazgos más importantes del análisis.

Usos más frecuentes: los usos con mayor número de concesiones corresponden a actividades esenciales o comunitarias. Esto puede incluir:

Consumo doméstico o humano, que suele tener muchas concesiones, pero con volúmenes bajos.

Uso agropecuario a pequeña escala, donde múltiples usuarios solicitan concesiones para parcelas agrícolas y abrevaderos para sistemas productivos de subsistencia con volúmenes bajos.

Usos con mayor volumen asignado: Aunque algunos usos tienen pocas concesiones, tienen una alta representatividad del volumen total de agua asignado. Esto ocurre típicamente en:

Riego agrícola extensivo o cultivos de café, donde un solo usuario puede requerir grandes volúmenes.

Relación frecuencia-volumen: Al comparar la frecuencia de concesiones con el volumen total asignado, se pueden identificar usos eficientes (alta frecuencia y bajo volumen, como consumo humano) y usos intensivos (baja frecuencia y alto volumen, como riego).

La comparación entre la frecuencia de concesiones y el caudal total asignado permite observar cómo se distribuye el recurso hídrico entre los diferentes usos en el Río Tona, el consumo humano es el tipo de uso más frecuente, con 277 concesiones registradas, lo cual representa cerca del 70 % del total de solicitudes, sin embargo este uso solo representa el 11,49 % del volumen de caudal asignado; esto sugiere que, aunque muchas personas acceden al recurso para fines domésticos, los volúmenes son bajos por usuario. Por otro lado, el riego solo tiene 67 concesiones, pero recibe el 74,27 % del caudal total, lo cual evidencia un uso intensivo del agua con pocas concesiones. La piscicultura también refleja esta misma tendencia, ya que con solo 3 concesiones alcanza un 13,53 % del volumen. Es importante mencionar que, usos como el abrevadero, el mantenimiento de vivienda y el uso agropecuario muestran tanto baja frecuencia como caudales reducidos.

Los resultados dejan ver que los usos comunitarios dominan en número de solicitudes, pero no en cantidad de agua captada, mientras que los usos productivos concentran los mayores volúmenes en pocos usuarios, esto plantea retos importantes para una gestión más equitativa y sostenible del recurso hídrico en el Río Tona, especialmente considerando las necesidades básicas de la población y el equilibrio con las actividades económicas. Así como también la formulación

de políticas de manejo sostenible, priorizar las actividades de vigilancia y control en los usos más intensivos y evaluar los riesgos de la sobreexplotación del recurso hídrico en la unidad hidrográfica.

#### ***4.1.3 Evaluación de impactos ambientales por actividad antrópica***

La metodología compuesta propuesta por Corregidor Fonseca (2024) integra elementos de la matriz de Leopold, la Superposición de Transparencias y el método Battelle-Columbus, permitiendo una valoración multicriterio de los impactos ambientales a partir de variables físico-bióticas, socioculturales y económico-productivas, este enfoque se adapta a contextos rurales de alta montaña, en territorios con dinámicas complejas y fragmentadas como la Unidad Hidrográfica del río Tona.

**4.1.3.1 Delimitación del área y componentes analizados.** El análisis se centró en las microcuencas de Río Tona, así como las quebradas Golondrinas, Aranía y Ojo de Agua, estas áreas coinciden con las zonas de captación de agua, presencia de concesiones para uso agrícola y humano, y puntos identificados por la comunidad dentro de la red de monitoreo participativo.

**4.1.3.2 Actividades identificadas y fuentes de presión.** Con base en la revisión de los Planes de Desarrollo Municipal de Tona, el inventario de concesiones otorgadas por la CDMB, las

coberturas de uso del suelo 2022-2023, y el análisis socioeconómico de la información recolectada, se identificaron las siguientes actividades con potencial impacto ambiental:

**Tabla 6.** *Actividades identificadas y las posibles fuentes de presión*

<b>Actividad</b>	<b>Fuente de presión ambiental</b>
Cultivo intensivo de papa, cebolla y hortalizas	Cambio de uso del suelo, remoción de cobertura vegetal, compactación del suelo, sobreuso del recurso hídrico en zonas de recarga hídrica.
Uso de fertilizantes y agroquímicos	Contaminación del recurso hídrico, alteración de la calidad del suelo, toxicidad para fauna y flora.
Ganadería extensiva y semi-intensiva	Erosión del suelo, degradación de pastos naturales, contaminación por excretas, compactación de suelos.
Piscicultura artesanal y de estanque	Aporte de nutrientes y residuos orgánicos a cuerpos de agua, introducción de especies exóticas o modificadas, consumo de agua y represamiento y alteración de los cauces.
Turismo rural y glamping sin control ambiental	Fragmentación del paisaje, aumento de residuos sólidos y aguas residuales, perturbación de corredores biológicos de fauna y deforestación.
Construcción y mantenimiento de vías terciarias	Sedimentación de fuentes hídricas, deforestación, erosión acelerada, aumento de accesibilidad a zonas sensibles.
Captaciones de agua autorizadas y no autorizadas	Reducción de caudales ecológicos, presión sobre fuentes hídricas, disminución de disponibilidad para otros usos.
Construcción de infraestructura civil	Sellamiento de suelos, pérdida de hábitats, aumento del escurrimiento superficial, presión urbanística.
Vertimientos domésticos sin tratamiento	Contaminación puntual del recurso hídrico, proliferación de vectores, afectación de la salud pública.
Disposición inadecuada de residuos sólidos	Contaminación de cuerpos de agua y suelos, afectación paisajística, proliferación de fauna sinantrópica.
Quemas de residuos agrícolas	Emisión de material particulado y gases contaminantes, pérdida de materia orgánica del suelo, riesgo de incendios forestales.
Uso recreativo de cuerpos de agua	Aporte de contaminantes a la fuente hídrica por interacción con población móvil y residuos, compactación de orillas, encausamiento y perturbación de hábitats acuáticos.

**4.1.3.3 Aplicación de la metodología compuesta.** Se procedió a aplicar la metodología compuesta en tres etapas:

**4.1.3.3.1 Matriz causa-efecto (basada en Leopold adaptada).** Se identificaron 12 actividades versus 10 componentes ambientales, evaluando intensidad, extensión, duración y reversibilidad. Se otorgó una valoración cualitativa (alta, media, baja) según la interacción con su valor numérico correspondiente (3, 2, 1) respectivamente.

**Tabla 7. Matriz de Valoración de Leopold**

Actividad / Componente	Recurso hídrico	Vegetación	Fauna	Suelo	Paisaje	Calidad de vida	Riesgo	Servicios ecosistémicos	Gobernanza	Agua potable
Cultivo intensivo de papa, cebolla y hortalizas	Alta (3)	Alta (3)	Media (2)	Alta (3)	Media (2)	Media (2)	Alta (3)	Alta (3)	Media (2)	Alta (3)
Uso de fertilizantes y agroquímicos	Alta (3)	Alta (3)	Media (2)	Alta (3)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Alta (3)	Baja (1)	Alta (3)
Ganadería extensiva y semi-intensiva	Media (2)	Alta (3)	Media (2)	Alta (3)	Alta (3)	Media (2)	Media (2)	Alta (3)	Baja (1)	Media (2)
Piscicultura artesanal y de estanque	Media (2)	Media (2)	Alta (3)	Media (2)	Baja (1)	Media (2)	Baja (1)	Media (2)	Baja (1)	Media (2)
Turismo rural y glamping sin control ambiental	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Alta (3)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Baja (1)	Media (2)
Construcción y mantenimiento de vías terciarias	Media (2)	Media (2)	Baja (1)	Alta (3)	Alta (3)	Media (2)	Alta (3)	Media (2)	Media (2)	Media (2)
Captaciones de agua autorizadas y no autorizadas	Alta (3)	Media (2)	Baja (1)	Media (2)	Baja (1)	Media (2)	Baja (1)	Alta (3)	Media (2)	Alta (3)
Construcción de infraestructura civil	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Alta (3)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)
Vertimientos domésticos sin tratamiento	Alta (3)	Baja (1)	Alta (3)	Media (2)	Media (2)	Alta (3)	Alta (3)	Alta (3)	Baja (1)	Alta (3)
Disposición inadecuada de residuos sólidos	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Alta (3)	Media (2)	Media (2)	Baja (1)	Media (2)
Quemas de residuos agrícolas	Media (2)	Alta (3)	Media (2)	Media (2)	Alta (3)	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Baja (1)	Media (2)
Uso recreativo de cuerpos de agua	Media (2)	Media (2)	Media (2)	Baja (1)	Media (2)	Media (2)	Baja (1)	Media (2)	Baja (1)	Media (2)

**4.1.3.3.2 Superposición de transparencias.** Se elaboraron mapas temáticos (ver apéndices) sobre: cobertura vegetal, áreas de recarga, pendientes, y presencia de actividades humanas. La superposición de estos planos en SIG permitió identificar zonas de conflicto ambiental (zonas rojas) y de oportunidad (zonas verdes). Se destacan:

Alto impacto en las veredas Tobal, Angelinos, Mortiño y parte de La Corcova.

Zonas con posibilidad de restauración y protección en Golondrinas y nacimientos de Arnanía.

**4.1.3.3.3 Evaluación ponderada (modelo Battelle-Columbus adaptado).** Se asignaron pesos relativos a los componentes analizados, priorizando el recurso hídrico (30%), uso del suelo (20%) y biodiversidad (15%). Se calculó un índice de impacto ambiental compuesto (IAC) para cada microcuenca, y en la Tabla 8 se muestran los resultados por tramo.

**Tabla 8.** Valoración por tramos metodología Battle -Columbus

Tramo	IAC	Clasificación del impacto
Río Tona 1	78	Alto
Río Tona 2	65	Medio-alto
Río Tona 3	52	Medio
Río Tona 4	48	Medio-bajo
Río Tona 5	42	Bajo

La valoración integrada evidencia bajo la mencionada metodología que: Las zonas más impactadas coinciden con áreas agrícolas de alta pendiente, concentración de vertimientos y concesiones múltiples y en contraste las zonas menos afectadas se ubican en áreas de bosque conservado y en nacimientos protegidos por la comunidad.

En general existe una correlación directa entre actividades intensivas, desorden territorial y presión sobre el recurso hídrico. Además, la percepción comunitaria recogida en talleres

participativos de socialización de las estrategias de monitoreo participativo coincide con los resultados técnicos: preocupación por disminución de caudales, contaminación de fuentes y pérdida de vegetación nativa.

#### **4.2 Sistematizar la metodología del protocolo de Monitoreo Participativo (MP) de calidad y cantidad del agua en la jurisdicción de la CDMB, a partir de la estrategia piloto de gobernanza implementada en la Unidad Hidrográfica del Río Tona.**

La revisión documental de casos similares de monitoreo participativo del agua se abordó desde una perspectiva internacional, nacional y local, con el fin de analizar los diferentes enfoques metodológicos y contextuales que han sido aplicados en diversas regiones del mundo, así como su grado de éxito y replicabilidad. A continuación, se mencionan los casos que se consideran relevantes para el presente estudio.

En el contexto internacional, en México, Perevochtchikova et al. (2016) analizaron una experiencia de monitoreo comunitario del agua en la zona de Ajusco, donde se formaron y certificaron monitores comunitarios en la toma de parámetros fisicoquímicos. El caso destaca por su continuidad y como motivo a otras comunidades para replicar la experiencia, y también presenta los desafíos de estos procesos como la sostenibilidad financiera y la necesidad de acompañamiento técnico constante.

Otro caso importante es el desarrollado por Muhamad Khair et al. (2021), quienes examinan múltiples experiencias de ciencia ciudadana para el monitoreo hídrico, encontrando que en regiones de Europa y Asia la participación de la comunidad en el muestreo, el análisis de datos y el uso de resultados fortalece la confianza entre comunidades e instituciones técnicas, es decir la

recopilación de datos de manera colaborativa no solo permite mejorar la cobertura en el territorio de los monitoreos, sino que también genera conciencia colectiva sobre el estado del agua.

El trabajo de Iribarne y Lavaggi (2021) quienes presentan una propuesta metodológica para el monitoreo participativo del agua en el noreste de Uruguay, donde se resalta los aportes de la comunidad local en la recopilación de datos y la toma de decisiones, exaltando la importancia de adaptar los protocolos de monitoreo según las características del territorio. A nivel metodológico, este caso se basa en el uso de indicadores locales y la capacitación comunitaria como pilares para una gobernanza más efectiva del recurso hídrico, según los autores, “el proceso de participación debe ser constante, no solo consultivo, sino también deliberativo”. (Iribarne y Lavaggi, 2021)

Domínguez-Rendón et al. (2024) aplicaron una revisión sistemática de experiencias a nivel internacional de monitoreo ciudadano de la calidad del agua, identificando como principal resultado el fortalecimiento de las capacidades de asociación en comunidades rurales en países en desarrollo. En estos contextos, la creación y consolidación de comités de agua ha sido una estrategia común para promover la gestión participativa del recurso hídrico, estos logran estructurarse con base en alianzas entre comunidades locales, organizaciones no gubernamentales, instituciones académicas y autoridades ambientales, lo que facilita la apropiación social del proceso de monitoreo y mejora la capacidad de respuesta ante problemáticas ambientales. Este estudio, también identifican barreras, como la escasa validación oficial de los datos generados por los actores comunitarios y la ausencia de mecanismos institucionales que garanticen la sostenibilidad financiera y técnica de estos procesos.

En el plano nacional, el Instituto Humboldt (Arce et al., 2020) implementó un ciclo metodológico para el monitoreo comunitario de la biodiversidad en los Montes de María, que incluye fases de planeación, implementación, evaluación y divulgación, y aunque no se enfoca

exclusivamente en agua, este modelo ofrece elementos útiles para estructurar programas participativos en Colombia.

La experiencia del proyecto Mojana Clima y Vida, documentada por Herrera (2020), incluyó monitoreo participativo con bioindicadores para evaluar acciones de restauración ecológica y destacó el componente comunitario como clave para entender las dinámicas del ecosistema y evaluar el cumplimiento de metas ambientales.

A nivel local, el estudio de Gómez y Rueda (2021) en la microcuenca del Río Frío (Floridablanca, Santander), propone una hoja de ruta metodológica para el monitoreo comunitario de microcuencas, centrada en cinco pasos fundamentales; esta propuesta promueve la articulación de los actores locales e institucionales y resalta la importancia de una gobernanza participativa y el fortalecimiento de capacidades técnicas en el territorio.

En síntesis, los casos revisados permiten identificar elementos comunes para la estructuración de los procesos participativo de monitoreo como la necesidad de formación técnica básica, herramientas de bajo costo, mecanismos de socialización de resultados, importancia de la participación de los actores en toma de decisiones y compromiso institucional. No obstante, también se evidencian limitaciones como la resistencia a los datos generados por la comunidad, la dependencia de financiamiento externo, aspectos que deben ser considerados en la estructuración del protocolo para la UH del Río Tona.

#### ***4.2.1 Objetivo general***

Realizar el monitoreo de la calidad de agua del Río Tona promoviendo la participación social de la comunidad para mejorar la gobernanza en la Unidad Hidrográfica del río Tona.

#### ***4.2.2 Objetivos específicos***

Capacitar a la comunidad de la Unidad Hidrográfica del río Tona en monitoreo participativo de calidad de agua.

Suministrar a la comunidad los equipos y elementos necesarios para el monitoreo participativo de calidad de agua.

Recolección de datos en campo de la calidad y cantidad de agua del río Tona.

Reconocer la importancia del control y vigilancia de la calidad del agua, las alertas tempranas y su relación con las respuestas oportunas.

Establecer una base de datos trazable de la cantidad y calidad del agua para la toma de decisiones.

#### ***4.2.3 Justificación***

La implementación del monitoreo participativo en la calidad del agua representa una estrategia clave para fomentar la colaboración entre diversos actores sociales en la gestión de los recursos hídricos, este enfoque busca no solo recolectar información útil sobre la calidad y cantidad del agua, sino también propiciar el empoderamiento comunitario, la construcción de confianza y la resolución de conflictos derivados de las actividades humanas que alteran el estado del recurso. Adicionalmente, al involucrar a diferentes sectores en todas las fases del monitoreo permite aplicar métodos e indicadores que sean significativos para cada grupo, fortaleciendo así la apropiación y el compromiso con la conservación del recurso.

En este contexto, el monitoreo del agua cobra relevancia porque permite obtener datos técnicos que ayudan a determinar si el recurso cumple con los requerimientos para sus distintos usos, y si la cantidad disponible resulta suficiente, y esta información posibilita educar a los actores

locales y evaluar los efectos que generan las prácticas humanas, así como también verificar la efectividad de las medidas correctivas adoptadas, es decir para este caso específico del río Tona, uno de los afluentes principales que alimenta el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, la CDMB ha establecido puntos estratégicos de monitoreo, con el fin de identificar zonas críticas, fuentes de contaminación y actividades humanas que puedan estar comprometiendo su integridad.

Desde el mes de agosto del 2022, se ha venido desarrollando un proceso participativo de toma de muestras y medición de caudales, en donde los actores sociales han jugado un rol importante, este ejercicio busca reconocer amenazas potenciales, fluctuaciones en la disponibilidad hídrica y niveles de contaminación. Se espera que los datos recolectados sean posteriormente interpretados por profesionales en áreas como ingeniería ambiental, química, biología y otras disciplinas afines. Toda esta información se convierte en una herramienta muy valiosa para orientar decisiones, implementar correctivos y establecer un plan de manejo integral que articule tanto el ecosistema como las comunidades que habitan en la Unidad Hidrográfica del río Tona.

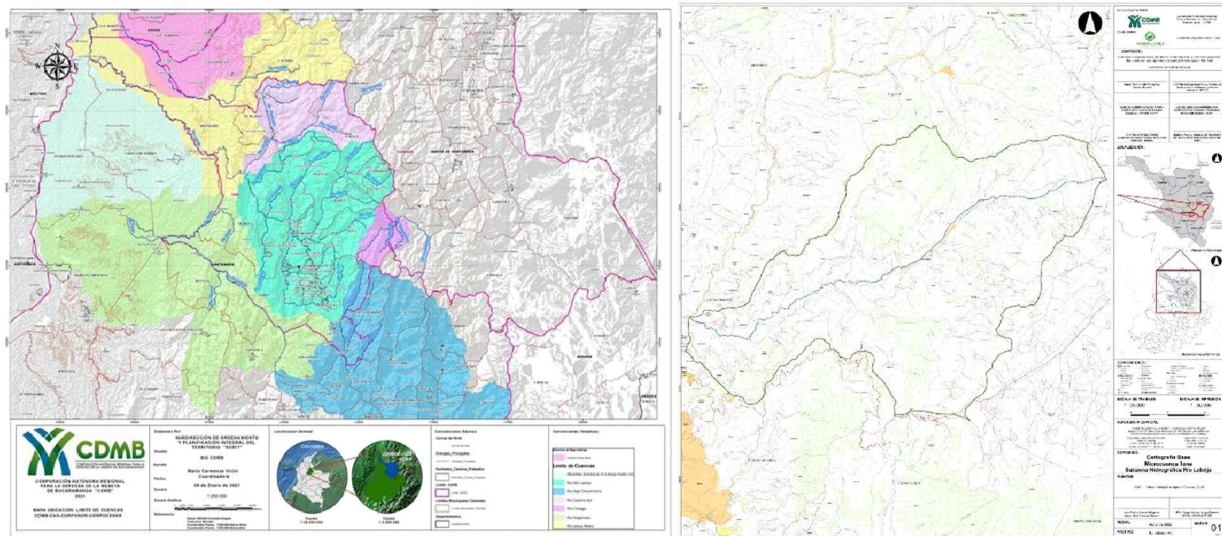
#### ***4.2.4 Área de estudio del monitoreo participativo del río Tona***

La identificación precisa del área de estudio resulta fundamental para entender el contexto territorial y ambiental en el que se desarrollan los procesos de planificación y gestión del recurso hídrico. En este sentido, la cuenca del río Lebrija constituye un territorio estratégico que se extiende a lo largo de los departamentos de Santander, Norte de Santander y Cesar, con una extensión de 9.640,1 km<sup>2</sup>, es importante mencionar que esta cuenca se encuentra bajo la jurisdicción de varias Corporaciones Autónomas Regionales, tales como la CAS, la CDMB,

CORPONOR y CORPOCESAR, lo que hace necesaria una articulación institucional que garantice una gestión integral y coordinada del recurso agua.

Desde el punto de vista hidrográfico, esta unidad pertenece al gran sistema Magdalena-Cauca (Código 2), específicamente en la zona hidrográfica Medio Magdalena (Código 3) y en la subzona identificada como río Lebrija y afluentes directos al Magdalena (Código 19), en la jurisdicción de la CDMB, se localiza la cuenca del Alto Lebrija, la cual se sitúa en la provincia de Soto Norte, donde predominan zonas de vida andina, altoandina y ecosistemas de páramo. Este territorio forma parte del flanco occidental de la Cordillera Oriental y abarca municipios relevantes como Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta (del área metropolitana), así como también Tona, Charta, Matanza, Surata, California, Vetas y sectores de Rionegro, El Playón y Lebrija.

Con base en este contexto territorial, el desarrollo del monitoreo participativo en la subzona hidrográfica del río Lebrija, en articulación con el Esquema de Seguridad Hídrica del río Tona, se convierte en un paso clave para avanzar hacia un modelo de Gobernanza del Agua más inclusivo y eficaz, esta estrategia busca armonizar los diferentes instrumentos de planificación y ordenamiento en el territorio, permitiendo una mayor capacidad operativa en la toma de decisiones ambientales, en la Figura 4 se puede visualizar tanto la subzona del río Lebrija como la Unidad Hidrográfica del río Tona bajo jurisdicción de la CDMB, lo cual facilita su análisis integrado.

**Figura 4.** Mapa de la subzona hidrográfica río Lebrija y la unidad hidrográfica Tona.

#### 4.2.5 Plan de monitoreo participativo

El plan de muestreo dentro del proceso de monitoreo participativo del río Tona constituye una herramienta técnica y metodológica que permite organizar, orientar y ejecutar de manera sistemática la recolección de datos sobre la calidad y cantidad del recurso hídrico, este define aspectos como los puntos de muestreo, la frecuencia de recolección, los parámetros a analizar y los métodos de medición que se van a emplear. Su finalidad principal es obtener información confiable y representativa del estado del río, lo cual servirá como base para la toma de decisiones ambientales, la evaluación de impactos, y el fortalecimiento de la participación comunitaria en la gestión del agua.

Por lo tanto, el plan no solo busca medir el estado fisicoquímico y biológico del río, sino también fortalecer el compromiso de los actores locales frente al cuidado de su territorio.

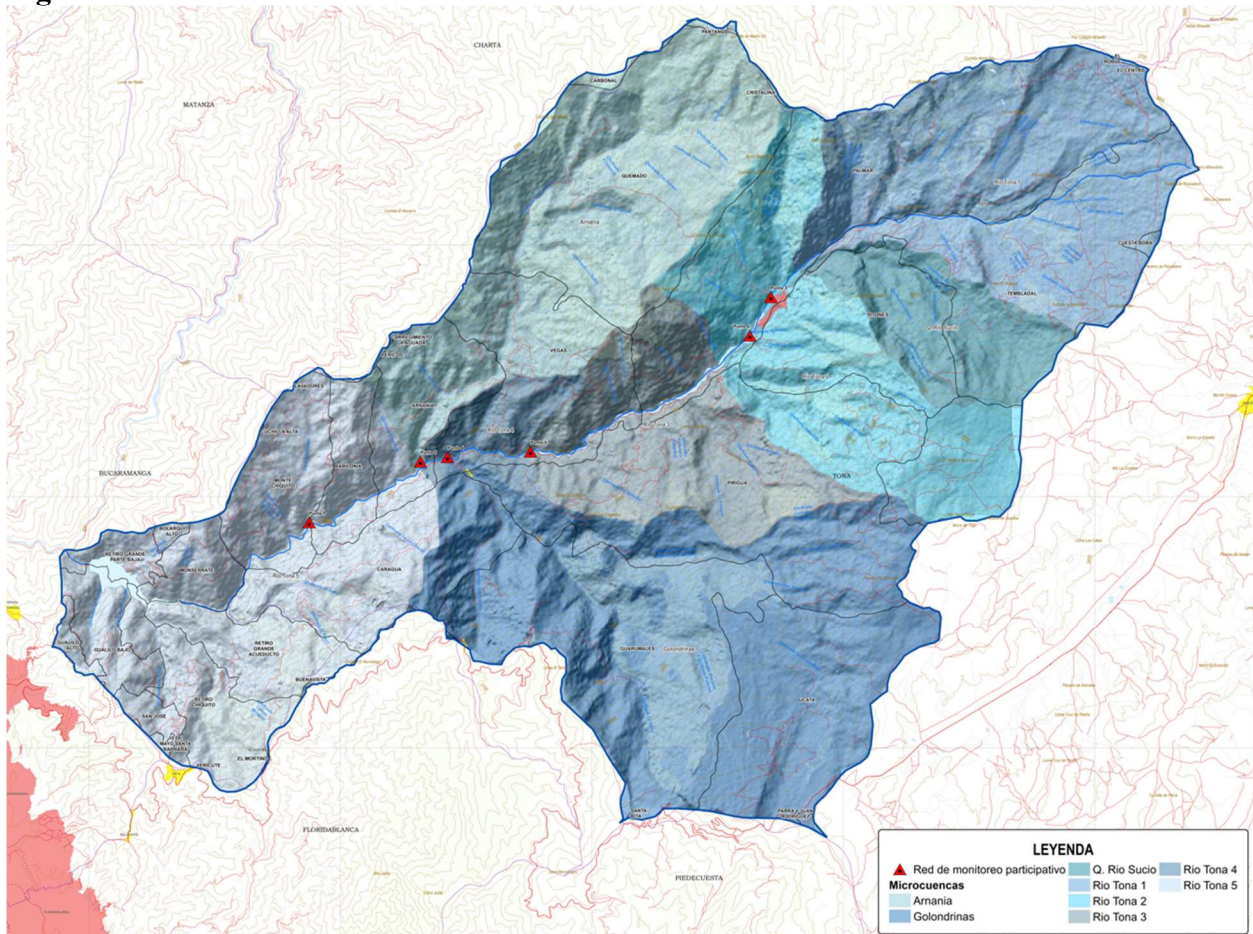
**4.2.5.1 Sitios de muestreo.** En el estudio titulado *“Procesos participativos para el biomonitoreo ambiental comunitario en las cuencas Cuitzmala y Purificación, México”* (Rodríguez-Contreras et al., 2024) se describe cómo, mediante un modelo participativo, se

seleccionaron localidades representativas de las partes alta, media y baja de las cuencas, con el propósito de obtener una visión más completa del estado ambiental. En este trabajo se adoptó un criterio similar en la microcuenca del río Tona: los puntos de muestreo se establecieron teniendo en cuenta no solo su posición geomorfológica (alto, medio, bajo), sino también la proximidad a fuentes de presión antrópica y la disposición de las comunidades locales para involucrarse. Esta forma de selección facilitó identificar áreas críticas para el monitoreo y promover una participación más directa de los actores sociales, lo que contribuye a generar resultados que tengan un impacto en el contexto local.

En la Tabla 9 se identifican los puntos de monitoreo seleccionados en la Unidad Hidrográfica, cuatro puntos están localizados sobre el cauce principal del Río Tona, y los otros dos sobre sus principales aportantes la Quebrada Arnanía y la Quebrada Golondrinas. En las Figura 5, se geolocalizan los puntos de monitoreo dentro de la jurisdicción de la CDMB.

**Tabla 9.** Localización de puntos de monitoreo y actores responsables

Puntos de monitoreo participativo	Detalle	Vereda	Monitores comunitarios	Contacto	O	N	Z	Subcuenca	Microcuenca	Área de drenaje
1. Puente Vía el Palmar (Sobre el río Tona)	Debajo del puente vía el Palmar – Casco urbano	Palmar	Institución escolar Rafael Uribe Uribe Profesor Javier Alberto Suarez Jaimes	3176561717	72°58'4.8"	7°12'12.5"	1917	2319-1 Río Surata	2319-1-4 Tona	3-Río Tona alto
2. Aguas abajo de la PTAR (Sobre el río Tona)	Ubicado a 80 metros aguas debajo de la PTAR del municipio de Tona.	Palmar	Administración Municipal Tona - secretaria de Planeación	3043447243	72°58'15.50"	7°11'46.70"	1813	2319-1 Río Surata	2319-1-4 Tona	3-Río Tona alto
3. Puente el Carrizal vereda la Vegas (Sobre el río Tona)	Junto al Puente el carrizal que conduce a la Vereda Vegas	Vegas	Gonzalo García	3183162870	73°00'42.3"	7°10'32"	1418	2319-1 Río Surata	2319-1-4 Tona	5.a-Río Tona medio-
4. Puente golondrina (Sobre quebrada Golondrinas)	Ubicados metros antes del punto de confluencia de la Quebrada Golondrina y el Río Tona, sobre el puente de la Vereda Vegas	Vegas	Jenny Blanco Rodriguez	3177915017	73°1'34.80"	7°10'28.90"	1296	2319-1 Río Surata	2319-1-4 Tona	5.b-Río Tona medio-Carrizal
5. Quebrada Arnanía (Sobre la Q. Arnanía)	Ubicado sobre la batea de la Quebrada Arnanía, a 250 metros de la confluencia con el Río Tona	Arnanía	Alexander Morales Y Jhon Jairo Morales	3188062447 3163652075	73°1'51.30"	7°10'26.20"	1311	2319-1 Río Surata	2319-1-4 Tona	5.b-Río Tona medio-Carrizal
6. Metros Abajo Casa Tona (Sobre río Tona)	Casa tona Hotel Boutique, 600 mts en línea recta hasta el río	Monte Chiquito	Adalberto - Administrador del hotel	3045551936	73°3'6.5"	7°9'38.4"	1123	2319-1 Río Surata	2319-1-4 Tona	8-Río Tona bajo -º

**Figura 5. Puntos de Monitoreo sobre a UH del Rio Tona**

Tomado de Consorcio SH Tona. 2022.

**4.2.5.2 Tipo de muestras y frecuencia de muestreo.** En el desarrollo metodológico se decidió implementar monitoreos puntuales en la microcuenca del río Tona, eligiendo sitios estratégicos que permitieran evaluar cómo varía la calidad del agua a lo largo del cauce, en especial considerando descargas puntuales u otras fuentes de contaminación, la selección de estos seis puntos (Tabla 9) se basó en criterios técnicos como la morfología del cauce, flujos turbulentos, mezcla del agua, y accesibilidad a los mismos, de manera que se pueda garantizar que las muestras sean representativas de las condiciones reales del cuerpo hídrico. Esta modalidad de muestreo, aunque sencilla, facilita obtener datos relevantes para contextos donde la capacidad técnica y

logística es limitada, a la vez que compromete la participación local en el seguimiento ambiental del recurso en pro de la gobernanza. (Larrea Murrell et al., 2022).

Para el plan de monitoreo en la microcuenca del río Tona se definió una frecuencia diferenciada, en los puntos priorizados ( 1, 2 y 6 ) se determinó realizar muestreos 2 veces por mes aproximadamente cada 15 días: el punto 1 por estar aguas arriba como referencia de fondo, el punto 2 por ubicarse después de la descarga de los vertimientos del casco urbano de Tona, y el punto 6 por ubicarse en la zona baja de la cuenca y más cercana a la confluencia con el río Suratá, donde se requiere información más precisa por su importancia estratégica en la región. En los demás puntos (3, 4 y 5) se estableció una frecuencia mensual, con el fin de mantener una cobertura amplia sin comprometer la capacidad técnica y logística disponible.

Esta periodicidad busca garantizar que el monitoreo sea representativo durante todo el año, considerando tanto las épocas de lluvia como las de estiaje, y al mismo tiempo ajustándose a la disponibilidad de los actores comunitarios que participan en el proceso y de esta forma lograr un balance entre la representatividad temporal de los datos y la sostenibilidad operativa del programa de monitoreo. (EPA, 1993)

Considerando lo anterior, en el diseño del plan de monitoreo se definió el tipo de muestreo puntual para los seis puntos con la frecuencia de muestreo diferenciada según la priorización de algunos puntos, como se resume en la Tabla 10.

**Tabla 10.** *Frecuencia monitoreo participativo.*

Puntos de monitoreo participativo	Coordenadas		Frecuencia
	O	N	
Puente vía el palmar (sobre el río Tona)	72°58'4.8''	7°12'12.5'	2 veces por mes
Aguas abajo de la ptar (sobre el río Tona)	72°58'15.50"	7°11'46.70"	2 veces por mes
Puente el carrizal vereda la vegas (sobre el río tona)	73°00'42.3''	7°10'32''	Mensualmente

Puntos de monitoreo participativo	Coordenadas		Frecuencia
	O	N	
Puente golondrina (sobre quebrada golondrinas)	73° 1'34.80"	7°10'28.90"	Mensualmente
Quebrada arnania (sobre la q. Arnania)	73° 1'51.30"	7°10'26.20"	Mensualmente
Metros abajo casa tona (sobre rio tona)	73° 3'6.5"	7° 9'38.4"	2 veces por mes

**4.2.5.3 Parámetros por monitorear en términos de calidad y cantidad.** En este ejercicio participativo en el río Tona, cada parámetro medido tiene una relación clara con las actividades que ocurren en la zona principalmente agropecuarias y vertimientos urbanos, y adicionalmente se tuvieron en cuenta otros criterios para la selección como lo fueron: su sencillez para la medición, resultados in situ, bajo costo y relevancia. A continuación, se enuncia cada uno de los parámetros seleccionados para el monitoreo participativo:

pH: indica si el agua es ácida o básica, es fundamental para el equilibrio de la vida acuática, en zonas agropecuarias, fertilizantes, plaguicidas o drenajes con detergentes pueden alterar el pH, lo que afecta la solubilidad de nutrientes y sustancias químicas (Fathi et al., 2018)

Temperatura: influye en todos los procesos físicos, químicos y biológicos del agua, si aumenta la temperatura por escorrentía cálida (actividad agropecuaria) o descargas urbanas, se reduce el oxígeno disuelto y se altera la vida acuática. (Syeed et al., 2023).

Sólidos disueltos totales (TDS): este parámetro cuantifica la concentración total de sustancias disueltas en el agua, como sales y minerales, y puede indicar niveles elevados de escorrentía agrícola o descargas urbanas, por ejemplo, altos TDS reflejan aporte de fertilizantes y sales en el suelo o también pueden alertar sobre contaminación doméstica. Actualmente hay estudios que proponen establecer umbrales de TDS específicos para proteger la vida acuática,

usando pruebas de toxicidad con organismos locales y modelos ajustados para determinar composiciones iónicas regionales. (Adjovu et al., 2023)

Conductividad eléctrica: mide la salinidad y el contenido iónico, su incremento indica una mayor concentración de sales frecuentes en zonas agrícolas con procesos de fertilización y que por escorrentía llegan a las fuentes hídricas y/o descargas domésticas con altas concentraciones iónicas. (McCleskey et al., 2023)

Alcalinidad: este parámetro mide la capacidad del agua para neutralizar ácidos y mantener estable el pH frente a aportes de sustancias químicas o residuos agropecuarios, en la UH subsiguiente del río Tona resulta fundamental porque actúa como un amortiguador natural frente a los fertilizantes ácidos utilizados en las zonas de cultivo, y frente a los vertimientos domésticos que pueden alterar el equilibrio químico del agua. En territorios de desarrollo agrícola, una alcalinidad moderada favorece la estabilidad del ecosistema, mientras que valores extremos pueden afectar la disponibilidad de nutrientes y los procesos biogeoquímicos del suelo y el agua. (Panday et al., 2025)

Dureza: representa la concentración de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) en el agua, iones que influyen directamente en la calidad del recurso y su aptitud para actividades agrícolas y suministro de agua potable. En zonas rurales, el aumento de la dureza puede estar asociado con el arrastre de minerales del suelo por procesos naturales o por prácticas de riego intensivo a partir del uso de acondicionadores del suelo, para el suministro de agua un nivel moderado de dureza aporta estabilidad al agua, pero valores altos pueden causar incrustaciones en los sistemas de conducción. En el río Tona, medir este parámetro permite identificar zonas donde el uso agrícola y la infiltración natural aportan concentraciones elevadas de sales, lo que puede influir en la sostenibilidad del riego y la calidad de los ecosistemas acuáticos. (Wen et al., 2024)

Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ): son nutrientes que provienen principalmente de fertilizantes agrícolas aplicados al suelo y de vertimientos domésticos sin tratamiento adecuado. En zonas agrícolas intensivas, los nitratos pueden filtrarse a los cuerpos de agua tanto por lixiviación en épocas de lluvia como por escorrentía superficial, elevando su concentración y así favoreciendo la eutrofización y el deteriorando la calidad del agua. El estudio realizado en la cuenca del río Changle documentó que más del 50 % de la contaminación por nitratos se debía a fuentes como estiércol y aguas residuales domésticas, demostrando así la relación directa entre ambas actividades y la presencia de nitratos en el agua. (Cao et al., 2022)

Nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ): la presencia de este contaminante se atribuye a procesos biológicos incompletos, tales como una nitrificación deficiente en sistemas agrícolas o por vertimientos domésticos. Es importante mencionar que en áreas donde hay escorrentía las lluvias y presencia de residuos orgánicos, los nitritos pueden acumularse temporalmente antes de convertirse a nitratos, y su presencia puede ser señal de perturbaciones recientes al sistema hídrico. (Bolaños-Alfaro et al., 2017b)

Cloro total: refleja la presencia de compuestos utilizados para desinfección, especialmente asociados a descargas de aguas residuales domésticas tratadas, lo cual puede afectar la vida acuática y el equilibrio ambiental. La formación de compuestos contaminantes a partir de la oxidación con el cloro representa uno de los mayores impactos sobre la calidad del agua, por la liberación de cloro residual libre. (Barzola Choque, 2024)

Fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ): se incrementan por aplicación de fertilizantes agrícolas y descargas de aguas residuales. Exceso de fosfatos impulsa procesos de eutrofización, provocando proliferación de algas y deterioro de la calidad del agua. Un estudio reciente destaca la necesidad de combinar

medidas de reducción en los aportes agrícolas de fósforo y mejoras en el tratamiento de aguas residuales para mejorar la calidad hídrica (Withers et al., 2024)

Oxígeno disuelto (DO): esencial para mantener la fauna acuática, los vertimientos domésticos o materia orgánica producida por actividades pecuarias, consumen oxígeno por acción microbiana, reduciendo DO y afectando la salud del ecosistema. (Tartabull Puñales y Betancourt Aguilar, 2016)

E. coli: es un indicador clave de contaminación fecal reciente, especialmente relevante en zonas agrícolas o en asentamientos urbano, su presencia en el agua, el suelo o los cultivos refleja la posible transmisión de bacterias patógenas desde aguas residuales domésticas o excrementos animales. En la UH del Río Tona, tanto el casco urbano como los centros poblados no cuentan con una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), y adicionalmente se desarrolla una ganadería ovina y porcícola dispersa, la detección de *Escherichia coli* en el agua adquiere especial relevancia sanitaria. Las aguas residuales domésticas sin tratar y los escorrentias con excretas animales pueden aportar altos niveles de E. coli que afectan no solo la salud humana sino también la salud animal, considerando la interconexión de los sistemas de agua, ganado y personas. Estudios recientes indican que la presencia de E. coli resistente en sistemas de producción animal puede reflejar una transferencia de patógenos entre animales, ambiente y humanos, por lo tanto, es fundamental que el plan de monitoreo comunitario incluya este indicador microbiológico, empleando métodos sencillos y de bajo costo que permitan a la comunidad y al equipo técnico detectar de forma temprana riesgos y actuar en consecuencia en la gobernanza del agua de la cuenca. (Mandujano-Hernández et al., 2024)

Caudal volumétrico: este parámetro hace referencia al volumen de agua que pasa por una sección del río en un tiempo determinado. Para este caso de estudio, se midió a partir de la

profundidad en diferentes puntos del cauce y la velocidad superficial del flujo, la sección transversal se aproximó como un rectángulo, calculando el área en función del ancho promedio y la profundidad media obtenida de las mediciones directas. Posteriormente, el caudal se estimó multiplicando esta área por la velocidad del agua, medida con métodos sencillos de flotadores (corchos, pelotas plásticas). Esta forma de estimación, aunque básica, es apropiada en un contexto comunitario, ya que permite a los participantes obtener resultados representativos de la dinámica del río con recursos de bajo costo y procedimientos fáciles de réplica. (AMVA, 2019).

**Tabla 11.** *Parámetros a monitorear*

<b>Parámetro</b>	<b>Equipo y o elementos</b>
pH	Multiparámetro
Temperatura	
Sólidos disueltos totales	
Conductividad eléctrica	
Alcalinidad	
Dureza	Kit colorimétrico Columbus
Nitratos	
Nitritos	
Cloro total	Kit colorimétrico
Fosfatos	
Oxígeno disuelto	Kit colorimétrico
E-Coli	Kit microbiológico-Presencia y ausencia
Caudal	Aforo (regleta, lazo, material flotante, cinta métrica)

**4.2.5.4 Equipos y materiales.** Por tratarse de un trabajo de carácter comunitario, en el cual participan personas con diferentes niveles de conocimientos y habilidades técnicas, fue necesario diseñar una metodología basada en métodos sencillos y prácticos, adicionalmente se buscó que los datos pudieran obtenerse in situ, es decir, directamente en el punto de monitoreo, reduciendo así la dependencia de laboratorios externos y evitando costos adicionales que limiten la continuidad del proceso, también se priorizó la utilización de herramientas y reactivos de bajo costo, ya que

los recursos son limitados y se debe favorecer la sostenibilidad a largo plazo del monitoreo, y así dar continuidad a este tipo de prácticas.

Al considerar las actividades productivas que se desarrollan en las zonas cercanas al río son principalmente de carácter agropecuario, y que también existen descargas de vertimientos domésticos provenientes del casco urbano y centros poblados, se hizo relevante contar con una estrategia que permitiera identificar variaciones de la calidad del agua de forma oportuna, por lo tanto el enfoque adoptado para el desarrollo del Monitoreo Participativo en la unidad hidrográfica del río Tona no solo responde a criterios técnicos, sino también a la necesidad de facilitar la participación de la comunidad en la generación de información confiable sobre el estado del recurso hídrico, y así fomentar un aprendizaje colectivo y la apropiación del proceso por parte de los mismos actores locales.

Con el propósito de garantizar la adecuada ejecución del proceso de monitoreo comunitario del recurso hídrico, la CDMB realizó la entrega de un kit de monitoreo participativo a cada uno de los responsables asignados en los seis (6) puntos definidos dentro de la UH del río Tona, esta entrega se efectuó en cumplimiento de las especificaciones técnicas pertinentes con el fin de que las comunidades contaran con los equipos y materiales necesarios para realizar las mediciones in situ de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos. Cada kit incluyó instrumentos de medición, pruebas colorimétricas, elementos de seguridad, utensilios de muestreo y materiales de apoyo logístico, adaptados a las condiciones del terreno y al nivel de conocimiento de los participantes. En la Tabla 12 se registran los elementos que componen el kit mencionado.

**Tabla 12.** *Instrumentación monitoreo participativo-kit.*

Ítem	Elementos kit de monitoreo participativo	Cantidad
1	Multiparámetro de pH, Temperatura, Conductividad, Sólidos disueltos. Ref: HI9814 Marca Hanna	1

Ítem	Elementos kit de monitoreo participativo	Cantidad
2	Quick test 6 parámetros pH, KH, GH, NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , Cl <sub>2</sub> x 100 unidades Marca SJWAVE	1
3	Test de Oxígeno, colorimétrico 120 pruebas Marca Monitor	1
4	Test de fosfato y ortofosfato colorimétrico 150 pruebas API	1
5	Test e-coli - coliformes x 4 pruebas -colorimétrico que no necesitan incubadora- Marca AQUAVIAL	3
6	Vaso para tomar muestra de 300ml de vidrio	2
7	Probeta plástica de 50 ml	1
8	Balde pequeño	1
9	Agua destilada 1 litro	1
10	Frasco lavador de 250 ml	1
11	Caja de herramientas de 18" cerradura plástica	1
12	Flexómetro magnético 5 metros	1
13	Lazo x 20 metros	1
14	Cinta métrica plástica 30 metros	1
15	Pelota de ping pong para velocidad	50
16	Impermeable plástico talla L	3
17	Lanillas microfibra	5
18	Cronometro	1
19	Botas	3
20	Gorras	3
21	Reglas de 1 metro	1
22	Tablas de tomar datos tipo folder oficio con tapa	1

**4.2.5.5 Toma de Muestras.** Es responsabilidad de la CDMB y de los monitores comunitarios a quienes se les hizo entrega de los Kit de monitoreo participativo: Tomar las muestras en los puntos de monitoreo definidos por la CDMB. La medición de parámetros en campo (pH, temperatura, sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica, alcalinidad, dureza, nitratos, nitritos, cloro, fosfatos, oxígeno disuelto, E-Coli y caudal) los cuales se realizarán por medio de equipos de bajo costo. Consignar en el formato elaborado por la CDMB de captura datos de campo, los resultados de los análisis inmediatamente se realicen las correspondientes mediciones.

Cada parámetro tiene un método, instrumentos e insumos específicos para realizar una medición, los cuales explican a continuación en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Consolidado de especificaciones de medición de multiparámetro + kits (colorimetría + test cualitativo)

Parámetro	Tipo de equipo	Unidad / Resultado	Rango o categorías	Resolución	Exactitud	Tipo de escala	Interpretación técnico-operativa	Observaciones metodológicas
Oxígeno disuelto (O <sub>2</sub> )	Multiparámetro	ppm (mg/L)	0 – 15 ppm	0.5 ppm	(Según fabricante)	Razón	Disponibilidad de O <sub>2</sub> ; <2 mg/L riesgo de hipoxia.	Medir <i>in situ</i> , sin burbujas y con estabilización térmica.
Temperatura	Multiparámetro	°C / °F	0.0 – 60.0 °C (32 – 140 °F)	0.1 °C (0.1 °F)	±0.5 °C (±1 °F)	Razón	Influye en cinética química, metabolismo y solubilidad de O <sub>2</sub> . Acidez–alcalinidad;	Evitar sol directo y choque térmico.
pH	Multiparámetro	U. pH	–2.00 a 16.00	0.01 – 0.10	(Según fabricante)	Intervalo	aguas naturales ideal 6.5–8.5.	Calibrar 4–7–10, corregir por temperatura.
Conductividad eléctrica (EC)	Multiparámetro	mS/cm	0.00 – 6.00	0.01 mS/cm	(Según fabricante)	Razón	Indica mineralización; valores altos pueden sugerir impacto antrópico.	Corregir a 25°C; limpiar electrodo.
Sólidos disueltos totales (TDS)	Multiparámetro	ppm	0 – 3000 ppm (o hasta 3990 ppm si factor 0.7)	Variable (estimada)	(Según método)	Razón	Estimación indirecta: TDS = EC × factor.	No es medición directa; depende de composición iónica.
Dureza general (GH)	Kit colorimétrico	ppm	0 – 1000 ppm	Semi–cuantitativa	No aplica	Razón	Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> ; afecta incrustación y equilibrio químico.	Resultado dependiente de percepción visual.
Alcalinidad carbonatada (KH)	Kit colorimétrico	ppm	0 – 360 ppm	Semi–cuantitativa	No aplica	Razón	Amortiguación del pH; estabilidad química.	Lectura bajo luz natural.
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Kit colorimétrico	mg/L	0 – 250 mg/L	Semi–cuantitativa	No aplica	Razón	Nutriente eutrofizante; >10 mg/L riesgo sanitario.	No sustituye laboratorio acreditado.
Nitritos (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Kit colorimétrico	mg/L	0 – 10 mg/L	Semi–cuantitativa	No aplica	Razón	Tóxico en bajas concentraciones; >0.1 mg/L no apto para consumo.	Lectura inmediata.
Cloro (Cl <sub>2</sub> )	Kit colorimétrico	mg/L	0 – 3.0 mg/L	Semi–cuantitativa	No aplica	Razón	Indicador de desinfección; >1.3 mg/L olor/sabor.	Volatilización rápida.
Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	Kit colorimétrico	mg/L	0.00 – 10 mg/L	Semi–cuantitativa	No aplica	Razón	Nutriente eutrofizante; >1 mg/L alto riesgo.	Sensible a turbidez y color.

<b>Parámetro</b>	<b>Tipo de equipo</b>	<b>Unidad / Resultado</b>	<b>Rango o categorías</b>	<b>Resolución</b>	<b>Exactitud</b>	<b>Tipo de escala</b>	<b>Interpretación técnico-operativa</b>	<b>Observaciones metodológicas</b>
E. coli	Kit biológico cualitativo	Positivo / Negativo	Binario (sí/no)	No aplica	No aplica	Nominal dicotómica	Detecta presencia bacteriana; positivo = potencial riesgo microbiológico.	Test cualitativo, no cuantifica UFC/mL;.

El test de E. coli incluido en el proceso de monitoreo participativo corresponde a una prueba cualitativa de tamizaje, útil para alertas tempranas comunitarias, pero no reemplaza análisis microbiológicos confirmatorios como filtración por membrana, métodos IDEAM o recuento en UFC/mL acreditado por laboratorio certificado

**4.2.5.5.1 Toma muestra puntual.** Previo a la realización del análisis físico-químicos y microbiológicos, se procedió a una toma puntual de muestra de agua en el cauce del río, seleccionando un punto representativo ubicado aproximadamente en la mitad del ancho y a mitad de profundidad, teniendo en cuenta los criterios del instructivo de muestreo del IDEAM para aguas superficiales. (IDEAM, 2021)

Esta muestra fue colectada en un balde limpio de plástico, desde el cual se tomaron alícuotas para determinar los parámetros de pH, temperatura, conductividad, sólidos disueltos, fosfatos, nitratos, nitritos, cloro, dureza, alcalinidad y E-coli, garantizando una manipulación uniforme y controlada. Para el análisis de oxígeno disuelto (OD) se realizó una muestra aparte, directamente del río mediante un recolector hermético, ya que este parámetro es altamente sensible al intercambio con el aire y a la agitación. Este procedimiento de toma muestra posibilita un muestreo participativo coherente con las condiciones del campo y las capacidades comunitarias para el monitoreo ambiental *in situ*.

Para el desarrollo del monitoreo participativo de calidad del agua se emplearon dos tipos de instrumentos complementarios: un equipo multiparámetro portátil para la medición de variables fisicoquímicas *in situ* y kits colorimétricos y biológicos de lectura rápida para la verificación de parámetros nutritivos y bacteriológicos. La integración de ambos métodos permitió obtener datos cuantitativos de precisión aceptable, junto con resultados semicuantitativos y cualitativos útiles para la interpretación comunitaria y la identificación temprana de riesgos ambientales y sanitarios. En la Tabla 13, se presentan las especificaciones técnicas del rango de medición, resolución, tipo de escala e interpretación operativa de cada uno de los parámetros evaluados, lo cual facilita la comprensión de la naturaleza de los datos obtenidos y sus limitaciones analíticas dentro del contexto del monitoreo participativo.

**4.2.5.5.2 Medición de variables y cálculo del caudal.** En el contexto del monitoreo participativo en la Unidad Hidrográfica del río Tona, se adoptó el método volumétrico con flotadores como estrategia de estimación del caudal superficial de fuentes hídricas, este método se caracteriza por su simplicidad operativa, bajo costo y adecuación a escenarios rurales, lo que lo hace especialmente valioso para fortalecer capacidades comunitarias en la gestión del recurso hídrico.

Aunque este enfoque no proporciona una precisión técnica equivalente a métodos hidrométricos instrumentados (como molinetes o sensores ultrasónicos), su aplicación ha demostrado ser altamente aproximada y funcional para los objetivos del monitoreo participativo, por lo tanto se consideró que el método se ajusta adecuadamente a las necesidades y condiciones del territorio, permitiendo obtener información útil para la toma de decisiones comunitarias, la identificación de presiones sobre el recurso y la valoración de caudales en puntos críticos.

La estimación se basa en la relación entre el tiempo que tarda un objeto flotante en recorrer una distancia conocida (5 -10 metros) y las dimensiones transversales del cauce (ancho y profundidad), medidas de forma manual, los valores obtenidos permiten calcular la velocidad superficial y, a partir de ella, el caudal aproximado del río.

Esta metodología fue aplicada en varios puntos del sistema de monitoreo participativo del río Tona, con la participación de actores locales, quienes fueron previamente capacitados mediante el kit entregado por la CDMB y bajo criterios definidos por la red de monitoreo participativo.

Figura 6. Aforo volumétrico - medición de caudal



Elaborado con IA

Para el aforo con flotadores se debe escoger una sección recta del río para medir y demarcar una distancia conocida a lo largo del mismo de 5 a 10 metros. Nota: se debe seleccionar un tramo donde no se presenten bifurcaciones, estancamientos u otra irregularidad en la corriente.

Colocar suavemente sobre la superficie del agua un elemento flotante en el canal y simultáneamente activar el cronómetro para medir el tiempo transcurrido hasta que el objeto termine de recorrer la distancia asignada, este proceso se debe repetir 3 veces y calcular el promedio. Nota: El objeto flotante debe arrojarse suavemente sobre la corriente, para que este no le aplique una fuerza adicional que pueda afectar la medición.

Medir el ancho de la fuente de orilla a orilla, en 3 segmentos dentro del tramo seleccionado.

Tomar 1 sección transversal del tramo seleccionado, y se mide las profundidades con una regleta o elemento rígido de orilla a orilla en un espaciado de cada 50 cm.

La velocidad del agua se calculó de la siguiente manera:

$$V = \frac{X}{t}$$

Donde:

V = Velocidad superficial (m/s)

X = Longitud recorrida por el elemento flotante en metros (m)

t = Tiempo de recorrido del elemento flotante en segundos (s)

El caudal se calculó de la siguiente manera:

$$A = a \times h$$

$$Q = V \times A$$

Q = Caudal (m<sup>3</sup>/s)

V = Velocidad superficial (m/s)

A = Área transversal promedio (m<sup>2</sup>)

a = Ancho de cauce (m) promedio de 3 medidas

h = promedio de las medidas de la profundidad del río (m) cada 50 cm.

**4.2.5.5.3 Medidor de pH, Temperatura, Conductividad y Sólidos Disueltos Totales.** En el caso de estudio del monitoreo participativo desarrollado en la Unidad Hidrográfica del río Tona, se empleó un equipo multiparámetro portátil marca HANNA, con capacidad para medir pH, temperatura, conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (TDS), esta herramienta

resulta de gran utilidad en procesos comunitarios de seguimiento ambiental, al permitir una evaluación in situ de la calidad del agua, con parámetros clave para la gestión del recurso.

Aunque este tipo de equipo requiere cuidados básicos, verificaciones y calibraciones frecuentes, se adapta bien a las condiciones del territorio por su portabilidad, facilidad de uso y confiabilidad de los datos cuando se siguen correctamente los protocolos, por ello, se consideró adecuado para el fortalecimiento de capacidades locales y como complemento técnico dentro del sistema de monitoreo participativo.

La calibración del equipo se realizó siguiendo las indicaciones del fabricante, apoyados en material audiovisual (Hanna Instruments, 2022), y se garantizaron condiciones mínimas de limpieza y activación de la sonda antes de cada uso. La medición se llevó a cabo directamente sobre la muestra de agua, manteniendo criterios de control de contaminación cruzada y verificación de estabilización de los valores en pantalla. Este proceso fue replicado por los monitores comunitarios capacitados, contribuyendo a una apropiación social del conocimiento y al seguimiento autónomo de la calidad del agua en puntos estratégicos del territorio.

La calibración del equipo se realizó siguiendo los pasos descritos a continuación, apoyándose en ayudas audiovisuales del fabricante (Hanna Instruments Colombia, 2019):

Verifique que la sonda no esté seca. Si lo está, sumérgala en la solución de almacenamiento (HI70300) durante al menos 30 minutos para reactivarla.

Si la sonda presenta contaminación, remójela 20 minutos en la solución de almacenamiento, luego enjuáguela con agua purificada y vuelva a sumergirla al menos 30 minutos antes del uso.

Encienda el equipo presionando el botón de encendido.

Asegúrese de que el equipo ha sido calibrado previamente; si no, inicie el modo de calibración (normalmente pulsando “CAL”).

Enjuague la punta de la sonda con agua destilada (o desionizada / ósmosis inversa) y elimine cuidadosamente las gotas de agua antes de la calibración.

Sumerja la sonda en la primera solución buffer adecuada (por ejemplo, pH 7 o el valor recomendado) y espere que el indicador de estabilidad desaparezca en la pantalla.

Si el equipo lo requiere, cambie a la segunda solución buffer (por ejemplo, pH 4 o pH 10) para calibración de dos puntos. Espere nuevamente estabilización.

Cuando la calibración esté guardada (aparecerá la indicación “Sto” o similar), enjuague la sonda y proceda a medición de muestra.

Para medir muestras: sumerja la sonda en la muestra, agite lentamente para homogenizar, espere la estabilización y lea los valores de pH, CE, TDS y temperatura.

Recalibre el equipo siempre que se dé alguna de las siguientes condiciones:

- Se reemplaza el electrodo.
- Se realizaron mediciones en sustancias químicas agresivas.
- Se requiere obtener alta precisión.
- Al menos una vez al mes.
- Después de limpiar la sonda.

En la Figura 8 se muestra el equipo multiparámetro usado para las mediciones.

**Figura 7.** Equipo multiparámetro marca HANNA.



Tomado de Hanna Instruments, (2022).

El procedimiento para el funcionamiento del equipo y toma de análisis se enumera a continuación:

- a) Para encender el medidor presione el botón de encendido.
- b) Asegurar de que el medidor se ha calibrado antes de usar. Si la sonda está seca o con sedimentos, sumérjala en la solución de almacenamiento HI70300 por un mínimo de 30 minutos para reactivarla.
- c) De observarse impurezas, limpie el electrodo remojándolo en la solución de almacenamiento por 20 minutos, entonces enjuague la punta y remójela en solución de almacenamiento por al menos 30 minutos antes de su uso.
- d) Enjuague con cuidado el electrodo y agítelo para retirar las gotas de agua.
- e) Recalibre el medidor siempre antes de usarlo.

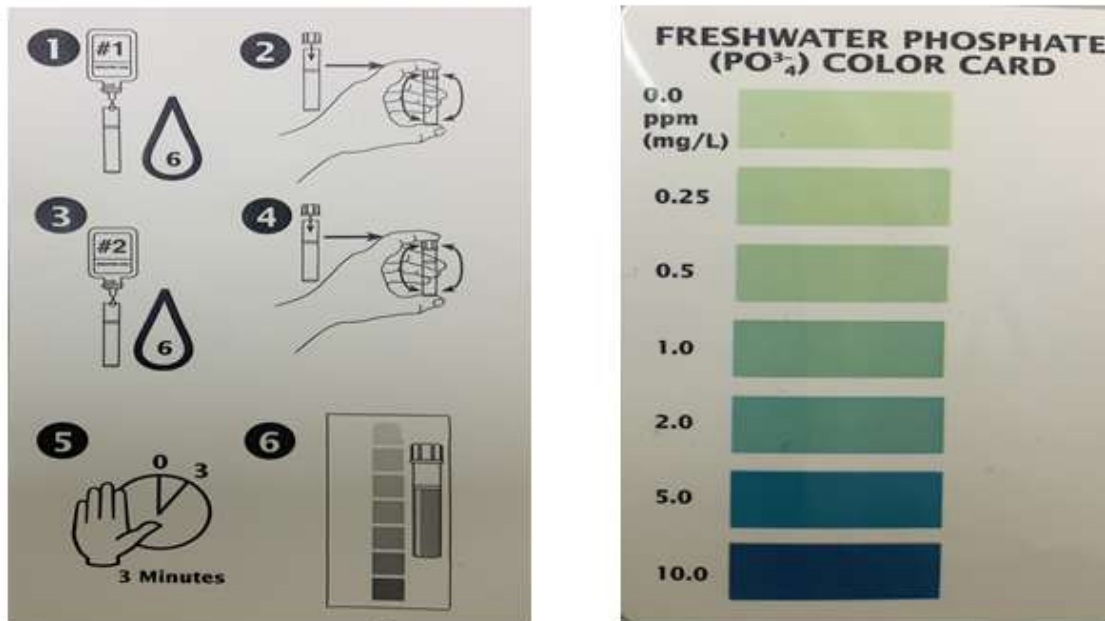
- f) Tomar una alícuota de 200 ml aproximadamente en el vaso de vidrio de 300 ml donde se introduce la sonda. Este procedimiento debe realizarse en corto tiempo para que fenómeno de convención no se pierda temperatura o se decanten los TDS.
- g) Sumerja la sonda en la muestra que desea analizar mientras agita lentamente y espere hasta que la etiqueta desaparezca de la pantalla.
- h) El valor de pH (con compensación automática de temperatura) se mostrará en la pantalla primaria; los valores de CE (conductividad eléctrica), TDS (sólidos disueltos totales) o pH-mV se mostrarán en la pantalla secundaria y la terciaria mostrará la temperatura de la muestra.
- i) Registre los valores de pH, Temperatura, Conductividad y Sólidos Disueltos Totales, en el formato de campo.
- j) Si las mediciones se realizan consecutivamente en diferentes muestras, enjuague la punta de la sonda cuidadosamente para eliminar la contaminación cruzada. La punta de la sonda debe purgarse en agua purificada (destilada, desionizada, o por osmosis inversa) antes de ubicarla en cualquier solución (buffer, almacenamiento, o la muestra).

**4.2.5.5.4 Determinación de fosfatos.** Dentro del marco del monitoreo participativo, se incorporó la medición de fosfatos como un parámetro relevante para el análisis de la calidad del agua, dado que estos compuestos pueden estar asociados a fuentes de contaminación doméstica, agrícola o pecuaria. En este caso, se utilizó un método colorimétrico accesible y fácil de replicar por parte de las comunidades, lo cual permite fortalecer los procesos de apropiación social del conocimiento en torno a la gestión del recurso hídrico, aunque este tipo de pruebas presenta una precisión limitada en comparación con métodos de laboratorio acreditados, se consideró adecuado

para los objetivos del monitoreo comunitario, ofreciendo una lectura visual comprensible y de respuesta rápida que facilita la toma de decisiones básicas en campo.

El procedimiento para la determinación de fosfatos se enumera a continuación y en la Figura 9 se ilustra la toma muestra:

- a) Retirar el tapón de seguridad para niños, empujando el capuchón hacia abajo mientras lo gira.
- b) Llenar un tubo de ensayo limpio con 5 ml de alícuota de la muestra puntual (hasta la marca sobre el tubo).
- c) Manteniendo vertical el frasco, añadir 6 gotas del frasco N° 1 de fosfato ( $\text{PO}^{3-}_4$ ), test solución, poner el tapón sobre el tubo de ensayo y agitar fuerte durante 5 segundos.
- d) Luego, manteniendo vertical el frasco, añadir 6 gotas del frasco N° 2 de fosfato ( $\text{PO}^{3-}_4$ ), Test solución.
- e) Poner el tapón sobre el tubo de ensayo y agitar fuerte durante 5 segundos.
- f) Esperar 3 minutos con el fin de que el color se desarrolle.
- g) Leer el resultado del análisis comparando el color de la solución con la carta Fresh Water Phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). El tubo debe colocarse en una zona bien iluminada sobre el fondo blanco de la carta.
- h) El color más parecido indica la concentración de fosfato en mg/L de la muestra de agua. Lavar el tubo de ensayo con agua limpia después de cada uso.
- i) Registre el valor en el formato de campo.

**Figura 8.** Test de fosfato y ortofosfato colorimétrico marca API.

Tomado de Fabricante (2022).

**4.2.5.5.5 Determinación E. Coli.** En el monitoreo participativo de la calidad del agua, la detección de *Escherichia coli* (*E. coli*) es una práctica fundamental, ya que este microorganismo actúa como un bioindicador de contaminación fecal y permite inferir la posible presencia de patógenos que afectan la salud humana y animal. El método aplicado en esta experiencia piloto consistió en una prueba colorimétrica de campo cualitativa que detecta presencia o ausencia de *E. coli*, facilitando así un análisis accesible para las comunidades locales involucradas; la muestra se deposita en un vial reactivo y se incuba por 48 horas a temperatura ambiente (20–25 °C); durante ese tiempo, el cambio de color indica la posible presencia del microorganismo. Es importante mencionar que la medición de *E. coli* sigue siendo uno de los indicadores más aceptados para evaluar el riesgo microbiológico en fuentes de agua, siendo ampliamente utilizado tanto en contextos rurales como urbanos con baja cobertura de tratamiento (Charles et al., 2020).

El procedimiento para la determinación de *E-coli* se enuncia a continuación, según las indicaciones del fabricante.

- a) Girar la tapa amarilla del cilindro Aquavial en sentido antihorario para abrir el vial.
- b) Llenar el Aquavial con agua de la muestra recolectada, la alícuota de agua no debe exceder la línea de llenado de 5 ml.
- c) Girar en el sentido de las agujas del reloj para cerrar el vial. No deje el frasco abierto.
- d) Agitar bien el frasco para disolver el medio seco depositado en las paredes laterales del frasco.
- e) Tomar una foto del frasco sobre un fondo blanco, la cual servirá para testificar el viraje en el color según sea el resultado.
- f) Incubar: deje que el frasco incube en una posición vertical durante 24 horas si la temperatura es 35-40°C o 48 horas si la temperatura es 20-25°C y compruebe los cambios en color.
- g) Compare el color del reactivo en el frasco de prueba con el diagrama de color de la Figura 10. Nota: Esta prueba está destinada únicamente a la detección rápida, es importante tener en cuenta que cualquier cambio de color después de 48 horas debe descartarse. La prueba es altamente sensible e incluso las bacterias muertas (no dañinas) pueden cambiar el color después de más de 48 horas.
- h) Registre la respuesta como (+) o negativo (-), según escala de colores de la Figura 10.

**Figura 9.** Test E-Coli marca AQUAVIAL.

Tomado de (AQUAVIAL, 2022).

**4.2.5.5.6 Determinación de oxígeno disuelto.** La determinación del oxígeno disuelto en cuerpos de agua es un parámetro clave para evaluar la calidad del recurso hídrico, dado que su concentración está directamente relacionada con la capacidad del ecosistema acuático para sostener vida.

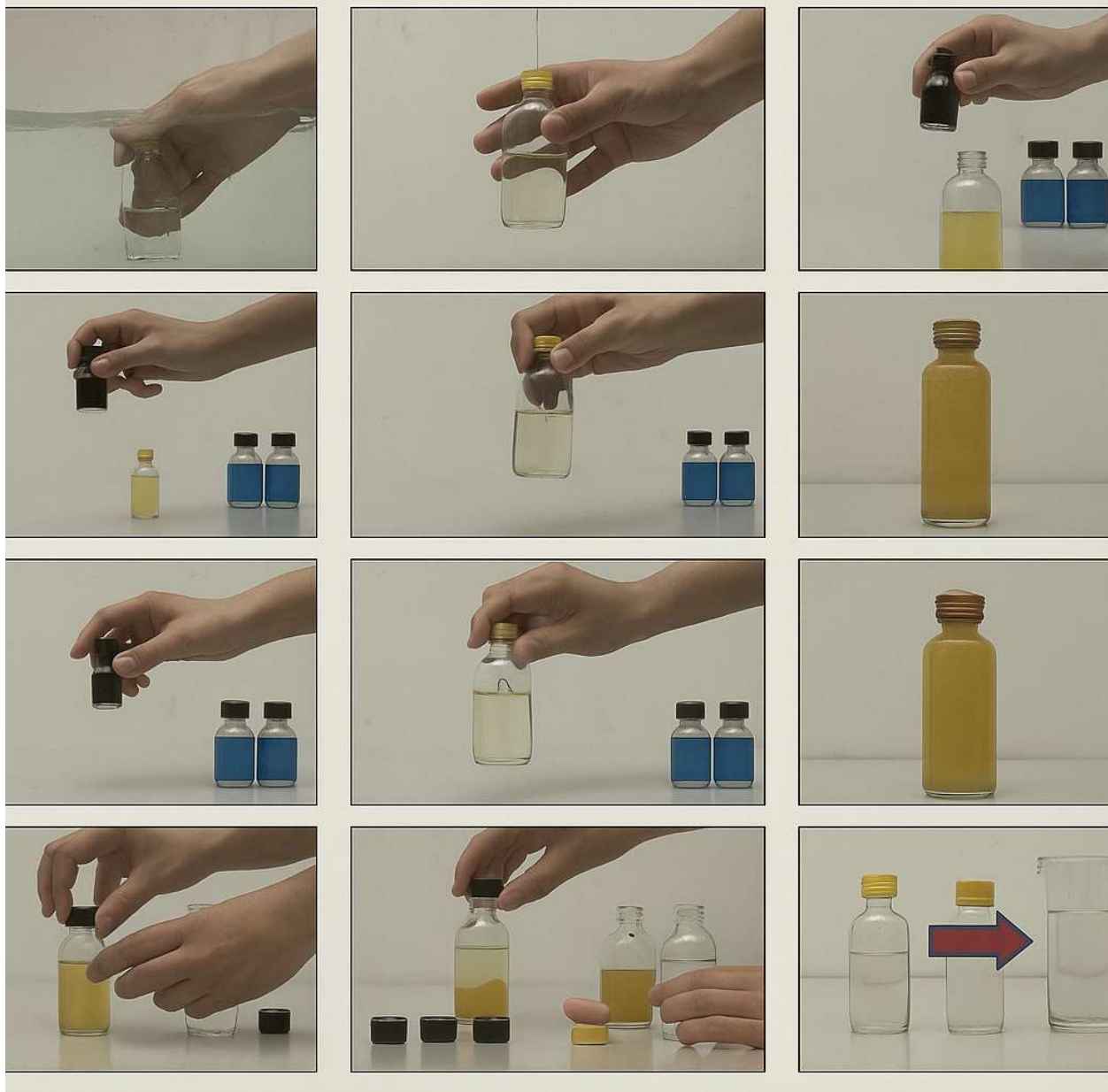
Este análisis es sensible a las condiciones de campo, por lo que se recomienda realizar la toma de muestra directamente en el cauce para evitar la pérdida de oxígeno por agitación o contacto con el aire, tal como lo sugiere el protocolo del (IDEAM, 2021) y los métodos colorimétricos rápidos como los kits de análisis de campo, que, aunque no ofrecen la misma precisión de equipos electroquímicos, resultan ser altamente prácticos y adecuados para ejercicios de monitoreo participativo.

El paso a paso, necesario para el análisis de OD se muestra a continuación y en la Figura 11 se ilustra el mencionado procedimiento:

- a) Recolección de la muestra: Sumergir el vial de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) completamente dentro del río, asegurándose de que se llene por completo, sin dejar

burbujas de aire. Cerrar inmediatamente el frasco mientras permanece sumergido para evitar la pérdida de oxígeno.

- b) Asegurar el cierre hermético: Verificar que el frasco esté correctamente cerrado y sin ingreso de aire exterior.
- c) Añadir 3 gotas del reactivo N.º 1 directamente al frasco con la muestra de agua.
- d) Agregar 3 gotas del reactivo N.º 2.
- e) Cerrar bien el frasco con su tapa y agitar vigorosamente hasta que se forme un precipitado marrón visible.
- f) Dejar reposar el frasco durante 2 minutos para permitir la completa formación del precipitado.
- g) Agregar 3 gotas del reactivo N.º 3.
- h) Volver a cerrar y agitar el frasco hasta que el precipitado marrón desaparezca por completo.
- i) Una vez que el precipitado ha desaparecido, abrir el frasco y dividir la muestra en dos partes iguales vertiendo la mitad en un segundo frasco limpio.
- j) Añadir el reactivo T (titulante) gota a gota Al segundo frasco (con la mitad de la muestra), agitando suavemente después de cada gota.
- k) Contar cuidadosamente el número de gotas necesarias hasta que el color amarillo desaparezca por completo (se torna incoloro). Este número de gotas se denomina “A”.
- l) Calcular la concentración de oxígeno disuelto (OD) en la muestra así: Oxígeno disuelto (mg/L) = A / 2

**Figura 10.** Test Oxígeno Disuelto marca Monitor

Adapto de (Monitor, 2022).

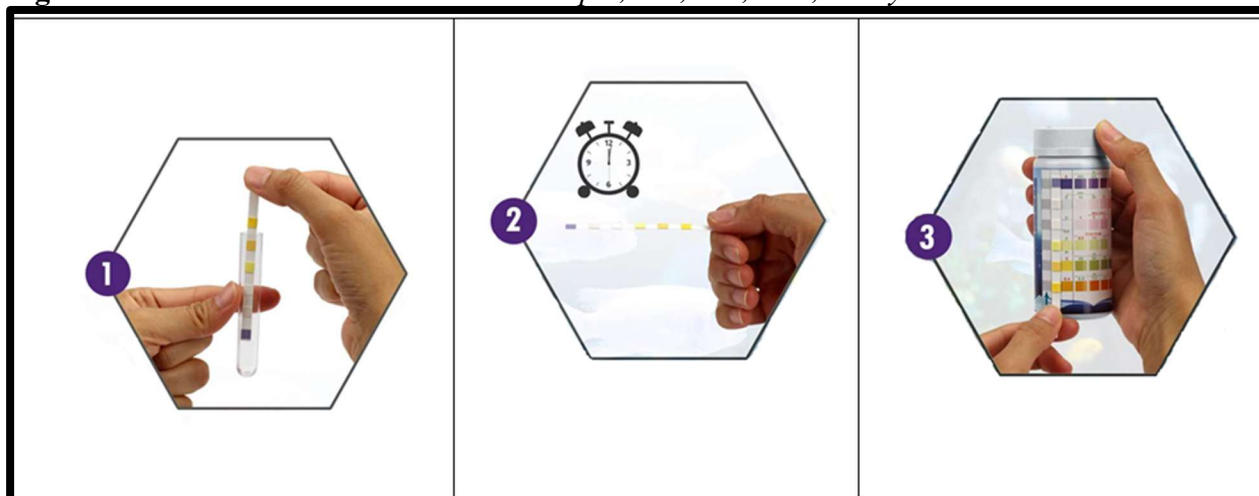
**4.2.5.5.7 Determinación dureza, nitratos, nitritos, cloro libre, dureza carbonácea.** El monitoreo comunitario de la calidad del agua en fuentes superficiales requiere herramientas accesibles, confiables y fáciles de usar que permitan a los actores locales identificar alteraciones en parámetros fisicoquímicos clave, en este sentido el uso de tiras reactivas multiparámetro ha demostrado ser una alternativa efectiva para detectar la presencia y concentración aproximada de

sustancias como el pH, dureza total (GH), dureza de carbonatos (KH), nitritos ( $\text{NO}_2$ ), nitratos ( $\text{NO}_3$ ) y cloro libre ( $\text{Cl}_2$ ), sin necesidad de equipamientos sofisticados ni formación técnica avanzada.

Estas tiras utilizan principios de colorimetría semicuantitativa, donde diferentes zonas reactivas responden con un cambio de color al entrar en contacto con componentes específicos del agua y su lectura se realiza comparando visualmente los colores desarrollados frente a una escala estandarizada, esto permite obtener resultados de manera rápida y económica. Si bien no cuentan con la confiabilidad de los análisis de laboratorio, constituyen una valiosa herramienta de vigilancia comunitaria y de educación ambiental participativa, especialmente en zonas rurales o con capacidades institucionales limitadas (Kumar et al., 2025)

Además, para establecer el procedimiento de muestreo y análisis in situ de pH, KH, GH,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  y  $\text{Cl}_2$ , se basó en las indicaciones dadas por el fabricante y las ayudas audiovisuales generadas (SJ Wave, 2021), tal como describe a continuación y se presenta en la Figura 12:

- a) Preparación de la muestra: Llenar el tubo de ensayo con capacidad de 5 ml anexo al kit, para garantizar que la columna de agua cubra completamente todos los ítems de las tiras.
- b) Inmersión de la tira: Tomar una tira reactiva con las manos secas y sumérgjala completamente en la muestra de agua durante 2 segundos. Sáquela inmediatamente.
- c) Reposo: Colocar la tira en posición horizontal (plana) sobre una superficie limpia y no absorbente. Espere 30 segundos para que los colores se desarrollen completamente.
- d) Lectura: Comparar los colores de la tira con la escala comparativa del envase del kit. Para una mejor precisión, hágalo bajo luz natural o blanca.
- e) Registrar los valores leídos en la tira reactiva de los parámetros de pH, KH, GH,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  y  $\text{Cl}_2$ .

**Figura 11.** Procedimiento determinación de pH, KH, GH, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub> y Cl<sub>2</sub>

Tomado de (WAVE, 2022).

**4.2.5.6 Registro, transmisión y validación de datos de monitoreo participativo.** Los resultados obtenidos evidencian que el proceso de capacitación de los monitores comunitarios incidió de manera directa en la calidad y consistencia de la información recolectada, reflejándose en la coherencia de los valores registrados y en la disminución de inconsistencias asociadas a errores de medición o registro. En este caso, la apropiación de procedimientos estandarizados para la toma de muestras y el uso adecuado de los equipos permitió generar datos comparables entre los diferentes puntos de monitoreo y otros procesos de medición, lo cual resulta fundamental para el análisis espacial de la calidad del agua en la unidad hidrográfica. También, la incorporación de nociones básicas de validación por parte de la comunidad facilitó la identificación preliminar de valores atípicos, fortaleciendo el proceso de control de calidad antes de la validación institucional, esto sugiere que el fortalecimiento de capacidades no solo contribuye a la sostenibilidad del monitoreo participativo, sino que también mejora la confiabilidad del dato, permitiendo su integración en herramientas de gestión como los sistemas de alertas tempranas y consolidando un

esquema de gobernanza del recurso hídrico basado en la corresponsabilidad entre comunidad y autoridad ambiental.

**4.2.5.6.1 Registro y transmisión de los datos.** Los datos recolectados durante el monitoreo participativo serán capturados inicialmente en formatos de campo diseñados específicamente para este fin (hojas impresas o formularios digitales). Estos formatos permiten incluir información clave como fecha, hora, ubicación GPS, nombre del monitor responsable, condiciones ambientales, mediciones de parámetro (por ejemplo, OD, conductividad, entre otros) y observaciones cualitativas.

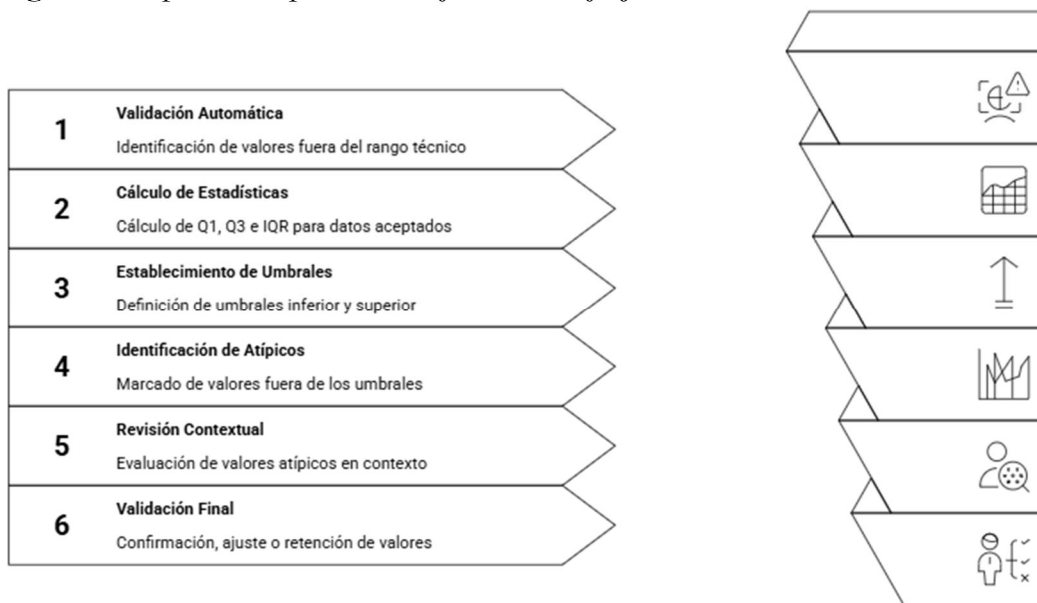
Una vez completados en sitio, los registros serán transmitidos al equipo técnico de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) para su ingreso al sistema de monitoreo y geovisor. Este flujo de datos cumple con los principios de trazabilidad y responsabilidad compartida entre comunidad e institución.

**4.2.5.6.2 Validación técnica de los datos.** La validación de los datos es un paso crítico para garantizar su utilidad y fiabilidad. La estrategia de validación incluirá las siguientes fases; revisión de consistencia básica: Verificación de campos obligatorios, plausibilidad o aceptabilidad de valores, por ejemplo: pH (0 y 14), Temperatura (0.0 a 60.0) °C, Conductividad Eléctrica (0.00 a 6.00 mS/cm) y Sólidos Disueltos Totales (0 a 3000 ppm) y correspondencia de coordenadas geográficas con el punto de muestreo. (Hanna Instruments Colombia, 2019).

En el marco del modelo de monitoreo participativo propuesto para este estudio, la gestión de la información se estructura bajo un esquema de gobernanza del dato en el cual se diferencian claramente los roles de los actores involucrados. En este sentido, la comunidad es responsable de

la recolección de la información y su registro primario mediante formatos estandarizados o herramientas digitales, mientras que la autoridad ambiental (CDMB) asume la validación técnica de los datos, incluyendo la verificación de rangos operativos, análisis estadístico (máximos, mínimos, IQR, etc.) y evaluación de la coherencia espacial y temporal de la información. Posteriormente, los datos validados son integrados en plataformas de acceso público, como el geovisor institucional, desde donde pueden ser utilizados para procesos de análisis, diagnóstico y toma de decisiones, así como para la activación de sistemas de alertas tempranas.

En resumen, el modelo se estructura en seis etapas integran la participación comunitaria con la validación institucional bajo un esquema de gobernanza del dato claramente definido. En este esquema, la comunidad realiza la medición y el registro de la información (formatos o aplicaciones), posteriormente esta es almacenada en un sistema centralizado y validada por la CDMB mediante criterios técnicos y estadísticos como el IQR. Luego, los datos son publicados en una plataforma abierta, lo que permite alimentar un sistema de alertas tempranas basado en umbrales, y finalmente apoyar la toma de decisiones tanto a nivel comunitario como institucional. En la Figura 12, se muestra el esquema del modelo propuesto.

**Figura 12.** *Aplicación práctica en formato de flujo*

**4.2.5.6.3 Ventajas de este enfoque.** Permite una detección sistemática de anomalías en los datos de monitoreo participativo.

Usa criterios estadísticos robustos (cuartiles/IQR) evitando depender sólo del “valor extremo” perceptible.

Mantiene la trazabilidad, transparencia y calidad de los datos para su publicación y uso institucional.

Se integra con los rangos técnicos del equipo HI9814, lo que vincula el control de calidad con la capacidad del instrumento.

Comparación temporal y espacial: Se evaluarán las mediciones en diferentes momentos para identificar tendencias, repeticiones continuas de valores inesperados o errores sistemáticos de un monitor en particular. En el marco del proceso participativo propuesto para la gobernanza del agua en la unidad hidrográfica del Río Tona, el presente estudio propone un componente de análisis estadístico inspirado en el enfoque desarrollado por (Zhindon-Almeida et al., 2024), quienes

aplicaron regresión lineal múltiple y análisis de componentes principales para diagnosticar la calidad del agua en el Estero El Macho (Ecuador).

Para el caso específico del MP en Tona, esta estrategia estadística fue adaptada con el fin de procesar los datos generados por los actores comunitarios, incluyendo perfiles físico-químicos y biológicos del agua con el fin de identificar las variables que explican mayor variabilidad en los resultados y detectar valores atípicos o tendencias emergentes, mediante este tratamiento se buscó no sólo obtener medidas de tendencia central y dispersión, sino también modelar relaciones entre parámetros de calidad y condiciones de uso del territorio, fortaleciendo la evidencia técnica que apoya la participación ciudadana en la gestión hídrica.

Aunque el enfoque participativo plantea retos adicionales de estandarización y control de calidad de los datos, la incorporación del análisis estadístico multivariante aporta rigor al diagnóstico, promueve la transparencia del proceso y sirve como puente entre el conocimiento local y los criterios técnicos para la toma de decisiones en la gobernanza del río.

Verificación cruzada con datos institucionales o de referencia: Cuando sea posible, se contrastarán los valores obtenidos con mediciones oficiales de la CDMB o con bases de datos nacionales para evaluar el sesgo del método participativo. Este enfoque se recomienda en monitoreos híbridos para fortalecer los datos recolectados en campo. Actualmente la CDMB realiza monitoreos en 3 puntos sobre la UH del Río Tona, en dos campañas anuales.

Retroalimentación a los monitores comunitarios: Los resultados de la validación serán comunicados a los participantes para fortalecer la calidad de la toma de datos y mejorar la sistematización.

Plataforma de publicación y salvedades: una vez validados, los datos serán ingresados a la plataforma de acceso público tipo Geovisor de la CDMB que se encuentra en desarrollo,

permitiendo su consulta y descarga para los distintos actores interesados. Es importante mencionar, que se incluirá una salvedad explícita indicando que los datos fueron obtenidos mediante metodologías simplificadas de monitoreo participativo, lo que permite mantener la transparencia sobre el alcance, precisión y contexto de uso. Esto se alinea con las recomendaciones para ciencia ciudadana donde se sugiere etiquetar claramente la “calidad de dato” y su nivel de verificación. (Krick, 2022).

Diagnóstico y comparación normativa: Los datos publicados se utilizarán en un diagnóstico comparativo frente a normativas vigentes para el uso del agua (por ejemplo: objetivos de calidad y normas ambientales vigentes contempladas en el marco normativo del presente estudio). Este análisis permitirá identificar puntos o tramos a priorizar, tendencias de deterioro o mejora, y evaluar el impacto de actividades identificadas en la cuenca. Además, al combinar los resultados del monitoreo comunitario con el análisis institucional, se promueve una gobernanza responsable y participativa del recurso hídrico.

#### ***4.2.6 Análisis de aplicabilidad y condiciones para la réplica en otros territorios de la CDMB***

**4.2.6.1 Elementos transferibles y condiciones específicas de replicabilidad.** La experiencia sistematizada en la cuenca objeto de estudio permite identificar una serie de elementos transferibles que pueden facilitar la réplica en otras unidades hidrográficas en la jurisdicción de la CDMB, a continuación, se enuncian los elementos determinados:

El uso de equipos portátiles de bajo coste y protocolos simplificados para monitoreo comunitario (por ejemplo, kits colorimétricos, tiras reactivas, sensores multiparámetro) que permiten amplitud operativa y participación de actores no especializados, lo cual se reconoce como

un factor clave para el desarrollo de programas de participación ciudadana en calidad del agua. (San Llorente Capdevila et al., 2020).

La estructuración de un flujo: recolección de datos en campo → validación mediante estadística básica → ingreso a plataforma pública. Este modelo se alinea con los marcos de monitoreo participativo donde la estandarización y transparencia permiten la integración de datos comunitarios en esquemas más amplios. (Jollymore et al., 2017)

La capacitación continua de monitores comunitarios, los materiales de soporte técnico y la definición de roles institucionales claros (por ejemplo, validación de datos por la CDMB) aseguran calidad y sostenibilidad del programa. En otras experiencias de replicabilidad de estrategias participativa señalan que la formación y el soporte técnico permanente son fundamentales. (Burgos et al., 2013).

**4.2.6.2 Condiciones específicas de replicabilidad que podrían limitar o modificar la transferencia.** Se identificaron condiciones que se deben analizar de manera particular para cada UH donde se proyecte replicar el ejercicio de Monitoreo Participativo:

Características hidrográficas propias de cada subcuenca (pendiente, vegetación ribereña, accesibilidad) que influyen en la logística de muestreo.

Capacidad institucional local y disponibilidad de redes de actores comunitarios con compromiso para monitorear y reportar.

Recursos tecnológicos y de infraestructura (internet, plataforma de datos, soporte técnico) que permitan la transmisión y validación de datos.

Adaptación a normativas locales o especificidades de calidad del agua, que pueden requerir ajustes en los parámetros monitoreados o la frecuencia de muestreo.

**4.2.6.3 Lineamientos para su adaptación a otras Unidades Hidrográficas de la jurisdicción.** Estas orientaciones permitirían que el modelo de monitoreo participativo implementado por la CDMB en la Uh del Rio Tona, se extienda a otras cuencas de la jurisdicción, preservando los elementos centrales de participación, transparencia y calidad de datos, y adicionalmente adaptándose a las particularidades territoriales de cada unidad hidrográfica. A continuación, se proponen los lineamientos establecidos:

Diagnóstico inicial: evaluar las características físicas, sociales y de infraestructura de la unidad hidrográfica receptora (accesibilidad, actores locales, cobertura del monitoreo, datos de las campañas de monitoreo realizadas por laboratorios acreditados ante el IDEAM; equipamiento disponible). De manera complementaria, este diagnóstico debe permitir identificar las condiciones comunitarias disponibles para el desarrollo del monitoreo participativo, reconociendo las capacidades locales existentes y las brechas en términos de conocimiento técnico, organización social y disponibilidad de actores potenciales para asumir el rol de monitores comunitarios.

Configuración adaptativa del protocolo: Establecer un protocolo base (como el aplicado) pero flexible para ajustarse a las particularidades locales (por ejemplo, ajuste de puntos de muestreo, parámetros prioritarios, frecuencia). En este ítem debe considerar la articulación entre criterios técnicos y condiciones territoriales, asegurando que el diseño del monitoreo sea viable operativamente y pertinente frente a las dinámicas ambientales y sociales de cada unidad hidrográfica.

Selección de monitores comunitarios y fortalecimiento de capacidades: Se debe definir criterios claros para la selección de los monitores comunitarios, con el fin de garantizar la calidad de la información y la sostenibilidad del proceso. Estos criterios deben integrar aspectos técnico-operativos, como la capacidad básica para el manejo de instrumentos de medición y registro de

datos; criterios socioambientales, como la permanencia en el territorio, conocimiento empírico del recurso hídrico y participación en procesos comunitarios; así como criterios de compromiso y disponibilidad para el desarrollo de las actividades de monitoreo. La adecuada selección de los participantes constituye un elemento clave para la replicabilidad del modelo, en la medida en que asegura condiciones mínimas para la generación de datos confiables y la continuidad del proceso en el tiempo.

Capacitación y empoderamiento comunitario: Desarrollar módulos de capacitación estructurados y adaptados al contexto local, bajo un enfoque teórico-práctico orientado al fortalecimiento de capacidades técnicas y a la apropiación social del monitoreo. Estos deben incluir fases de sensibilización sobre la importancia del recurso hídrico y su relación con la calidad de vida, formación técnica en el uso de equipos y toma de muestras, fortalecimiento en el registro y sistematización de la información, y una aproximación básica a la validación e interpretación de los datos. La capacitación no solo facilita la correcta ejecución de las actividades de monitoreo, sino que también contribuye a la generación de capacidades locales para la comprensión y uso de la información, fortaleciendo la participación de la comunidad en procesos de gobernanza del agua y, asimismo, la toma de decisiones.

Plataforma de datos y flujo operativo: garantizar un sistema de recolección de datos (digital o impreso), validación por la CDMB (o entidad regional equivalente para otras jurisdicciones) y publicación de datos abiertos con salvedades metodológicas, este flujo asegura tanto la calidad como la transparencia. Otras experiencias internacionales muestran que la integración de datos ciudadanos en plataformas oficiales potencia la cobertura y legitimidad del monitoreo. (Silva y Valencia, 2026)

Sistema de control de calidad y retroalimentación: Implementar criterios estadísticos y de plausibilidad de datos (como se describe en el capítulo metodológico) que permitan identificar valores atípicos, asegurar consistencia y efectuar ajustes periódicos. También, se deben establecer mecanismos de retroalimentación continua hacia los monitores comunitarios, con el fin de fortalecer sus capacidades y mejorar progresivamente la calidad del dato generado.

Seguimiento, evaluación y adaptación: realizar evaluaciones periódicas del desempeño del programa de monitoreo participativo, considerando variables como cobertura espacial, calidad de los datos, nivel de participación comunitaria y efectividad en la generación de información útil para la toma de decisiones. A partir de estos resultados, se deben realizar ajustes al diseño del monitoreo, reconociendo que la capacidad de adaptación constituye un elemento fundamental para la sostenibilidad de este tipo de procesos, tal como ha sido evidenciado en diferentes experiencias de monitoreo participativo a nivel internacional. (Carlson y Cohen, 2018).

#### **4.3 Definición de parámetros para la implementación de un sistema de alertas tempranas.**

En Colombia, se encuentran instaladas diferentes redes de monitoreo hidro climatológicas en fuentes superficiales generalmente de órdenes superiores (I y II) con alto caudal, operadas por el IDEAM, Autoridades Ambientales y entes o proyectos privados. (IDEAM, 2023).

Un Sistema de Alertas Tempranas (SAT) permite predecir eventos ambientales que puedan afectar el bienestar de la comunidad y los ecosistemas. El diseño de sistemas de alerta temprana comunitario, se basa en la identificación de zonas que presenten riesgo por crecientes de ríos de bajo caudal, como se evidencia en la metodología aplicada en Tabio-Cundinamarca, que a partir de simulaciones hidráulicas establecido superficies de inundación bajo distintos escenarios de flujo constante y con los datos obtenidos de estaciones hidrometereológicas, construyó un análisis

histórico del comportamiento del caudal, para posteriormente definir la localización de los sensores.(Castillo et al., 2020).

La metodología que se usó para parametrizar el SAT en el corregimiento de San Bernardo de Bata en Norte de Santander, se basó en el análisis de datos climáticos e hidrográficos obtenidos tanto de fuentes secundarias como de mediciones, inicio con un diagnóstico técnico para entender las condiciones del terreno y de los eventos registrados, posteriormente se procedió a establecer los umbrales de alerta, relacionando la cantidad de lluvia con la posibilidad que se presenten deslizamientos, usando herramientas estadísticas como Gumbel o Log-normal. Estos valores fueron validados por comparación con eventos pasados y mapas de amenaza de la zona, adicionalmente se instaló una red de pluviómetros artesanales operados por la comunidad, que permitió afinar el SAT con información levantada en campo. En síntesis, el enfoque desarrollado en San Bernardo permitió combinar el conocimiento científico con la experiencia de la comunidad, logrando una herramienta más cercana a la realidad del territorio. (Rojas, 2019).

En el Salvador se diseñó un modelo SAT donde uno de los componentes principales es la Red Social de Observadores Locales, esta estrategia participativa permite no solo la transmisión de datos, sino que también fortalece la participación de líderes comunitarios, quienes mediante capacitaciones y el manejo de herramientas básicas aportan información valiosa para el pronóstico y las acciones de respuesta. Estas redes comunitarias sumadas a la implementación de estaciones de monitoreo y modelos de pronóstico complementan los SAT haciéndolos más efectivos y contextualizados a cada cuerpo de agua. (García, 2013).

La red inalámbrica de monitoreo desarrollada por Castaño et al. (2019), instala una red de biosensores enzimáticos de bajo costo y alta sensibilidad en zonas rurales para detectar contaminantes como pesticidas, metales pesados, bacterias coliformes, Fenoles y otras sustancias

orgánicas tóxicas en zonas rurales para fuentes de agua potable. Aunque estos no reemplazan los métodos tradicionales, su uso permite generar alertas iniciales que pueden activar respuestas tempranas.

En el municipio de Arauca se diseñó un sistema de alerta temprana para inundaciones que combina datos de estaciones hidro climáticas del IDEAM con inteligencia artificial como redes neuronales y modelos neuro difusos. El SAT desarrollado usa variables como nivel, caudal y precipitaciones para generar un modelo matemático del cauce del río, el cual se compara con un modelo inteligente que detecta cambios bruscos en el comportamiento y a partir de esta comparación genera un residuo que permite activar la alerta, enviando un mensaje de texto a las autoridades. El modelo establecido requiere mucha información histórica, no obstante, puede ser eficaz en la predicción de crecientes y servir como base para replicarse en otras cuencas del país. (Cárdenas-Rodríguez et al., 2022).

El SAT desarrollado para el municipio de Mocoa, es considerado uno de los más avanzados en Colombia en cuanto al enfoque técnico y metodológico, este se diseñó luego del desastre de 2017, y combina modelos físicos, análisis probabilísticos y sensores de nivel para establecer umbrales de alerta por avenidas torrenciales, además toma en cuenta variables como la precipitación acumulada, intensidad y duración del aguacero y niveles de caudal en puntos críticos. Aunque requiere ajustes permanentes, este diseño permite reducir la vulnerabilidad y mejorar la capacidad de respuesta comunitaria frente a eventos extremos. (Ramos-Cañón et al., 2023).

El estudio realizado en Subachoque Cundinamarca, buscó crear una alerta agroclimática temprana (AATP) para la toma de las decisiones de siembra de papa criolla ante los cambios del clima, a través de un análisis de temperatura y lluvia e incluyendo las experiencias de los agricultores de la zona, encontrando que hay un aumento de temperatura y déficit de agua en meses

claves y a partir de esto se construyó un calendario de siembra participativo, proponiendo marzo y agosto como los meses más apropiados. La estrategia combinó un análisis de históricos y saber local para adaptar el cultivo a la variabilidad climática. (Camacho et al., 2020)

En el trabajo desarrollado por Fernández Ortega et al. (2023), se analizó un evento de crecida en el manantial de Cornicabra, en la Sierra de Ubrique (Cádiz), con el objetivo de identificar la relación entre turbidez, presencia de bacterias como *E. coli* y la distribución del tamaño de partículas. Los resultados evidencian que los episodios de lluvia intensa generan un aumento rápido del caudal y de la turbidez, lo cual coincide con la detección de actividad bacteriana significativa. Esto sugiere que la entrada de aguas superficiales contaminadas puede movilizar sedimentos y microorganismos al sistema kárstico. Además, se discute que el uso de sensores para el monitoreo continuo permitiría establecer sistemas de alerta temprana eficaces para prevenir la contaminación en captaciones de agua potable, aunque se requiere mejorar la selección de parámetros para cada sistema acuífero.

El informe de práctica empresarial desarrollado por Díaz Fernández (2024) en Corantioquia resalta la importancia del fortalecimiento técnico en la gestión del riesgo y el cambio climático a nivel regional, a través de la participación en visitas técnicas y actualización de bases de datos de amenazas, la autora contribuyó al seguimiento de puntos críticos por fenómenos como movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en los municipios de la jurisdicción, también se resalta la implementación y mejora de sistemas de alertas tempranas (SAT) mediante convenios interinstitucionales, lo que permitió aumentar la capacidad de respuesta ante eventos amenazantes.

El diseño de un SAT comunitario no solo representa una estrategia técnica, sino una herramienta de gobernanza que articula el saber local con las directrices institucionales de gestión

del riesgo y aunque el diseño representa una viabilidad técnica, es necesario una validación en campo y apoyo institucional para su escalabilidad.

#### ***4.3.1 Análisis de resultados monitoreo participativo (2022-2023)***

El análisis estadístico de los datos generados en el monitoreo participativo se fundamenta en la hipótesis de que existen diferencias espaciales significativas en la calidad del agua a lo largo de los puntos de monitoreo de la Unidad Hidrográfica del río Tona, asociadas a presiones antrópicas como vertimientos domésticos y actividades agropecuarias.

En este sentido, se plantea que los puntos ubicados aguas abajo de fuentes de contaminación presentan una mayor variabilidad en los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, así como una mayor presencia de valores atípicos en analitos como conductividad eléctrica, nutrientes y *E. coli*, en comparación con puntos de referencia ubicados aguas arriba.

En este sentido, el uso de herramientas estadísticas como el análisis descriptivo, la evaluación de rangos intercuartílicos (IQR) y el análisis por parámetro permite identificar patrones espaciales, detectar datos atípicos y establecer relaciones entre la calidad del agua y las condiciones de uso del territorio, aportando sustento técnico a la interpretación de los resultados obtenidos en el marco del monitoreo participativo.

La presentación de los datos obtenidos en el proceso de monitoreo participativo corresponde al periodo comprendido entre agosto de 2022 y diciembre de 2023, el cual fue seleccionado debido a que constituye el rango temporal con mayor continuidad y disponibilidad de registros fiables para la Unidad Hidrográfica del Río Tona, este intervalo concentra la información más accesible y organizada que fue posible consolidar junto con las comunidades y actores locales, lo que permitió contar con una base técnica suficiente para analizar tendencias

generales y variaciones puntuales de los parámetros monitoreados. Además, para este estudio resultó relevante que durante dicho periodo se cuenta también con campañas de monitoreo realizadas por laboratorios acreditados ante el IDEAM, posibilitando ejercicios de comparación que fortalecen la validación de los datos comunitarios. También es importante señalar que, por razones ajenas al componente estrictamente técnico, no ha sido posible mantener la misma continuidad de los registros después de 2023; por lo tanto, este rango temporal se asume como la mejor ventana disponible para sustentar los análisis de la presente investigación.

Los monitoreos in situ realizados, constituyen un elemento esencial para el fortalecimiento de los sistemas comunitarios de alerta temprana, ya que permiten registrar directamente en el punto parámetros como pH, conductividad, turbidez y oxígeno disuelto, capturando cambios rápidos que pueden ser determinantes para anticipar eventos de deterioro en la calidad del agua, esta modalidad de medición ayuda a reducir tiempos y costos logísticos, evitando procesos más largos asociados al transporte de muestras o al acceso a laboratorios especializados; al mismo tiempo, promueve una mayor participación y apropiación comunitaria en el seguimiento del recurso hídrico. En estudios recientes se demuestra que, a partir de estos datos continuos, es posible modelar la dinámica de nutrientes, como las concentraciones de nitrato, generando información útil para una gestión adaptativa del territorio y a un costo relativamente bajo para las comunidades (Kermorvant et al., 2023).

En conjunto aspectos como la consolidación del periodo seleccionado y la incorporación de mediciones in situ permiten construir una base de datos para avanzar hacia el análisis estadístico de los parámetros monitoreados en esta etapa del proceso con miras a establecer lineamientos para dar continuidad al ejercicio a medida que se vayan generando más datos.

La combinación de registros puntuales, comparaciones con campañas acreditadas y observaciones continuas en campo ofrece una visión más completa del comportamiento del agua en la Unidad Hidrográfica del Río Tona, facilitando identificar patrones, tendencias temporales y posibles episodios anómalos que requieren atención, ya con este insumo estructurado, se da paso al análisis estadístico planteado, donde se organizan los valores obtenidos, se presentan tablas y gráficas, y se discuten los principales hallazgos derivados del monitoreo participativo.

La validación de los datos del monitoreo participativo se realizó en tres niveles complementarios: consistencia instrumental, coherencia estadística interna y comparación con datos de laboratorios acreditados y con las normas vigentes de calidad del agua en Colombia.

En primer lugar, se efectuó una depuración básica de los registros de campo, verificando que los valores se encontraran dentro del rango técnico de los instrumentos utilizados (kits colorimétricos, multiparámetro portátil y termómetro). Se identificaron casos claramente imposibles, como valores de pH cercanos a 21 en el punto Palmar, que exceden el rango teórico de medición (2–16) del equipo y fueron catalogados como datos atípicos instrumentales y excluidos del análisis posterior. Este tipo de filtro es coherente con las recomendaciones metodológicas para monitoreos comunitarios participativos de calidad de agua, donde se enfatiza la importancia de combinar la lectura de equipos con revisiones de plausibilidad básica y bitácoras de campo. (Miranda y Mesa, 2016)

En segundo lugar, se aplicó una validación estadística univariada para cada parámetro y punto de monitoreo, calculando medidas de tendencia central (media aritmética, mediana), dispersión (desviación estándar, rango intercuartílico) y extremos (mínimo y máximo).

En tercer lugar, se definieron los umbrales para la identificación de valores potencialmente atípicos a partir del rango intercuartílico (IQR) del Método Tukey, aplicando los criterios Q1 –

$1,5 \cdot IQR$  y  $Q3 + 1,5 \cdot IQR$ . (Schwertman y de Silva, 2007). Los registros que quedaron por fuera de estos límites fueron revisados con base en las condiciones específicas de muestreo, las observaciones consignadas en campo y la estabilidad de los equipos utilizados, de esta manera se establece el proceso de validación de los datos, combinando un criterio estadístico con la verificación contextual necesaria para garantizar que los valores aceptados representen de manera fiel la dinámica real del sistema hídrico monitoreado.

Este procedimiento integral resulta especialmente relevante para la parametrización del Sistema de Alertas Tempranas (SAT), ya que asegura que los umbrales, tendencias y comportamientos críticos que alimentarán el sistema se fundamenten en información depurada, confiable y técnicamente coherente. (Filzmoser y Todorov, 2011)

Los resultados obtenidos durante el monitoreo participativo desde agosto de 2022 hasta diciembre de 2023 se presentan para cada uno de los parámetros medidos en el periodo conforme a lo establecido en el plan de monitoreo, es importante mencionar que este periodo se tomó con el objetivo de estructurar el ejercicio participativo en la UH del Río Tona y cabe resaltar que durante este tiempo hubo algunas intermitencias en la frecuencia de los monitoreos causada por factores como disponibilidad de transporte, fenómenos climáticos como lluvias torrenciales y logística de los insumos.

**4.3.1.1 Caudal volumétrico.** En la Tabla 14, se presentan los datos calculados de caudal a partir de las actividades de campo previamente realizadas.

**Tabla 14.** *Resultados de los caudales calculados a partir de los datos de MP (2022-2023)*

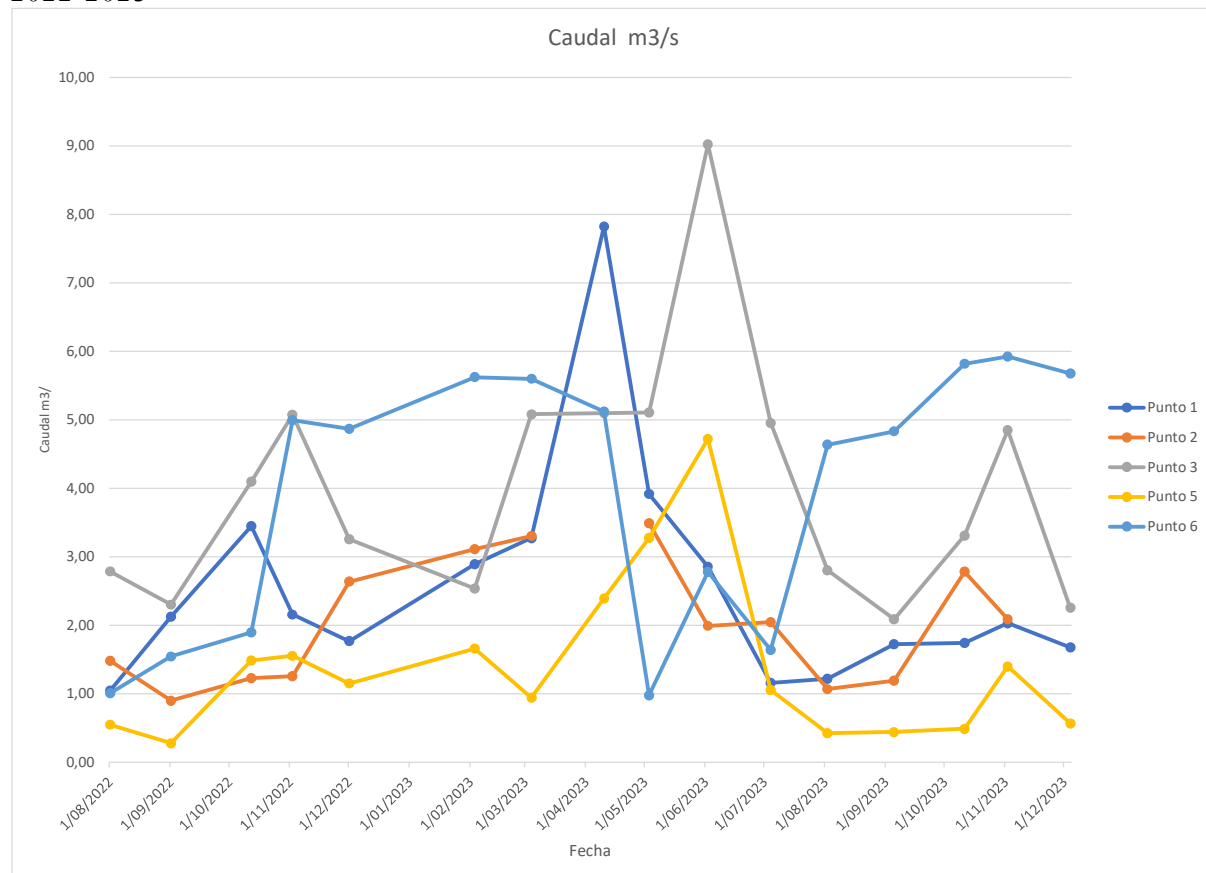
Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
Fecha	Qm <sup>3</sup> / <sub>s</sub>	Fecha	Qm <sup>3</sup> / <sub>s</sub>	Fecha	Qm <sup>3</sup> / <sub>s</sub>	Fecha	Qm <sup>3</sup> / <sub>s</sub>	Fecha	Qm <sup>3</sup> / <sub>s</sub>	Fecha	Qm <sup>3</sup> / <sub>s</sub>
1/08/2022	1,05	2/08/2022	1,48	1/08/2022	2,79	3/08/2022	0,57	1/08/2022	0,55	16/08/2022	1,01



Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
Fecha	Qm <sup>3</sup> / <sub>s</sub>	Fecha	Qm <sup>3</sup> / <sub>s</sub>	Fecha	Qm <sup>3</sup> / <sub>s</sub>	Fecha	Qm <sup>3</sup> / <sub>s</sub>	Fecha	Qm <sup>3</sup> / <sub>s</sub>	Fecha	Qm <sup>3</sup> / <sub>s</sub>
20/11/2023	4,52	20/11/2023	2,73								
5/12/2023	1,68	5/12/2023	1,74								
19/12/2023	1,34	19/12/2023	1,29								

En la Figura 13 se muestra los resultados obtenidos al calcular el caudal a partir de los datos tomados en campo.

**Figura 13.** Caudal calculado a partir del aforo volumétrico por MP en cada punto en el periodo 2022-2023



En la Tabla 15, se presentan el análisis estadístico construido con los datos calculados para el caudal.

**Tabla 15.** *Análisis estadístico para el Caudal de los datos de MP en todos los puntos*

<b>Punto</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Rango</b>	<b>Desv. Std</b>	<b>Q1</b>	<b>Q3</b>	<b>IQR</b>
<b>P1</b>	2,45	1,90	1,02	7,82	6,80	1,57	1,39	2,86	1,47
<b>P2</b>	2,29	2,02	0,90	6,89	5,99	1,30	1,25	2,74	1,50
<b>P3</b>	4,04	3,71	2,09	9,02	6,93	1,77	2,73	5,07	2,35
<b>P4</b>	1,20	1,42	0,27	2,62	2,35	0,72	0,53	1,60	1,07
<b>P5</b>	1,40	1,10	0,28	4,72	4,44	1,20	0,54	1,58	1,04
<b>P6</b>	3,61	4,74	0,98	5,92	4,94	1,96	1,57	5,30	3,73

Los datos para el caudal representados en la Figura 13, interpretados a partir de la ubicación espacial de los puntos de monitoreo en la UH del Río Tona, evidencia que las crecientes no se presentan de manera simultánea a lo largo del cauce, lo cual resulta determinante para la estructuración del Sistema de Alertas Tempranas (SAT).

En la parte alta del río, el punto P1 (sector El Palmar) registra las condiciones más naturales del sistema hídrico, previo al ingreso al casco urbano de Tona, a continuación, en P2, ubicado inmediatamente después de la descarga sin tratamiento del casco urbano, se observa una señal hidrológica más variable, influenciada tanto por aportes domésticos como por modificaciones de la geometría del cauce en el tramo urbano.

Hacia la zona media, el punto P3 (El Carrizal) refleja un comportamiento más integrado, resultado de la confluencia de aportes secundarios provenientes de pequeñas quebradas y drenajes intermitentes que incrementan gradualmente el caudal del río Tona. Por su parte, los puntos P4 (Quebrada Golondrinas) y P5 (Quebrada Arnanía) representan tributarios de menor caudal, cuyo comportamiento hidrológico es más estable y amortiguado; su menor capacidad de aporte hace que las crecientes en estas quebradas no necesariamente coincidan con los pulsos o alteraciones registrados en el cauce principal.

Finalmente, el punto P6, localizado en el tramo bajo del río antes de su descarga al embalse de la Represa de Tona, integra todas las variaciones provenientes de la parte alta, de la zona urbana

y de los aportantes secundarios. Esto produce una señal más amplia y suavizada, propia de los tramos antes de un cuerpo de almacenamiento.

En síntesis, esta configuración espacial confirma que cada punto cumple un rol estratégico: P1 y P2 funcionan como indicadores tempranos de variaciones abruptas; P3 permite observar la integración progresiva del sistema hídrico; P4 y P5, por ser aportantes de bajo caudal, contribuyen al entendimiento fino de la dinámica lateral; y P6 valida la magnitud real del evento y su propagación hacia el embalse, permitiendo establecer umbrales diferenciados dentro del SAT.

El análisis estadístico comparativo de los caudales registrados en los seis puntos del monitoreo participativo permite identificar patrones diferenciales de comportamiento hidrológico dentro de la Unidad Hidrográfica del río Tona, a pesar de que todos los puntos se encuentran en un mismo sistema fluvial, las condiciones locales, los aportes laterales y la geomorfología generan respuestas muy distintas frente a los eventos de lluvia, algo que es clave para el diseño del sistema de alertas tempranas (SAT) comunitario.

En términos generales, los Puntos 3 y 6 muestran los caudales más altos y una variabilidad muy marcada.

En el caso de P3 (Carrizal), los valores máximos alcanzan  $9,02 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que el IQR ( $2,35 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y la desviación estándar ( $1,77 \text{ m}^3/\text{s}$ ), estos resultados reflejan cambios fuertes entre las diferentes épocas del año, por tanto, este punto se comporta como un tramo altamente sensible, donde cualquier crecida se magnifica rápidamente.

En el P6 ocurre algo parecido: el rango intercuartílico es el mayor de todos ( $3,73 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y la dinámica del caudal sugiere que este sector absorbe aportes significativos o responde de forma rápida ante tormentas. Es importante resaltar que, a partir de los resultados, estos dos puntos deberían priorizarse en la instalación de sensores automáticos o mediciones de alta frecuencia.

Por otro lado, los Puntos 4 (Golondrinas) y 5 (Armania) presentan un régimen hidrológico más estable y previsiblemente controlado, lo cual es consecuente con estos afluentes de menor caudal que el Río Tona; sus promedios se mantienen cercanos a 1–1,4 m<sup>3</sup>/s, y sus límites superiores estadísticos ( $\approx 3,19$  y 3,14 m<sup>3</sup>/s) respectivamente, en este sentido esta dinámica permite identificar con facilidad cuándo ocurre un evento anómalo.

Los Puntos 1 y 2 se ubican en un rango intermedio, combinando episodios de caudal elevado con periodos estables. El Punto 1 registra el valor más alto de toda la serie (7,82 m<sup>3</sup>/s), pero su mediana (1,90 m<sup>3</sup>/s) indica que no es un comportamiento constante sino más bien esporádico. Mientras tanto, el Punto 2 presenta valores faltantes por condiciones climáticas adversas, lo cual confirma la importancia de tener redundancia en la red de monitoreo para evitar vacíos en la serie.

Los límites derivados del método de Tukey sirven como base para definir niveles de alerta preliminares: “atención” cuando el caudal se acerca al Q3, “prevención” al pasar al rango superior, y “alerta” si supera el límite estadístico definido. Esta propuesta garantiza un SAT más adaptativo, sensible y apropiado a las condiciones reales de la cuenca, aumentando la capacidad de reacción frente a crecidas súbitas o escenarios hidrológicos críticos.

**4.3.1.2 pH:** en la tabla 16; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presentan los datos medidos de pH

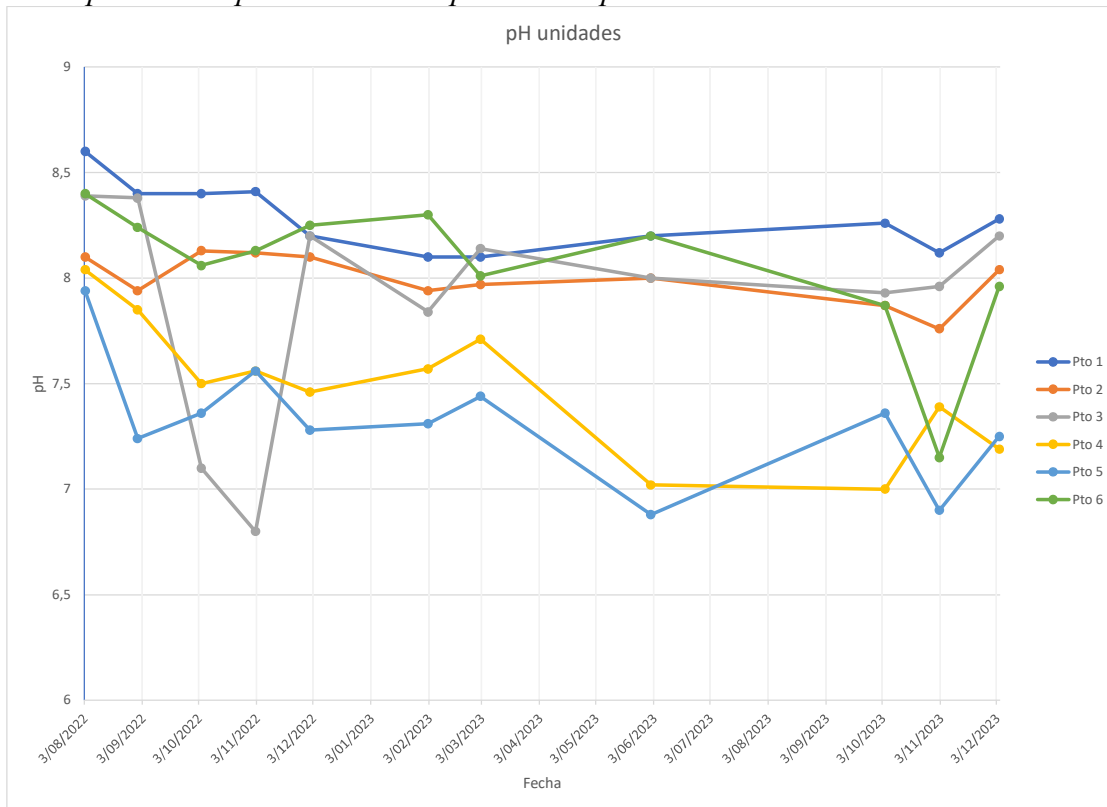
**Tabla 16.** *Resultados de pH medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)*

Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
Fecha	pH	Fecha	pH	Fecha	pH	Fecha	pH	Fecha	pH	Fecha	pH
1/08/2022	8,6	2/08/2022	8,1	1/08/2022	8,3	3/08/2022	8,0	1/08/2022	7,9	16/08/202	8,4
	0		0		9		4		4		0
16/08/202	8,4	17/08/202	7,9	1/09/2022	8,3	31/08/202	7,8	1/09/2022	7,2	31/08/202	8,2
2	0	2	4		8	2	5		4	2	4
6/09/2022	8,4	1/09/2022	8,1	12/10/202	7,1	4/10/2022	7,5	12/10/202	7,3	15/09/202	8,0
	0		3		2		0		2		6

Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
15/09/2022	8,4	15/09/2022	8,1	1/11/2022	6,8	2/11/2022	7,5	2/11/2022	7,5	29/09/2022	8,1
2	1	2	2		0		6		6	2	3
4/10/2022	8,2	7/10/2022	8,1	2/12/2022	8,2	1/12/2022	7,4	1/12/2022	7,2	15/11/2022	8,2
	0		0		0		6		8	2	5
19/10/2022	8,1	19/10/2022	7,9	2/02/2023	7,8	2/02/2023	7,5	3/02/2023	7,3	29/11/2022	8,3
2	0	2	4		4		7		1	2	0
3/11/2022	21,	1/11/2022	7,9	2/03/2023	8,1	2/03/2023	7,7	4/03/2023	7,4	14/12/2022	8,0
	1		7		4		1		4	2	1
16/11/2022	8,2	16/11/2022	8,0	1/04/2023	8,0	1/06/2023	7,0	10/04/2022	6,8	28/12/2022	8,2
2	0	2	0		0		2	3	8	2	0
1/12/2022	8,2	2/12/2022	7,8	3/05/2023	7,9	4/10/2023	7,0	3/05/2023	7,3	6/02/2023	7,8
	6		7		3		0		6		7
16/12/2022	8,1	16/12/2022	7,7	1/06/2023	7,9	2/11/2023	7,3	2/06/2023	6,9	16/02/2023	7,1
2	2	2	6		6		9		0	3	5
3/02/2023	8,2	2/02/2023	8,0	4/07/2023	8,2	4/12/2023	7,1	4/07/2023	7,2	1/03/2023	7,9
	8		4		0		9		5		6
17/02/2023	8,3	17/02/2023	7,6	2/08/2023	8,2			2/08/2023	7,2	31/03/2023	7,8
3	2	3	2		2				8	3	7
7/03/2023	8,0	2/03/2023	7,6	6/09/2023	8,2			5/09/2023	6,9	1/04/2023	7,5
	7		4		4				2		0
31/03/2023	8,2	15/03/2023	7,6	11/10/2023	8,1			11/10/2023	7,3	11/05/2023	7,3
3	2	3	9	3	3			3	7	3	5
14/04/2023	8,0	1/04/2023	8,0	2/11/2023	7,8			2/11/2023	7,1	6/06/2023	8,1
3	9		1		6				9		6
28/04/2023	8,4	18/04/2023	7,8	5/12/2023	8,0			4/12/2023	7,2	4/07/2023	8,3
3	0	3	5		9				1		0
2/05/2023	8,2	2/05/2023	8,0							1/08/2023	8,2
	2		2								9
17/05/2023	8,2	17/05/2023	8,0							6/09/2023	8,4
3	4	3	7								0
1/06/2023	8,1	1/06/2023	7,8							11/10/2023	6,8
	3		8							3	0
15/06/2023	8,4	15/06/2023	8,0							17/10/2023	7,8
3	8	3	3							3	7
1/08/2023	8,1	1/08/2023	7,9							2/11/2023	7,7
	0		6								4
17/08/2023	8,5	17/08/2023	8,1							18/12/2023	7,9
3	2	3	2							3	4
5/09/2023	8,5	5/09/2023	7,9								
	1		9								
19/09/2023	8,5	19/09/2023	8,1								
3	0	3	5								
4/10/2023	8,1	4/10/2023	7,9								
	2		6								
17/10/2023	8,4	19/10/2023	8,0								
3	5	3	3								
3/11/2023	8,1	3/11/2023	7,8								
	8		4								
20/11/2023	8,4	20/11/2023	7,8								
3	0	3	5								
5/12/2023	8,1	5/12/2023	7,9								
	2		7								
19/12/2023	8,0	19/12/2023	7,9								
3	3	3	0								

En la Figura 14 se muestra los resultados obtenidos a partir de las mediciones de pH en campo.

**Figura 14.** pH medido por MP en cada punto en el periodo 2022-2023



En la tabla 17, se presentan el análisis estadístico construido con los datos calculados para el caudal.

**Tabla 17.** Análisis estadístico de los datos medidos de pH en los puntos de MP

Punto	Media	Mediana	Min	Max	Rango	Q1	Q3	IQR	Desv.Est
<b>P1</b>	8.27	8.22	8.03	8.52	0.49	8.12	8.40	0.28	0.13
<b>P2</b>	7.96	7.97	7.62	8.15	0.53	7.85	8.03	0.18	0.14
<b>P3</b>	8.02	8.06	6.80	8.39	1.59	7.86	8.20	0.34	0.41
<b>P4</b>	7.42	7.50	7.00	8.04	1.04	7.19	7.57	0.38	0.30
<b>P5</b>	7.29	7.31	6.88	7.94	1.06	7.19	7.37	0.18	0.27
<b>P6</b>	7.93	7.96	6.80	8.40	1.60	7.74	8.20	0.46	0.49

El análisis comparativo del pH en los seis puntos del monitoreo participativo evidencia una notable estabilidad en el sistema, manteniéndose dentro de rangos típicos para corrientes de agua

de montaña (aproximadamente. 7,0–8,5).(Larrotta Ballesteros, 2020) Sin embargo, existen diferencias espaciales relevantes que aportan información clave para el diseño del Sistema de Alertas Tempranas (SAT) comunitario.

Los Puntos 1 y 3 muestran los valores más altos de pH, con medianas alrededor de 8,20, lo cual sugiere una mayor presencia de procesos de alcalinización, asociados posiblemente a la geología local o a mayor turbulencia y oxigenación del agua. Estos puntos mantienen una variabilidad baja, lo que permite identificar rápidamente si ocurre un evento anómalo como vertimientos puntuales o descargas no controladas.

En contraste, los Puntos 4 y 5 presentan los valores más bajos del conjunto, con medias entre 7,29 y 7,42, aunque siguen dentro de rangos normales, su menor pH podría estar relacionado con aportes de suelo, escorrentía agrícola o zonas de menor capacidad tampón. La variabilidad también es más alta en estos puntos, indicando que el pH responde con más cambios a eventos de lluvia o procesos erosivos.

Por su parte, el Punto 6 combina un pH ligeramente más alto con una variabilidad notablemente mayor (IQR de 0.46), lo que lo convierte en un sitio estratégico para la vigilancia de cambios súbitos. Este comportamiento puede estar asociado a mezclas de caudales, cambios en el aporte subterráneo o incluso influencia de usos productivos en el entorno.

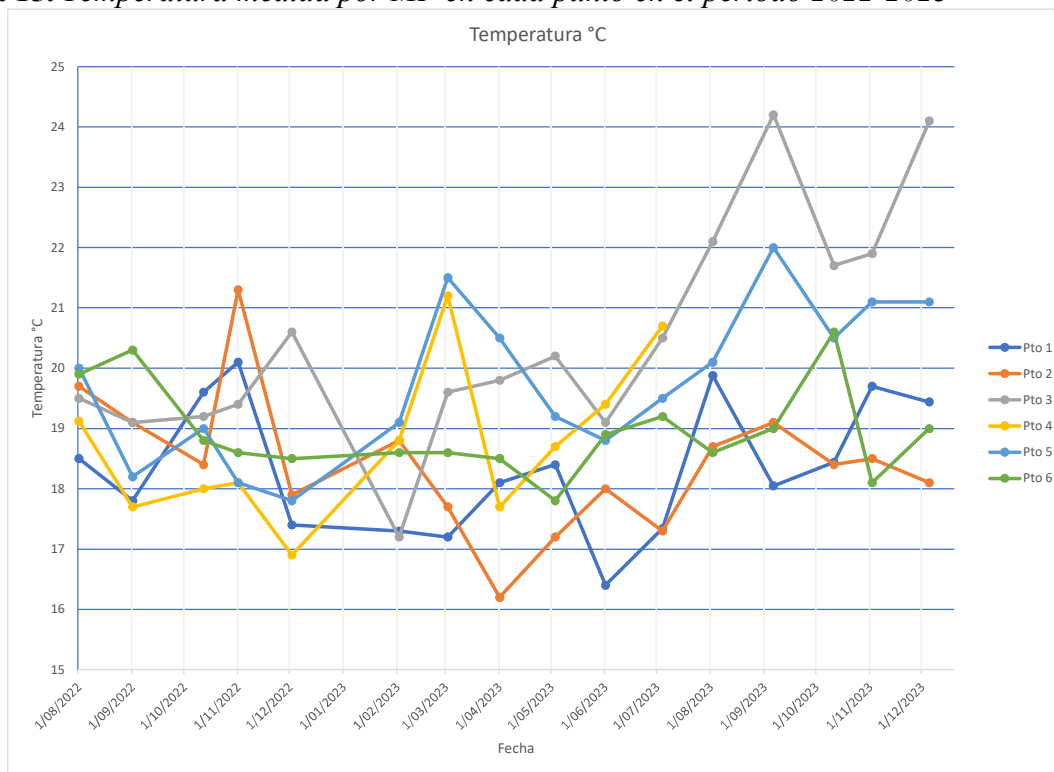
Finalmente, la estabilidad general del pH en todos los puntos respalda la confiabilidad de los registros comunitarios y establece una línea base sólida para el SAT. Las desviaciones significativas del pH, en especial disminuciones abruptas por debajo de 7,0 o incrementos por encima de 8,5 deberían considerarse señales de alerta para activar verificación rápida por parte de la comunidad o la autoridad ambiental.



Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
Fecha	Temperatura (°C)	Fecha	Temperatura (°C)	Fecha	Temperatura (°C)	Fecha	Temperatura (°C)	Fecha	Temperatura (°C)	Fecha	Temperatura (°C)
19/09/2023	21,00	19/09/2023	20,20								
4/10/2023	18,70	4/10/2023	18,10								
17/10/2023	21,10	19/10/2023	20,60								
3/11/2023	19,40	3/11/2023	18,60								
20/11/2023	15,40	20/11/2023	17,70								
5/12/2023	19,30	5/12/2023	18,10								
19/12/2023	20,60	19/12/2023	17,80								

En la **Figura 15** se muestra los resultados obtenidos a partir de las mediciones de temperatura en campo como se explica en el numeral 4.2.5.5.3 del presente documento.

**Figura 15.** Temperatura medida por MP en cada punto en el periodo 2022-2023



En la Tabla 19, se presentan el análisis estadístico construido con los datos medidos para la temperatura.

**Tabla 19.** *Análisis estadístico de los datos medidos de temperatura en los puntos de MP*

Punto	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Rango	Desv. Std	Q1	Q3	IQR
P1	18,19	18,42	15,40	21,10	5,70	1,21	17,36	19,58	2,22
P2	18,64	18,55	16,20	21,30	5,10	1,16	17,90	19,20	1,30
P3	20,51	20,00	17,20	24,10	6,90	1,87	19,35	21,75	2,40
P4	19,40	19,12	16,90	22,00	5,10	1,59	18,05	20,90	2,85
P5	19,78	19,75	17,80	22,00	4,20	1,27	18,95	20,65	1,70
P6	18,58	18,90	17,80	21,40	3,60	0,86	18,58	19,05	0,47

El análisis integral del parámetro temperatura, considerando tanto la representación gráfica de la serie temporal como los resultados estadísticos descriptivos obtenidos para cada punto de monitoreo, permite una comprensión más profunda y detallada de la dinámica térmica que presenta el río en el periodo evaluado. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observan fluctuaciones que responden a patrones estacionales y a condiciones micro ambientales muy particulares de cada tramo, con una tendencia general donde las temperaturas medias se ubican entre aproximadamente 18 °C y 20,5 °C, estas variaciones están influenciadas por factores como la cobertura vegetal, la interacción del cauce con la radiación solar directa, y también los episodios de reducción de caudal que pueden amplificar la respuesta térmica del sistema. En especial, los puntos P3, P4 y P5 muestran incrementos térmicos más notorios durante la segunda mitad del año analizado, mientras que P1, P2 y P6 tienen un comportamiento más amortiguado y estable, sugiriendo la presencia de condiciones de mayor regulación térmica o menor exposición directa.

La tabla estadística, que compila los valores de media, mediana, rangos, desviaciones y los cuartiles Q1 y Q3, evidencia diferencias claras en la estructura de variabilidad entre los puntos analizados, los valores del IQR permitieron identificar rangos normales de fluctuación térmica,

donde P4 y P3 presentaron las amplitudes más elevadas, indicando que estos puntos responden con mayor sensibilidad a los cambios ambientales inmediatos. Por el contrario, el punto P6 evidencia un IQR considerablemente más reducido, lo que demuestra una estabilidad térmica superior, aunque no exenta de variaciones puntuales que pueden deberse a la interacción de factores como profundidad local o sombreado permanente.

La lectura combinada, entre gráfica y estadística permite deducir que la dinámica térmica del río es heterogénea en el espacio y en el tiempo, y que estas diferencias no son solamente resultado del clima regional, sino de procesos hidrológicos propios de cada segmento del cauce que afectan la disipación y retención de calor.

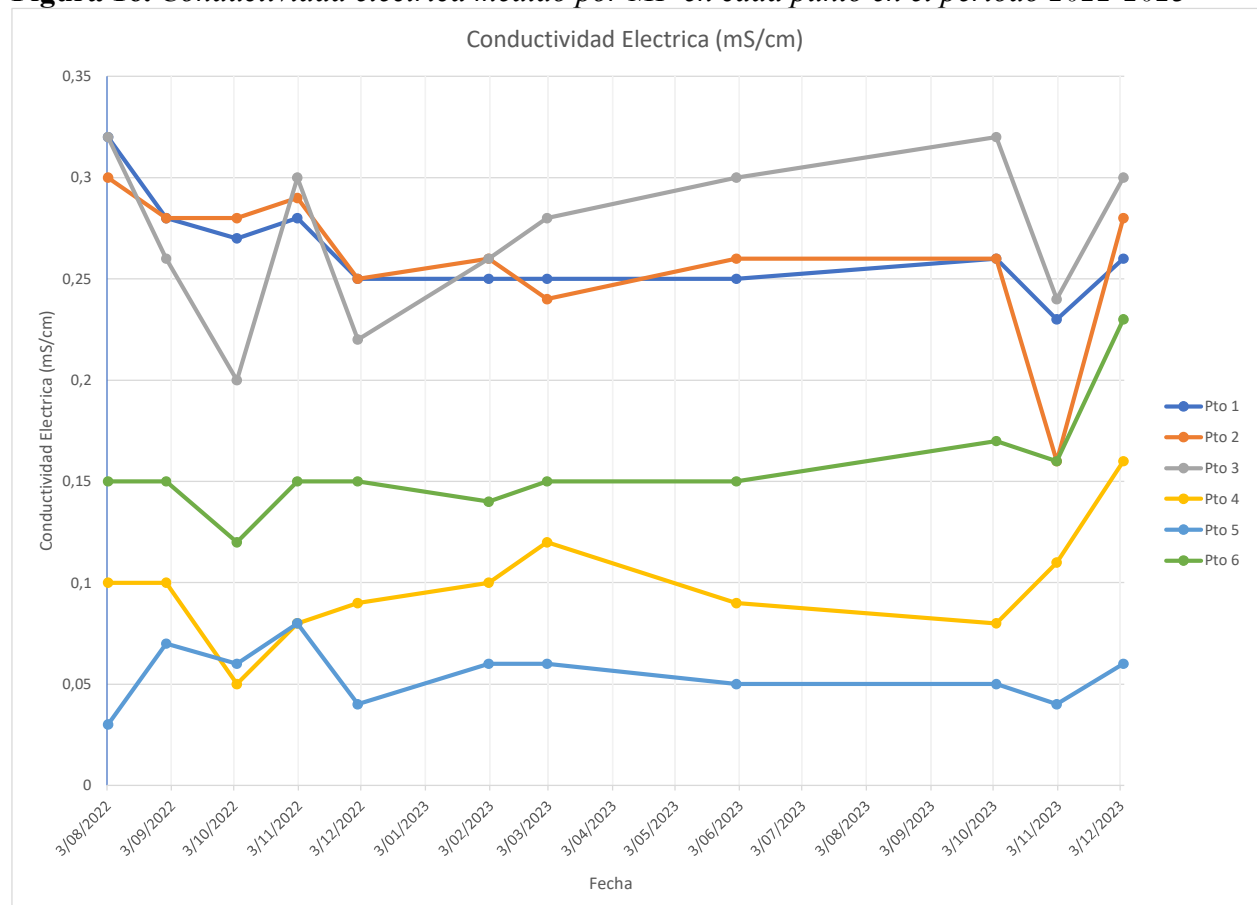
En el marco de la implementación del Sistema de Alertas Tempranas (SAT), la caracterización estadística detallada del parámetro temperatura adquiere una relevancia mucho más técnica, esto debido a que la temperatura funciona como un indicador primario de alteraciones en la dinámica biofísica del río, afectando procesos como la solubilidad del oxígeno disuelto, la tasa metabólica de organismos acuáticos y la velocidad de ciertas reacciones químicas espontáneas que pueden modificar la calidad del agua. Por lo tanto, el comportamiento térmico identificado en cada punto, junto con los valores de dispersión y tendencia, constituye una base metodológica para definir umbrales operativos que permitan discriminar entre fluctuaciones naturales del sistema y eventos que requieren la activación del SAT, si esta información posibilita establecer intervalos de referencia, detectar anomalías que surgen por encima o por debajo de los rangos normales establecidos, y mejorar la capacidad predictiva del monitoreo participativo en la UH río Tona.



Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
Fecha	Conductividad Eléctrica (mS/cm)	Fecha	Conductividad Eléctrica (mS/cm)	Fecha	Conductividad Eléctrica (mS/cm)	Fecha	Conductividad Eléctrica (mS/cm)	Fecha	Conductividad Eléctrica (mS/cm)	Fecha	Conductividad Eléctrica (mS/cm)
3/11/2023	0,28	3/11/2023	0,22								
20/11/2023	0,27	20/11/2023	0,28								
5/12/2023	0,29	5/12/2023	0,30								
19/12/2023	0,30	19/12/2023	0,29								

En la Figura 16 se muestra los resultados obtenidos a partir de las mediciones de pH en campo.

**Figura 16.** Conductividad eléctrica medido por MP en cada punto en el periodo 2022-2023



En la Tabla 21, se presentan el análisis estadístico construido con los datos medidos de conductividad eléctrica.

**Tabla 21.** *Análisis estadístico de los datos medidos de CE en los puntos de MP*

<b>Punto</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Rango</b>	<b>Desv. Std</b>	<b>Q1</b>	<b>Q3</b>	<b>IQR</b>
<b>P1</b>	0,28	0,27	0,23	0,44	0,21	0,04	0,25	0,30	0,05
<b>P2</b>	0,28	0,27	0,24	0,36	0,12	0,03	0,26	0,29	0,03
<b>P3</b>	0,27	0,26	0,20	0,32	0,12	0,04	0,23	0,30	0,07
<b>P4</b>	0,11	0,10	0,08	0,16	0,08	0,03	0,09	0,12	0,03
<b>P5</b>	0,07	0,06	0,03	0,12	0,09	0,02	0,05	0,09	0,04
<b>P6</b>	0,22	0,18	0,14	0,46	0,32	0,08	0,16	0,25	0,09

La figura Conductividad Eléctrica (CE), acompañada de los parámetros estadísticos, permite identificar un gradiente hidroquímico coherente con la configuración espacial del río Tona y sus tributarios, en el Punto 1, ubicado en Palmar aguas arriba de la descarga del casco urbano, los valores se mantienen estables y con poca dispersión, lo cual confirma un tramo alto con presiones antrópicas mínimas y un comportamiento natural de mineralización. Esto explica que la media (0,28 mS/cm) y la mediana (0,27 mS/cm) se encuentren muy cercanas, reflejando estabilidad temporal.

En el Punto 2, ya aguas abajo del área urbana, se observa una ligera ampliación del rango y la desviación estándar, coherente con aportes domésticos y variaciones en las escorrentías, la gráfica muestra picos sincronizados con los eventos de lluvia y las descargas intermitentes del sistema urbano, lo que justifica la inclusión de umbrales diferenciados para este punto dentro del SAT.

El Punto 3, ubicado en el Carrizal, representa el tramo donde el río empieza a recibir aportes laterales adicionales, el incremento moderado en el IQR (0,07) y el rango de valores (0,20–0,32 mS/cm) evidencia una mayor heterogeneidad, atribuible al tránsito de sedimentos finos y al contacto con microcuencas agrícolas. En la gráfica se observa cómo las fluctuaciones se intensifican, confirmando su rol de tramo de transición hidrológica.

Los Puntos 4 y 5, localizados en las quebradas Golondrinas y Arnania, muestran valores considerablemente más bajos (promedios entre 0,07 y 0,11 mS/cm), su comportamiento, claramente visible en la gráfica como una franja de baja mineralización, responde a la naturaleza de estos tributarios.

El Punto 6, por su parte, corresponde al cauce principal antes del embalse de Tona, su amplio rango (0,14–0,46 mS/cm) y su mayor desviación estándar reflejan la acumulación de aportes desde toda la cuenca media y la gráfica muestra picos más marcados y variaciones abruptas, que deben interpretarse como señales propias del ambiente pre-embalse, donde la disminución de velocidad y la retención parcial generan cambios más rápidos en la concentración de sólidos disueltos.

En conjunto, la integración de gráfica y el análisis estadísticos confirma la funcionalidad de la CE como un parámetro altamente sensible para la lógica del SAT, siempre que se contextualice desde el rol hidrológico real de cada punto, para así evitar interpretaciones falsas que permitan construir umbrales dinámicos que reflejen la complejidad de la cuenca del río Tona.

**4.3.1.5 Sólidos disueltos totales.** En la Tabla 22, se presentan los datos medidos de sólidos disueltos totales.

**Tabla 22 . Resultados de Sólidos Disueltos Totales medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)**

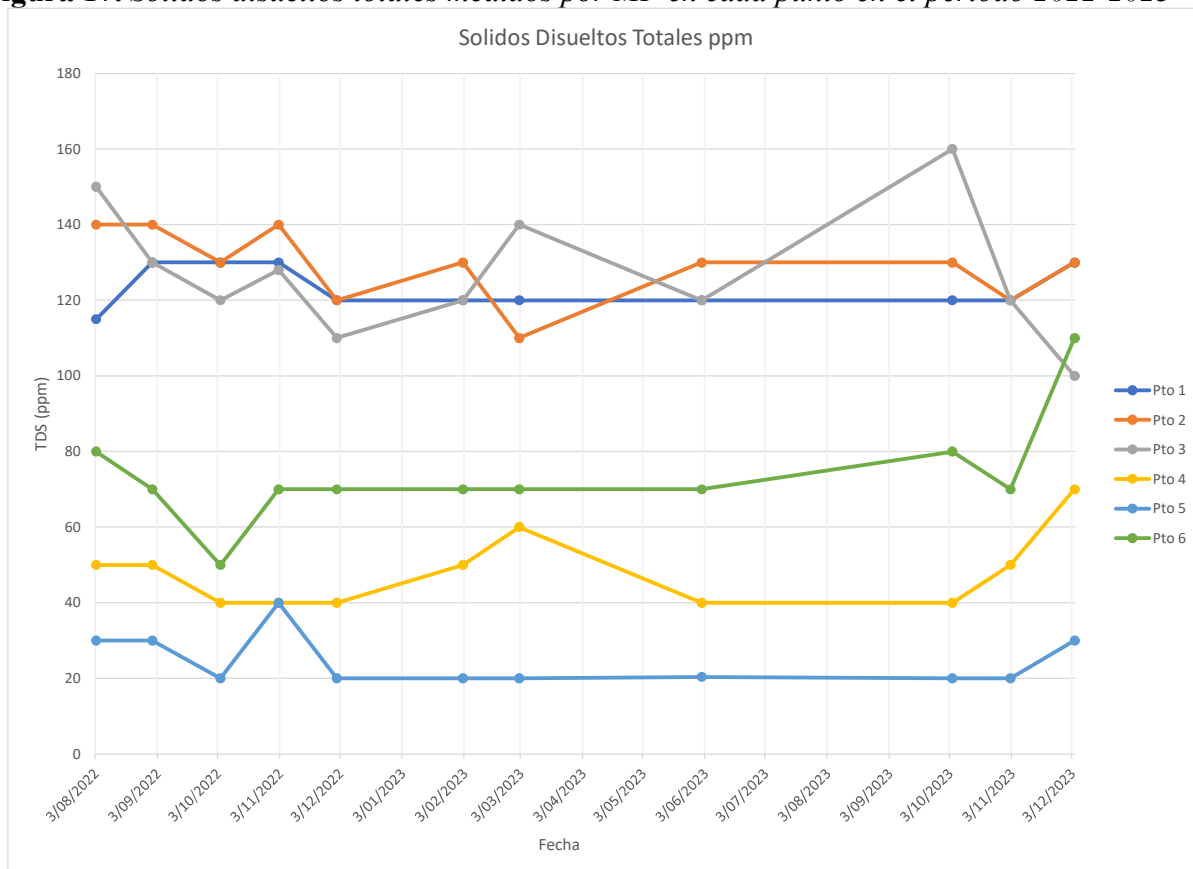
Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
Fecha	TDS (pp m)	Fecha	TDS (pp m)	Fecha	TDS (pp m)	Fecha	TDS (pp m)	Fecha	TDS (pp m)	Fecha	TDS (pp m)
1/08/2022	115	2/08/2022	140	1/08/2022	150	3/08/2022	50	1/08/2022	30	16/08/2022	80
16/08/2022	130	17/08/2022	140	1/09/2022	130	31/08/2022	50	1/09/2022	30	31/08/2022	70
6/09/2022	130	1/09/2022	130	12/10/2022	120	4/10/2022	40	12/10/2022	20	15/09/2022	50



Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
Fecha	TDS (ppm)	Fecha	TDS (ppm)	Fecha	TDS (ppm)	Fecha	TDS (ppm)	Fecha	TDS (ppm)	Fecha	TDS (ppm)
19/12/2023	140	19/12/2023	140								
	23		23								

En la Figura 17 se muestra los resultados obtenidos a partir de las mediciones de solidos disueltos totales SST en campo como se explica en el numeral 4.2.5.5.3 del presente documento.

**Figura 17.** Solidos disueltos totales medidos por MP en cada punto en el periodo 2022-2023



En la Tabla 23, se presentan el análisis estadístico construido con los datos medidos de solidos disueltos totales.

**Tabla 23.** Análisis estadístico de los datos medidos de TDS en los puntos de MP

Punto	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Rango	Desv. Std	Q1	Q3	IQR
P1	136	130	110	200	90	21	120	150	30

<b>P2</b>	<b>134</b>	130	110	170	60	17	120	140	20
<b>P3</b>	<b>123</b>	120	40	160	120	31	110	128	18
<b>P4</b>	<b>48</b>	40	40	70	30	10	40	60	20
<b>P5</b>	<b>30</b>	20	20	80	60	16	20	40	20
<b>P6</b>	<b>113</b>	80	70	240	170	48	80	130	50

El comportamiento de los Sólidos Disueltos Totales (TDS) en la red de monitoreo participativo refleja un patrón espacial coherente con la organización hidrológica del río Tona y sus tributarios. Los valores más elevados se concentran en los puntos ubicados en el cauce principal, mientras que los tributarios presentan concentraciones significativamente menores, confirmando la influencia de la dilución y de las condiciones geoambientales propias de cada subunidad.(Adjovu et al., 2023)

En el Punto 1 (Palmar, aguas arriba del casco urbano) los TDS muestran un comportamiento relativamente estable, con una media cercana a 136 ppm, representativa de un tramo alto con baja presión antrópica directa, en el Punto 2 (aguas abajo del casco urbano) se observa una variabilidad moderada, asociada a aportes domésticos y escorrentías urbanas, aunque sin cambios abruptos que indiquen alteraciones críticas del sistema y el Punto 3 (Carrizal) presenta una mayor dispersión y un rango más amplio, evidenciando la influencia de aportantes laterales y procesos de mezcla propios de la parte media de la cuenca.

Los Puntos 4 y 5, ubicados en las quebradas Golondrinas y Arnanía, registran los valores más bajos de TDS (medias inferiores a 50 ppm), lo cual es consistente con su condición de tributarios con alta capacidad de dilución y menor mineralización natural, estos puntos requieren umbrales de referencia independientes dentro del SAT, ya que valores bajos corresponden a su dinámica normal y no a cambios en la calidad del agua.

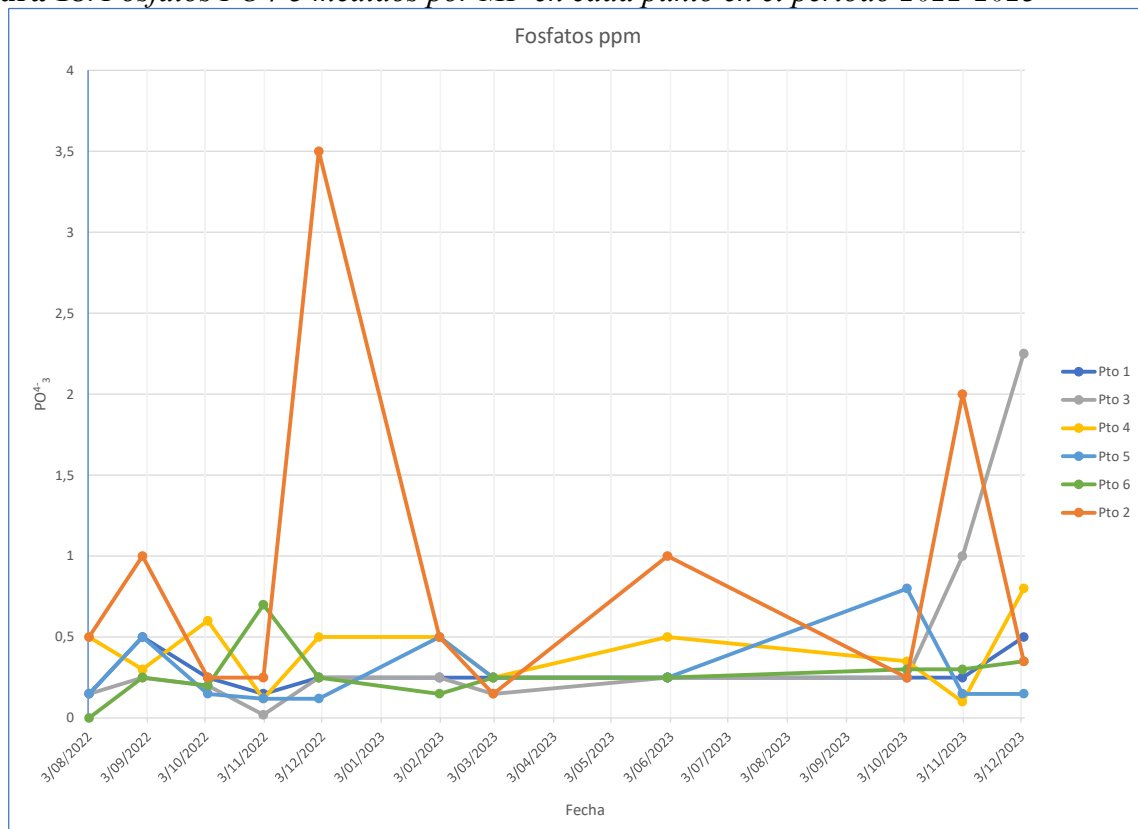
Y por último en el Punto 6, localizado en el cauce principal antes del embalse de Tona, exhibe la mayor variabilidad y los máximos más altos, reflejando la acumulación progresiva de



Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
Fecha	PO <sub>4</sub> <sup>-3-</sup> mg/l	Fecha	PO <sub>4</sub> <sup>-3-</sup> mg/l	Fecha	PO <sub>4</sub> <sup>-3-</sup> mg/l	Fecha	PO <sub>4</sub> <sup>-3-</sup> mg/l	Fecha	PO <sub>4</sub> <sup>-3-</sup> mg/l	Fecha	PO <sub>4</sub> <sup>-3-</sup> mg/l
19/12/2023	0,15	19/12/2023	0,15								

En la Figura 18 se muestra los resultados obtenidos a partir de las mediciones de Fosfatos en campo como se explica en el numeral 4.2.5.5.4 del presente documento.

**Figura 18.** Fosfatos PO<sub>4</sub>-3 medidos por MP en cada punto en el periodo 2022-2023



En la Tabla 25, se presentan el análisis estadístico construido con los datos medidos de fosfatos.

**Tabla 25.** Análisis estadístico de los datos medidos de Fosfatos en los puntos de MP

Punto de monitoreo	Media (mg/L)	Mediana (mg/L)	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Rango (mg/L)	Desv. estándar	Q1 (mg/L)	Q3 (mg/L)	IQR (mg/L)
Punto 1	0,28	0,27	0,23	0,44	0,21	0,04	0,25	0,30	0,05
Punto 2	0,28	0,27	0,24	0,36	0,12	0,03	0,26	0,29	0,03
Punto 3	0,27	0,26	0,20	0,32	0,12	0,04	0,23	0,30	0,07

Punto 4	0,11	0,10	0,08	0,16	0,08	0,03	0,09	0,12	0,03
Punto 5	0,07	0,06	0,03	0,12	0,09	0,02	0,05	0,09	0,04
Punto 6	0,22	0,18	0,14	0,46	0,32	0,08	0,16	0,25	0,09

**4.3.1.7 E-coli.** La Tabla 26, se presenta los resultados obtenidos para el parámetro *Escherichia coli* en los puntos 1 (Palmar), 2 (PTAR) y 6 (Casa Tona) durante el periodo agosto de 2022 a diciembre de 2023.

Este parámetro se evaluó mediante un kit cualitativo de presencia/ausencia, ampliamente utilizado en esquemas de monitoreo comunitario por su facilidad de uso y sensibilidad frente a contaminación fecal reciente, aunque este tipo de ensayo no permite cuantificación en unidades NMP/100 mL, constituye un indicador confiable para identificar episodios de riesgo sanitario, especialmente en zonas rurales donde existen descargas domésticas sin tratamiento y aportes difusos de origen pecuario. (Iwu et al., 2021)

De acuerdo con la Resolución 2115 de 2007, el valor permitido de *E. coli* para agua destinada a consumo humano es cero (0) UFC/100 mL, criterio que, aunque cuantitativo, permite comparar de manera conceptual los resultados cualitativos de presencia/ausencia, por tanto, todo resultado positivo se interpreta como incumplimiento del estándar sanitario representando un riesgo a la salud humana.

**Tabla 26.** Resultados obtenidos de *E coli* en los puntos 1, 2 y 3

Punto 1		Punto 2		Punto 6	
Fecha	Presencia (+)/ Ausencia (-)	Fecha	Presencia (+)/ Ausencia (-)	Fecha	Presencia (+)/ Ausencia (-)
1/08/2022	(-)	2/08/2022	(+)	16/08/2022	(-)
16/08/2022	(-)	17/08/2022	(+)	31/08/2022	(-)
6/09/2022	(-)	1/09/2022	(+)	15/09/2022	(-)
15/09/2022	(-)	15/09/2022	(+)	29/09/2022	(-)
4/10/2022	(-)	7/10/2022	(+)	15/11/2022	(-)
19/10/2022	(-)	19/10/2022	(+)	29/11/2022	(-)
3/11/2022	(-)	1/11/2022	(+)	14/12/2022	(-)
16/11/2022	(-)	16/11/2022	(+)	28/12/2022	(-)

Punto 1		Punto 2		Punto 6	
Fecha	Presencia (+)/ Ausencia (-)	Fecha	Presencia (+)/ Ausencia (-)	Fecha	Presencia (+)/ Ausencia (-)
1/12/2022	(-)	2/12/2022	(+)	6/02/2023	(-)
16/12/2022	(+)	16/12/2022	(+)	16/02/2023	(-)
3/02/2023	(-)	2/02/2023	(-)	1/03/2023	(-)
17/02/2023	(-)	17/02/2023	(-)	31/03/2023	(-)
7/03/2023	(-)	2/03/2023	(-)	1/04/2023	(-)
31/03/2023	(-)	15/03/2023	(-)	11/05/2023	(-)
14/04/2023	(-)	1/04/2023	(-)	6/06/2023	(-)
28/04/2023	(-)	18/04/2023	(-)	4/07/2023	(-)
2/05/2023	(-)	2/05/2023	(-)	1/08/2023	(-)
17/05/2023	(-)	17/05/2023	(-)	6/09/2023	(-)
1/06/2023	(-)	1/06/2023	(-)	11/10/2023	(-)
15/06/2023	(-)	15/06/2023	(+)	17/10/2023	(-)
1/08/2023	(-)	1/08/2023	(-)	2/11/2023	No realizado
17/08/2023	(-)	17/08/2023	(-)	18/12/2023	No realizado
5/09/2023	(-)	5/09/2023	(-)		
19/09/2023	(-)	19/09/2023	(-)		
4/10/2023	(-)	4/10/2023	(-)		
17/10/2023	(-)	19/10/2023	(-)		
3/11/2023	No realizado	3/11/2023	No realizado		
20/11/2023	No realizado	20/11/2023	No realizado		
5/12/2023	No realizado	5/12/2023	No realizado		
19/12/2023	No realizado	19/12/2023	No realizado		

En el Punto 1 Palmar (tramo alto del río): La serie muestra una ausencia casi total de *E. coli*, con solo un evento positivo registrado el 16/12/2022, es decir en total se registran 20 mediciones, de las cuales 19 fueron negativas ( $\approx 96\%$  de cumplimiento). En general el tramo alto presenta una excelente calidad microbiológica, consistente con condiciones de baja presión antrópica, escaso uso doméstico directo y buena autodepuración, respecto al evento positivo de diciembre de 2022, podría asociarse a aumentos de escorrentía, lluvias o ingreso puntual de ganado.(Maes et al., 2025)

En el Punto 2 – PTAR Tona (área de descarga doméstica del casco urbano): Este es el punto con mayor ocurrencia de resultados positivos. Entre agosto de 2022 y diciembre de 2023 el comportamiento se presentó de la siguiente manera:

Primer año (2022): 100% de las muestras fueron positivas (de agosto a diciembre).

Primer semestre 2023: todos los resultados fueron negativos.

Segundo semestre 2023: reaparecen resultados positivos (junio 2023).

En total se registran 11 resultados positivos y 15 resultados negativos y la frecuencia de resultados positivos en 2022 revela una afectación en este punto por la descarga directa de aguas residuales domésticas, coherente con el contexto situacional del punto y su ubicación. En conclusión, la mejora en la calidad microbiológica en el primer semestre de 2023 puede atribuirse a factores como: mayor caudal, dilución y/o procesos de autodepuración.

La reaparición de positivos en junio de 2023, indica intermitencia, típica de sistemas sin tratamiento susceptibles a disminuciones o aumentos de caudal o cargas contaminantes.

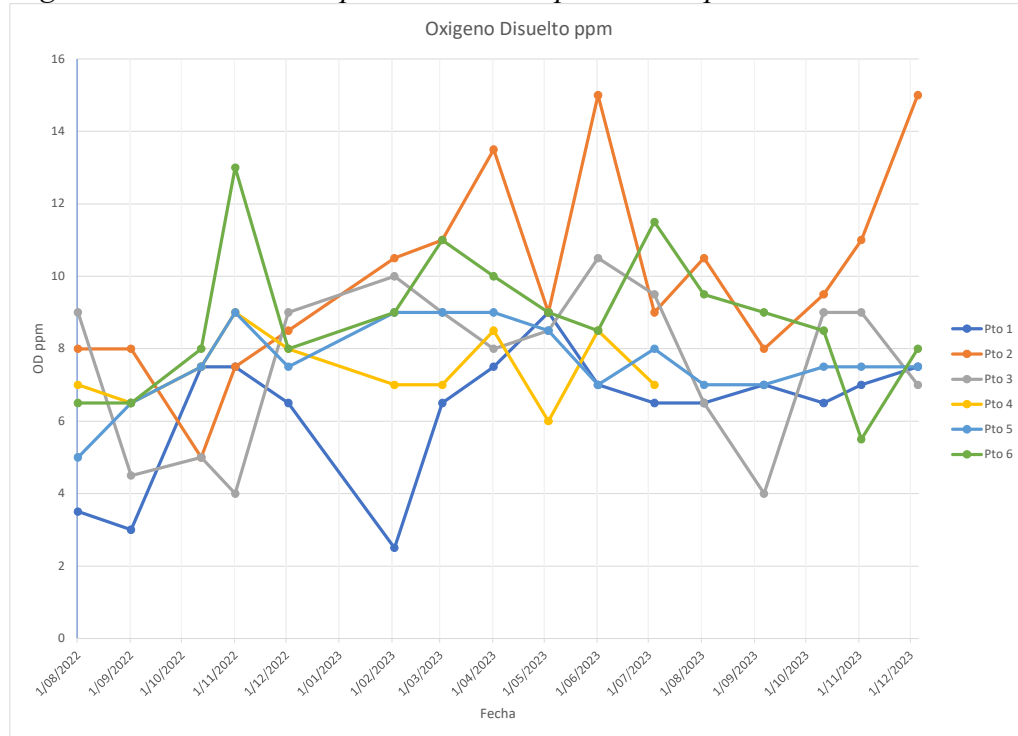
En el Punto 6 – Casa Tona (tramo bajo): se observa ausencia total de *E. coli* en todas las mediciones realizadas (2022–2023), aunque es importante mencionar que no se cuenta con datos para noviembre y diciembre de 2023 (no realizados), de manera general, este tramo presenta condiciones estables y sin evidencia de contaminación fecal reciente; lo anterior sugiere una efectiva autodepuración de aguas abajo y/o ausencia de vertimientos directos en el área inmediata al punto de muestreo, en estudios similares coinciden con que una mejoría de calidad microbiológica en tramos con mayor caudal y mezcla turbulenta. (Nakhle et al., 2021)

En resumen, el análisis integrado entre los puntos de monitoreo evidencia un gradiente microbiológico a lo largo del río Tona, con condiciones de buena calidad en el tramo alto, un incremento significativo de *Escherichia coli* asociado a descargas domésticas en el tramo medio, y una reducción de la carga microbiológica en el tramo bajo, atribuible a procesos naturales de dilución, mezcla y autodepuración del sistema.



En la Figura 19; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra los resultados obtenidos a partir de las mediciones de oxígeno disuelto.

**Figura 19.** Oxígeno Disuelto medidos por MP en cada punto en el periodo 2022-2023



En la Tabla 29, se presentan el análisis estadístico construido con los datos medidos de Oxígeno Disuelto.

**Tabla 29.** Análisis estadístico de los datos medidos de OD en los puntos de MP

Punto de monitoreo	Media (mg/L)	Mediana (mg/L)	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Rango (mg/L)	Desv. estándar	Q1 (mg/L)	Q3 (mg/L)	IQR (mg/L)
Punto 1	6,6	6,5	2,5	9,0	6,5	1,6	5,5	7,5	2,0
Punto 2	9,4	9,0	5,0	17,5	12,5	3,2	7,5	11,5	4,0
Punto 3	8,1	9,0	4,0	10,5	6,5	1,9	7,0	9,5	2,5
Punto 4	7,6	7,5	6,0	9,0	3,0	0,9	7,0	8,5	1,5
Punto 5	7,8	7,5	5,5	9,0	3,5	1,0	7,0	8,5	1,5
Punto 6	8,5	8,0	5,0	13,0	8,0	2,0	7,0	9,5	2,5

El análisis estadístico del oxígeno disuelto evidenció una variabilidad espacial moderada entre los puntos de monitoreo del río Tona, con medias comprendidas entre 6,6 y 9,4 mg/L, lo cual

refleja diferencias en la dinámica hidráulica y en los procesos de intercambio gaseoso propios de cada tramo del cauce.

El Punto 1 presentó la media más baja (6,6 mg/L) y el valor mínimo más reducido (2,5 mg/L), acompañado de un rango amplio (6,5 mg/L) y un IQR de 2,0 mg/L, comportamiento que sugiere episodios puntuales de disminución del OD posiblemente asociados a sectores de menor turbulencia hidráulica, acumulación temporal de materia orgánica y variaciones estacionales del caudal efectivo en tramos altos del sistema.

En contraste, el Punto 2 registró la mayor dispersión estadística, con un rango de 12,5 mg/L y un IQR de 4,0 mg/L, lo cual indica una dinámica altamente variable del parámetro. No obstante, los valores máximos elevados observados (hasta 17,5 mg/L) no deben interpretarse de manera directa como efecto exclusivo de descargas cercanas, ya que concentraciones superiores a 10 mg/L pueden corresponder a fenómenos de sobresaturación natural de oxígeno, particularmente en ríos de montaña caracterizados por bajas temperaturas, alta turbulencia y procesos intensivos de reaeración atmosférica.

Los Puntos 3, 4 y 5 mostraron medianas entre 7,5 y 9,0 mg/L y rangos intercuartílicos reducidos (1,5–2,5 mg/L), lo que evidencia condiciones relativamente estables y favorables para la biota acuática, con menor presencia de fluctuaciones abruptas del parámetro. El Punto 6 presentó una media de 8,5 mg/L y un rango de 8,0 mg/L, comportamiento que sugiere procesos de recuperación progresiva aguas abajo, asociados a mayores niveles de dilución, mezcla hidráulica y capacidad natural de autodepuración del sistema fluvial.

Desde una perspectiva fisicoquímica, la presencia de valores elevados de OD puede explicarse por la interacción de diversos factores ambientales, entre los que se destacan: i) bajas temperaturas del agua, que incrementan la solubilidad del oxígeno; ii) alta turbulencia hidráulica

asociada a pendientes pronunciadas, rápidos o estructuras naturales del cauce; iii) reareación atmosférica intensiva en tramos someros; iv) actividad fotosintética de algas y macrófitas durante periodos de alta radiación solar; v) baja mineralización del agua, y vi) variaciones diurnas del metabolismo acuático, especialmente en horas cercanas al mediodía. Estas condiciones pueden generar estados de sobresaturación (>100–110 %) sin que ello implique necesariamente deterioro de la calidad del agua.(Correa-González et al., 2014)

En este sentido, la interpretación exclusiva del OD en mg/L puede resultar limitada, por lo que metodológicamente se recomienda complementar el análisis con el porcentaje de saturación de oxígeno, variable que integra simultáneamente la temperatura, la presión atmosférica y la concentración medida, permitiendo diferenciar entre enriquecimiento natural, equilibrio cercano a la saturación o condiciones sub-saturadas asociadas a demanda bioquímica.

Teniendo en cuenta lo anterior, cuando sea operacionalmente viable, resulta técnicamente pertinente contar con instrumentación multiparamétrica in situ equipada con sensores ópticos o electroquímicos capaces de estimar de forma directa el porcentaje de saturación de OD con compensación automática de temperatura y presión barométrica.

En conjunto, la aplicación del rango intercuartílico permitió identificar valores extremos sin excluir la variabilidad ambiental natural, fortaleciendo la confiabilidad del monitoreo participativo. El comportamiento observado confirma que el OD constituye un parámetro sensible y de respuesta rápida frente a cambios fisicoquímicos del sistema, lo cual respalda su incorporación como variable clave dentro del Sistema de Alertas Tempranas (SAT), permitiendo la definición de umbrales operativos basados en el comportamiento real del río y no únicamente en valores normativos generales. Desde el punto de vista estadístico, el uso del rango intercuartílico (IQR) permitió identificar valores extremos sin excluir la variabilidad ambiental natural, fortaleciendo la

confiabilidad de los datos de monitoreo participativo, y este comportamiento confirma que el OD es un parámetro sensible y de respuesta rápida, adecuado para su incorporación como variable clave dentro del Sistema de Alertas Tempranas (SAT), permitiendo la definición de umbrales operativos basados en el comportamiento real del río y no únicamente en valores normativos genéricos. (Zhao y Chen, 2025).

**4.3.1.9 Dureza.** En la Tabla 30, se presentan los datos medidos de dureza.

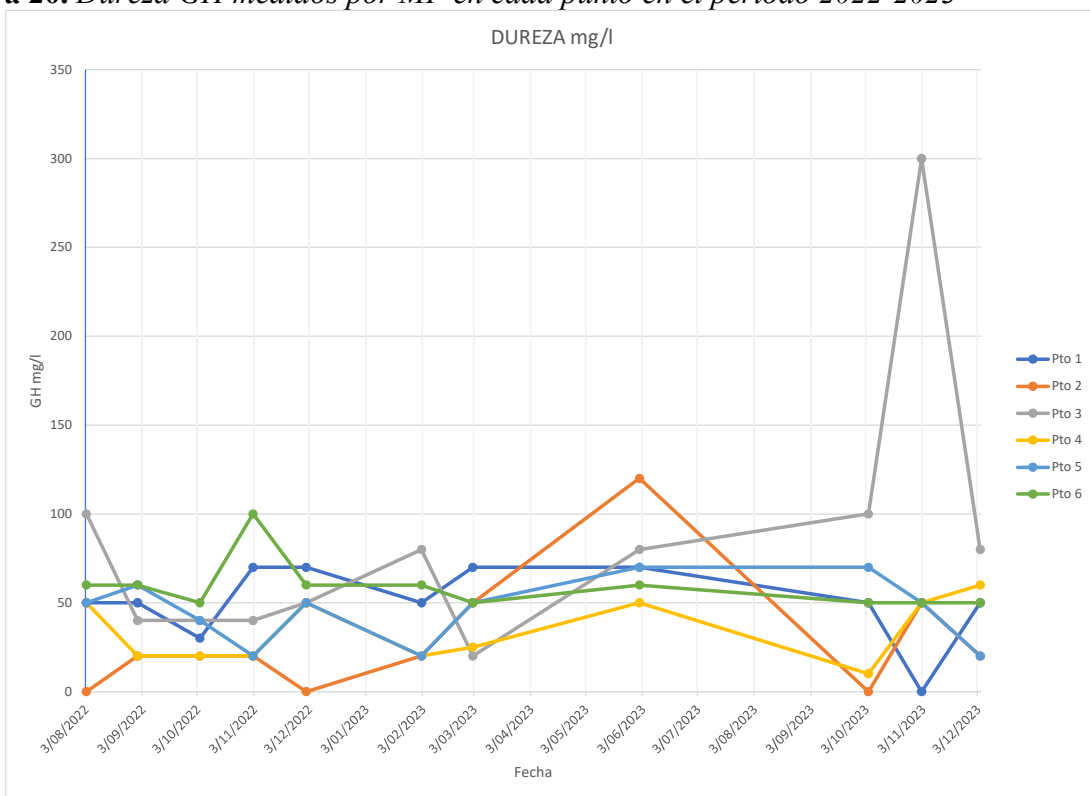
**Tabla 30.** Resultados de GH, medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)

Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
Fecha	GH (mg/l)	Fecha	GH (mg/l)	Fecha	GH (mg/l)	Fecha	GH (mg/l)	Fecha	GH (mg/l)	Fecha	GH (mg/l)
1/08/2022	50	2/08/2022	0	1/08/2022	100	3/08/2022	50	1/08/2022	50	16/08/2022	60
16/08/2022	50	17/08/2022	20	1/09/2022	40	31/08/2022	20	1/09/2022	60	31/08/2022	60
2		2				2				2	
6/09/2022	30	1/09/2022	20	12/10/2022	40	4/10/2022	20	12/10/2022	40	15/09/2022	50
15/09/2022	70	15/09/2022	20	1/11/2022	40	2/11/2022	20	2/11/2022	20	29/09/2022	100
2		2								2	
4/10/2022	70	7/10/2022	0	2/12/2022	50	1/12/2022	50	1/12/2022	50	15/11/2022	60
19/10/2022	50	19/10/2022	20	2/02/2023	80	2/02/2023	20	3/02/2023	20	29/11/2022	60
2		2								2	
3/11/2022	70	1/11/2022	50	2/03/2023	20	2/03/2023	25	4/03/2023	50	14/12/2022	50
16/11/2022	70	16/11/2022	120	1/04/2023	80	1/06/2023	50	10/04/2023	70	28/12/2022	60
2		2						3		2	
1/12/2022	50	2/12/2022	0	3/05/2023	100	4/10/2023	10	3/05/2023	70	6/02/2023	50
16/12/2022	0	16/12/2022	50	1/06/2023	300	2/11/2023	50	2/06/2023	50	16/02/2023	50
2		2								3	
3/02/2023	50	2/02/2023	20	4/07/2023	80	4/12/2023	60	4/07/2023	20	1/03/2023	50
17/02/2023	0	17/02/2023	20	2/08/2023	0			2/08/2023	0	31/03/2023	40
3		3								3	
7/03/2023	0	2/03/2023	20	6/09/2023	10			5/09/2023	20	1/04/2023	50
31/03/2023	0	15/03/2023	50	11/10/2023	250			11/10/2023	30	11/05/2023	150
3		3		3				3		3	
14/04/2023	0	1/04/2023	20	2/11/2023	500			2/11/2023	200	6/06/2023	60
3											
28/04/2023	0	18/04/2023	0	5/12/2023	200			4/12/2023	50	4/07/2023	50
3		3									
2/05/2023	0	2/05/2023	20							1/08/2023	100
17/05/2023	0	17/05/2023	50							6/09/2023	10
3		3									
1/06/2023	80	1/06/2023	60							11/10/2023	50
15/06/2023	60	15/06/2023	20							17/10/2023	10
3		3								3	
1/08/2023	100	1/08/2023	50							2/11/2023	200

Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
Fecha	GH (mg/l)	Fecha	GH (mg/l)	Fecha	GH (mg/l)	Fecha	GH (mg/l)	Fecha	GH (mg/l)	Fecha	GH (mg/l)
17/08/2023	10	17/08/2023	50							18/12/2023	50
3		3								3	
5/09/2023	100	5/09/2023	25								
19/09/2023	10	19/09/2023	50								
3		3									
4/10/2023	300	4/10/2023	80								
17/10/2023	250	19/10/2023	20								
3		3									
3/11/2023	90	3/11/2023	50								
20/11/2023	50	20/11/2023	70								
3		3									
5/12/2023	20	5/12/2023	60								
19/12/2023	50	19/12/2023	20								
3		3									

En la Figura 20; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra los resultados obtenidos a partir de las mediciones de Dureza en campo.

**Figura 20.** Dureza GH medidos por MP en cada punto en el periodo 2022-2023



En la Tabla 31, se presentan el análisis estadístico construido con los datos medidos de dureza.

**Tabla 31.** *Análisis estadístico de los datos medidos de Dureza en los puntos de MP*

Punto de monitoreo	Media (mg/L)	Mediana (mg/L)	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Rango (mg/L)	Desv. estándar	Q1 (mg/L)	Q3 (mg/L)	IQR (mg/L)
Punto 1	56,0	50	0	300	300	68,26	2,5	70	67,5
Punto 2	35,2	20	0	120	120	27,05	20	50	30
Punto 3	118,1	80	0	500	500	133,23	40	125	85
Punto 4.	34,1	25	10	60	50	17,72	20	50	30
Punto 5	50,0	50	0	200	200	44,72	20	52,5	32,5
Punto 6	65,2	50	10	200	190	42,73	50	60	10

La integración del análisis de la tabla de datos, la gráfica de variación temporal y los atributos estadísticos descriptivos del parámetro dureza total (GH), evidencia un comportamiento espacial y temporal diferenciado entre los puntos de monitoreo del río Tona y sus tributarios; en términos generales, los valores medios y medianos indican el predominio de aguas blandas a moderadamente duras, coherentes con sistemas hídricos de montaña donde la dureza está controlada principalmente por la interacción agua–roca y la litología local. (Xu et al., 2025)

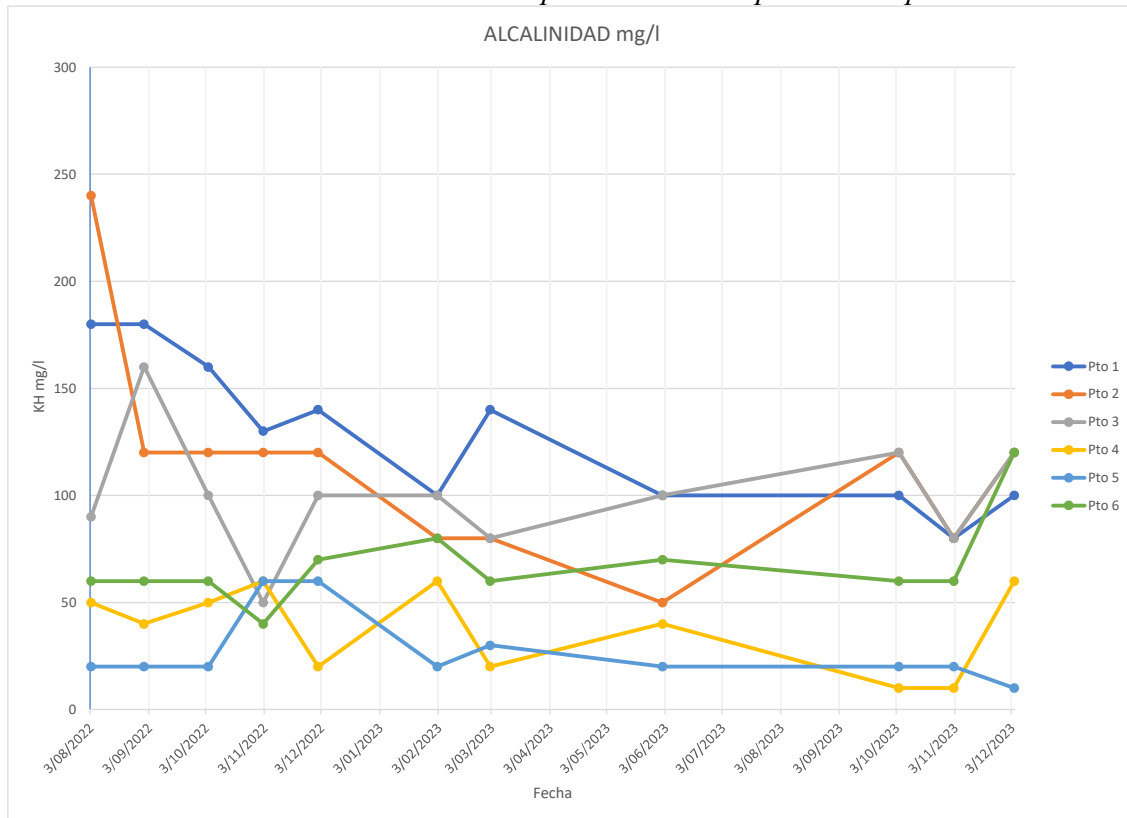
No obstante, es importante mencionar que, para este parámetro, la amplitud del rango y los valores máximos registrados, especialmente en los Puntos 1, 3, 5 (quebrada Arnania) y 6, se reflejan en desviaciones estándar elevadas y en IQR amplios, lo que confirma una alta variabilidad del parámetro y la ocurrencia de eventos puntuales de enriquecimiento iónico, estos picos, claramente identificables en la gráfica y respaldados por los estadísticos, pueden asociarse a pulsos hidrológicos, aportes locales y procesos de disolución intensificada, más que a una condición permanente del sistema y desde la perspectiva de validación de datos, el uso combinado de mediana, IQR y análisis gráfico permite discriminar valores potencialmente atípicos sin descartarlos automáticamente. Este comportamiento es consistente con lo reportado en estudios de química de ríos de montaña, donde la dureza presenta alta variabilidad temporal controlada por



Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
Fecha	KH (mg/l)	Fecha	KH (mg/l)	Fecha	KH (mg/l)	Fecha	KH (mg/l)	Fecha	KH (mg/l)	Fecha	KH (mg/l)
4/10/2023	100	4/10/2023	100								
17/10/2023	160	19/10/2023	150								
3/11/2023	80	3/11/2023	60								
20/11/2023	80	20/11/2023	100								
5/12/2023	160	5/12/2023	80								
19/12/2023	80	19/12/2023	60								

En la Figura 21, se muestra los resultados obtenidos a partir de las mediciones de Alcalinidad en campo.

**Figura 21.** Datos de Alcalinidad KH medidos por MP en cada punto en el periodo 2022-2023



En la Tabla 33, se presentan el análisis estadístico construido con los datos medidos de alcalinidad.

**Tabla 33.** *Análisis estadístico de los datos medidos de Alcalinidad en los puntos de MP*

Punto de monitoreo	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Media (mg/L)	Mediana (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)	Rango (mg/L)	Q1 (mg/L)	Q3 (mg/L)	IQR (mg/L)
Punto 1	0	300	63,9	50	71,6	300	0	70	70
Punto 2	0	120	34,8	20	31,4	120	20	50	30
Punto 3	0	500	133,1	80	143,8	500	40	200	160
Punto 4	10	60	36,8	50	16,2	50	20	50	30
Punto 5	0	200	53,3	50	48,7	200	20	70	50
Punto 6	10	200	63,5	50	39,9	190	50	60	10

La Figura 21, correspondiente a la variación temporal de la alcalinidad (KH, mg/L) en los seis puntos de monitoreo, complementa los resultados estadísticos presentados en la Tabla 33, permitiendo identificar tanto patrones generales como eventos puntuales de alta variabilidad. En términos generales, la gráfica evidencia un comportamiento heterogéneo entre puntos, con oscilaciones marcadas en algunos tramos del periodo de monitoreo, coherentes con los valores de rango, desviación estándar e IQR obtenidos.

En el Punto 3, la gráfica muestra picos elevados de alcalinidad que alcanzan valores superiores a 200 mg/L, concordantes con el máximo registrado (500 mg/L) y con el IQR más alto del conjunto (160 mg/L), este comportamiento gráfico refuerza la interpretación de una alta variabilidad temporal, posiblemente asociada a procesos de interacción agua–roca, aportes difusos desde el suelo o condiciones hidrológicas variables, tal como ha sido reportado en cuencas de montaña con influencia litológica carbonatada, la presencia de estos picos, claramente visibles en la gráfica, sugiere que el sistema presenta episodios de mayor capacidad amortiguadora, alternados con periodos de valores bajos.(Shangguan et al., 2025)

Por el contrario, en los puntos 1 y 2, la gráfica evidencia tramos prolongados con valores bajos o cercanos a cero, lo cual coincide con las medianas reducidas y los cuartiles inferiores identificados en la tabla estadística. Esta condición indica una capacidad tampón limitada en

determinados periodos, aumentando la susceptibilidad del sistema a variaciones abruptas del pH, especialmente en contextos de vertimientos domésticos o eventos de lluvia intensa que generan dilución, se ha demostrado que cuerpos de agua con baja alcalinidad presentan mayor sensibilidad química y menor resiliencia frente a perturbaciones externas.(Tahraoui et al., 2025)

En la Figura 21, también se observa que los puntos 4 y 6 presentan curvas más estables y con menor amplitud de variación, lo cual es consistente con los bajos valores de IQR y desviación estándar registrados, esta estabilidad relativa sugiere una mayor constancia en la composición iónica del agua, lo que resulta favorable para la interpretación de otros parámetros fisicoquímicos y para la reducción de incertidumbre en el monitoreo participativo.

En conjunto, la coherencia entre el análisis gráfico y estadístico, valida la utilidad de combinar los mencionados análisis y respalda la incorporación de la alcalinidad como parámetro estructural dentro del esquema de validación y parametrización del SAT en la unidad hidrográfica evaluada, aun reconociendo que algunos valores extremos requieren interpretación contextual y no deben ser descartados automáticamente como errores de medición.

**4.3.1.11 Nitritos NO<sup>2-</sup>.** En la Tabla 34, se presentan los datos medidos de Nitritos.

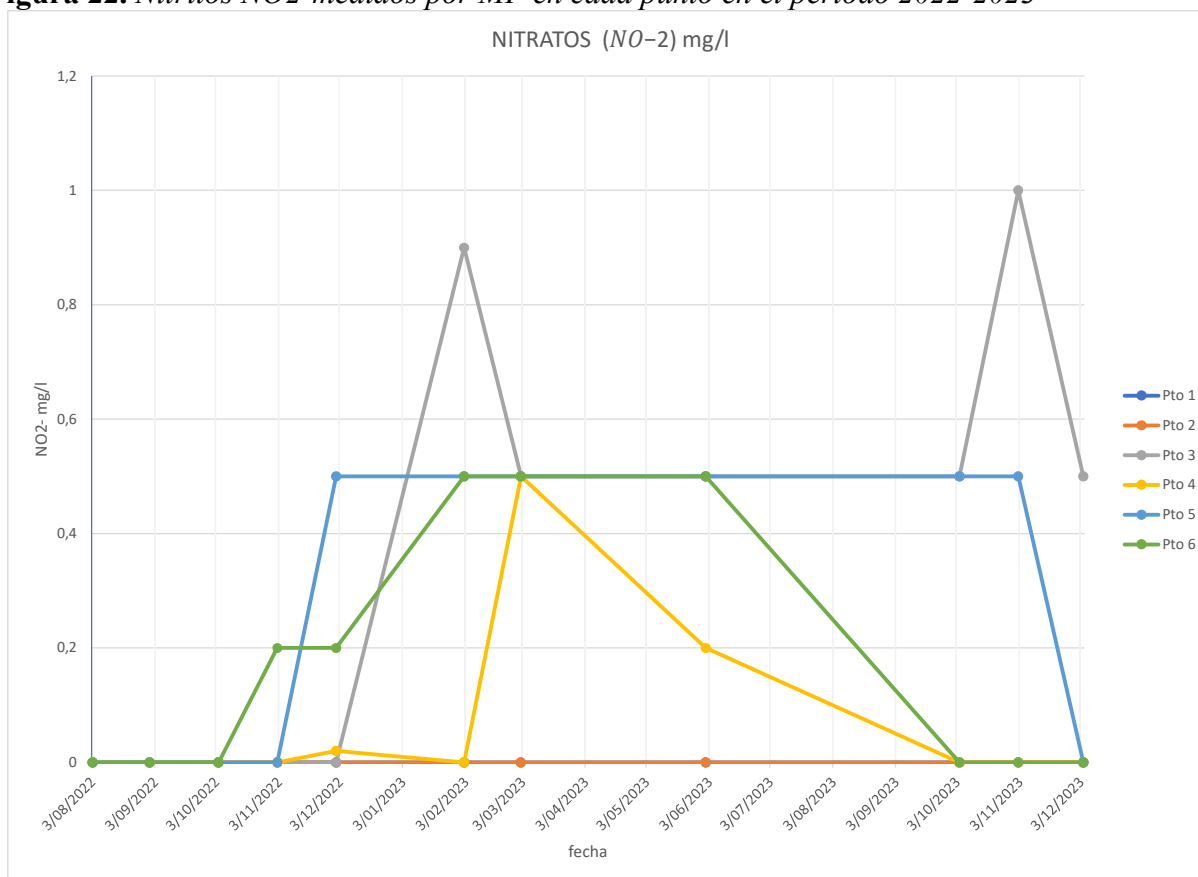
**Tabla 34.** Resultados de NO<sup>2-</sup>. medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)

Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
Fecha	NO2- mg/l	Fecha	NO2- mg/l	Fecha	NO2- mg/l	Fecha	NO2- mg/l	Fecha	NO2- mg/l	Fecha	NO2- mg/l
1/08/2022	0,00	2/08/2022	0,00	1/08/2022	0,00	3/08/2022	0,00	1/08/2022	0,00	16/08/2022	0,00
16/08/2022	0,00	17/08/2022	0,00	1/09/2022	0,00	31/08/2022	0,00	1/09/2022	0,00	31/08/2022	0,00
6/09/2022	0,00	1/09/2022	0,00	12/10/2022	0,00	4/10/2022	0,00	12/10/2022	0,00	15/09/2022	0,00
15/09/2022	0,00	15/09/2022	0,00	1/11/2022	0,00	2/11/2022	0,00	2/11/2022	0,00	29/09/2022	0,20
4/10/2022	0,00	7/10/2022	0,00	2/12/2022	0,00	1/12/2022	0,02	1/12/2022	0,50	15/11/2022	0,20
19/10/2022	0,00	19/10/2022	0,00	2/02/2023	0,90	2/02/2023	0,00	3/02/2023	0,50	29/11/2022	0,50
3/11/2022	0,00	1/11/2022	0,00	2/03/2023	0,50	2/03/2023	0,50	4/03/2023	0,50	14/12/2022	0,50
16/11/2022	0,00	16/11/2022	0,00	1/04/2023	0,50	1/06/2023	0,20	10/04/2023	0,50	28/12/2022	0,50
1/12/2022	0,00	2/12/2022	0,00	3/05/2023	0,50	4/10/2023	0,00	3/05/2023	0,50	6/02/2023	0,00

Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
Fecha	NO2- mg/l	Fecha	NO2- mg/l	Fecha	NO2- mg/l	Fecha	NO2- mg/l	Fecha	NO2- mg/l	Fecha	NO2- mg/l
16/12/2022	0,00	16/12/2022	0,00	1/06/2023	1,00	2/11/2023	0,00	2/06/2023	0,50	16/02/2023	0,00
3/02/2023	0,00	2/02/2023	0,00	4/07/2023	0,50	4/12/2023	0,00	4/07/2023	0,00	1/03/2023	0,00
17/02/2023	0,00	17/02/2023	0,00	2/08/2023	5,00			2/08/2023	0,00	31/03/2023	0,00
7/03/2023	0,00	2/03/2023	0,00	6/09/2023	0,50			5/09/2023	0,00	1/04/2023	0,00
31/03/2023	0,00	15/03/2023	0,00	11/10/2023	5,00			11/10/2023	0,00	11/05/2023	8,00
14/04/2023	0,00	1/04/2023	0,00	2/11/2023	1,00			2/11/2023	0,00	6/06/2023	0,00
28/04/2023	0,00	18/04/2023	0,00	5/12/2023	0,00			4/12/2023	0,00	4/07/2023	0,00
2/05/2023	0,00	2/05/2023	0,00							1/08/2023	0,00
17/05/2023	0,00	17/05/2023	0,00							6/09/2023	0,00
1/06/2023	0,00	1/06/2023	0,00							11/10/2023	0,00
15/06/2023	0,00	15/06/2023	0,00							17/10/2023	0,00
1/08/2023	0,00	1/08/2023	0,00							2/11/2023	0,00
17/08/2023	0,00	17/08/2023	0,00							18/12/2023	0,00
5/09/2023	0,00	5/09/2023	0,20								
19/09/2023	0,00	19/09/2023	0,00								
4/10/2023	6,00	4/10/2023	0,00								
17/10/2023	0,00	19/10/2023	0,00								
3/11/2023	0,00	3/11/2023	0,00								
20/11/2023	0,00	20/11/2023	0,00								
5/12/2023	0,50	5/12/2023	0,00								
19/12/2023	0,00	19/12/2023	0,00								

En la Figura 22; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra los resultados obtenidos a partir de las mediciones de Nitritos en campo.

**Figura 22.** Nitritos NO<sub>2</sub>-medidos por MP en cada punto en el periodo 2022-2023



En la Tabla 35, se presentan el análisis estadístico construido con los datos medidos de nitritos

**Tabla 35.** Análisis estadístico de los datos medidos de Nitritos en los puntos de MP

Punto de monitoreo	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Media (mg/L)	Mediana (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)	Rango (mg/L)	Q1 (mg/L)	Q3 (mg/L)	IQR (mg/L)
<b>Punto 1</b>	0,00	6,00	0,21	0,00	1,07	6,00	0,00	0,00	0,00
<b>Punto 2</b>	0,00	0,20	0,01	0,00	0,04	0,20	0,00	0,00	0,00
<b>Punto 3</b>	0,00	5,00	1,22	0,50	1,82	5,00	0,50	1,00	0,50
<b>Punto 4</b>	0,00	0,50	0,11	0,00	0,19	0,50	0,00	0,20	0,20
<b>Punto 5</b>	0,00	0,50	0,19	0,00	0,24	0,50	0,00	0,50	0,50
<b>Punto 6</b>	0,00	8,00	0,48	0,00	1,67	8,00	0,00	0,50	0,50

El análisis gráfico de los nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) muestra una condición predominante de concentraciones bajas o no detectables en la mayoría de los puntos de monitoreo a lo largo del periodo evaluado, con valores cercanos a 0,00 mg/L que definen una línea base estable del sistema,

este comportamiento se refleja estadísticamente en medianas iguales a cero y rangos intercuartílicos (IQR) reducidos, especialmente en los puntos 1 y 2, lo cual es característico de sistemas fluviales donde el nitrito actúa como un compuesto intermedio de corta permanencia dentro del ciclo del nitrógeno.

No obstante, la gráfica temporal evidencia incrementos puntuales y de corta duración en algunos tramos específicos, por ejemplo, en el Punto 3, se observan picos que alcanzan hasta 5,00 mg/L, los cuales elevan la media (1,22 mg/L) y la desviación estándar (1,82 mg/L), sin configurar una tendencia sostenida en el tiempo. Este tipo de comportamiento ha sido documentado en ríos con aportes orgánicos intermitentes, donde la oxidación del amonio hacia nitrato no se completa, generando acumulación temporal de nitritos.(Vorobiev et al., 2021)

El Punto 6 presenta el evento más extremo del conjunto, con un valor máximo de 8,00 mg/L, claramente identificable en la gráfica como un pico aislado, las concentraciones elevadas de  $\text{NO}_2^-$  en tramos aguas abajo de centros poblados o áreas productivas suelen asociarse a descargas domésticas sin tratamiento adecuado, actividades ganaderas, beneficio de café y condiciones de baja eficiencia en los procesos de nitrificación, especialmente durante eventos de lluvia o cambios bruscos en el caudal. (Gómez-Anaya et al., 2017)

Por el contrario, los Puntos 1 y 2 muestran una señal gráfica prácticamente constante, con valores cercanos a cero durante todo el periodo analizado, este patrón es coherente con lo reportado por la literatura, donde se indica que en tramos con buena oxigenación, los nitritos son rápidamente transformados a nitratos, evitando su acumulación en la columna de agua (Andersen, 2021).

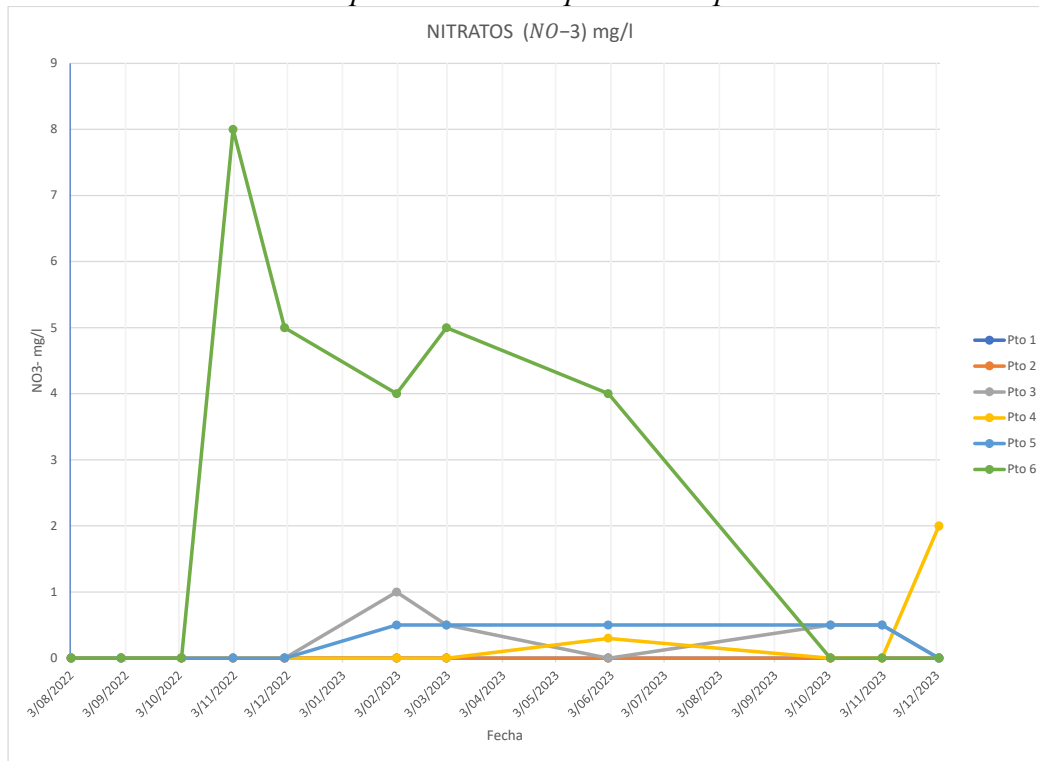
**4.3.1.12 Nitratos NO<sup>3-</sup>.** En la Tabla 36, se presentan los datos medidos de Nitratos a partir de lo establecido previamente.

**Tabla 36.** Resultados de NO<sup>3-</sup> medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)

Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
Fecha	NO3- mg/l	Fecha	NO3- mg/l	Fecha	NO3- mg/l	Fecha	NO3- mg/l	Fecha	NO3- mg/l	Fecha	NO3- mg/l
1/08/2022	0,00	2/08/2022	1,15	1/08/2022	2,00	3/08/2022	0,80	1/08/2022	1,50	16/08/2022	1,00
16/08/2022	0,00	17/08/2022	3,00	1/09/2022	3,00	31/08/2022	0,40	1/09/2022	1,50	31/08/2022	1,50
6/09/2022	0,00	1/09/2022	0,80	12/10/2022	1,00	4/10/2022	1,00	12/10/2022	1,20	15/09/2022	1,20
15/09/2022	0,00	15/09/2022	1,50	1/11/2022	0,40	2/11/2022	1,20	2/11/2022	1,20	29/09/2022	2,00
4/10/2022	0,00	7/10/2022	2,50	2/12/2022	1,00	1/12/2022	0,50	1/12/2022	0,40	15/11/2022	1,50
19/10/2022	0,00	19/10/2022	1,50	2/02/2023	1,10	2/02/2023	1,00	3/02/2023	3,00	29/11/2022	1,20
3/11/2022	0,00	1/11/2022	0,80	2/03/2023	1,50	2/03/2023	4,00	4/03/2023	1,00	14/12/2022	2,00
16/11/2022	0,00	16/11/2022	3,00	1/04/2023	1,50	1/06/2023	1,50	10/04/2023	1,50	28/12/2022	1,50
1/12/2022	0,00	2/12/2022	3,00	3/05/2023	1,20	4/10/2023	1,50	3/05/2023	1,50	6/02/2023	1,00
16/12/2022	0,00	16/12/2022	1,50	1/06/2023	2,00	2/11/2023	3,00	2/06/2023	0,10	16/02/2023	1,00
3/02/2023	0,00	2/02/2023	4,00	4/07/2023	1,50	4/12/2023	1,50	4/07/2023	0,50	1/03/2023	1,50
17/02/2023	0,00	17/02/2023	1,50	2/08/2023	1,50			2/08/2023	0,50	31/03/2023	1,50
7/03/2023	0,00	2/03/2023	1,20	6/09/2023	1,20			5/09/2023	2,00	1/04/2023	1,50
31/03/2023	0,00	15/03/2023	3,00	11/10/2023	1,50			11/10/2023	0,80	11/05/2023	1,50
14/04/2023	0,00	1/04/2023	1,50	2/11/2023	1,50			2/11/2023	3,00	6/06/2023	3,00
28/04/2023	0,00	18/04/2023	3,00	5/12/2023	2,00			4/12/2023	3,00	4/07/2023	3,00
2/05/2023	0,00	2/05/2023	1,50							1/08/2023	3,00
17/05/2023	0,00	17/05/2023	1,50							6/09/2023	1,50
1/06/2023	0,00	1/06/2023	0,80							11/10/2023	1,20
15/06/2023	0,00	15/06/2023	1,20							17/10/2023	1,50
1/08/2023	0,00	1/08/2023	0,80							2/11/2023	3,00
17/08/2023	0,00	17/08/2023	3,00							18/12/2023	3,00
5/09/2023	0,00	5/09/2023	1,00								
19/09/2023	0,00	19/09/2023	1,50								
4/10/2023	0,00	4/10/2023	0,80								
17/10/2023	0,00	19/10/2023	1,50								
3/11/2023	0,00	3/11/2023	1,50								
20/11/2023	0,00	20/11/2023	1,50								
5/12/2023	5,00	5/12/2023	2,00								
19/12/2023	0,00	19/12/2023	0,80								

En la Figura 23, se muestra los resultados obtenidos a partir de las mediciones de Nitratos en campo.

**Figura 23.** Nitratos  $NO_3^-$  medidos por MP en cada punto en el periodo 2022-2023



En la Tabla 37, se presentan el análisis estadístico construido con los datos medidos de nitratos.

**Tabla 37.** Análisis estadístico de los datos medidos de Nitratos en los puntos de MP

Punto de monitoreo	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Media (mg/L)	Mediana (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)	Rango (mg/L)	Q1 (mg/L)	Q3 (mg/L)	IQR (mg/L)
<b>Punto 1</b>	0,00	5,00	0,17	0,00	0,91	5,00	0,00	0,00	0,00
<b>Punto 2</b>	0,80	4,00	1,73	1,50	0,93	3,20	1,20	2,50	1,30
<b>Punto 3</b>	0,40	3,00	1,49	1,50	0,64	2,60	1,20	1,50	0,30
<b>Punto 4</b>	0,40	4,00	1,54	1,50	0,97	3,60	1,00	1,50	0,50
<b>Punto 5</b>	0,10	3,00	1,46	1,50	0,89	2,90	0,50	2,00	1,50
<b>Punto 6</b>	1,00	3,00	1,80	1,50	0,73	2,00	1,20	2,00	0,80

El análisis estadístico descriptivo y la interpretación gráfica de las concentraciones de nitratos ( $NO_3^-$ ) registradas en los seis puntos de monitoreo participativo durante el periodo agosto de 2022 a diciembre de 2023 evidencian un comportamiento espacial y temporal diferenciado,

condicionado por las características locales de cada tramo del río y el grado de intervención antrópica.

Desde el enfoque estadístico, el Punto 1 presenta una mediana y valores cuartílicos iguales a 0 mg/L, con una media influenciada por un evento aislado de mayor concentración, este patrón indica condiciones cercanas al fondo natural, típicas de sectores de cabecera o tramos con mínima presión antrópica, gráficamente, esta estabilidad se refleja en una serie temporal prácticamente plana, lo que respalda su utilización como punto de referencia dentro del sistema de monitoreo participativo.

En contraste, el Punto 6 exhibe las mayores concentraciones máximas y la mayor dispersión de los datos, con picos pronunciados hacia finales de 2022 y una tendencia decreciente posterior. La presencia de estos valores elevados, seguida de una reducción progresiva, sugiere aportes puntuales de nitratos asociados a descargas domésticas, escorrentía superficial o eventos hidrológicos específicos, más que a una fuente continua de contaminación, este comportamiento concuerda con lo reportado en ríos de montaña, donde los pulsos de nutrientes suelen estar asociados a condiciones hidrológicas variables y procesos de dilución y autodepuración aguas abajo.(Kaushal et al., 2018)

Los Puntos 2, 3, 4 y 5 muestran concentraciones bajas a moderadas, con medianas cercanas a 1,5 mg/L y rangos intercuartílicos reducidos, lo que indica una variabilidad controlada y ausencia de incrementos sostenidos en el tiempo, estos puntos presentan oscilaciones suaves sin tendencias crecientes persistentes, comportamiento característico de cuencas con presión antrópica moderada y aportes difusos intermitentes.

El Punto 4 evidencia un incremento puntual hacia finales del periodo, coherente con valores aislados identificados estadísticamente dentro del rango esperado.

La integración del análisis gráfico y estadístico permite concluir que no se identifican procesos de acumulación progresiva de nitratos ni condiciones asociadas a eutrofización en el tramo evaluado durante el periodo de estudio, sin embargo, la ocurrencia de picos aislados resalta la importancia de mantener el seguimiento continuo y de establecer umbrales de alerta temprana basados en criterios estadísticos, como el uso del rango intercuartílico ( $Q3 + 1,5 \cdot IQR$ ), especialmente en el contexto de un sistema de alertas tempranas apoyado en monitoreo participativo. (Andersen, 2021)

**4.3.1.13. Cloro Libre.** En la Tabla 38, se presentan los datos medidos de Cloro libre.

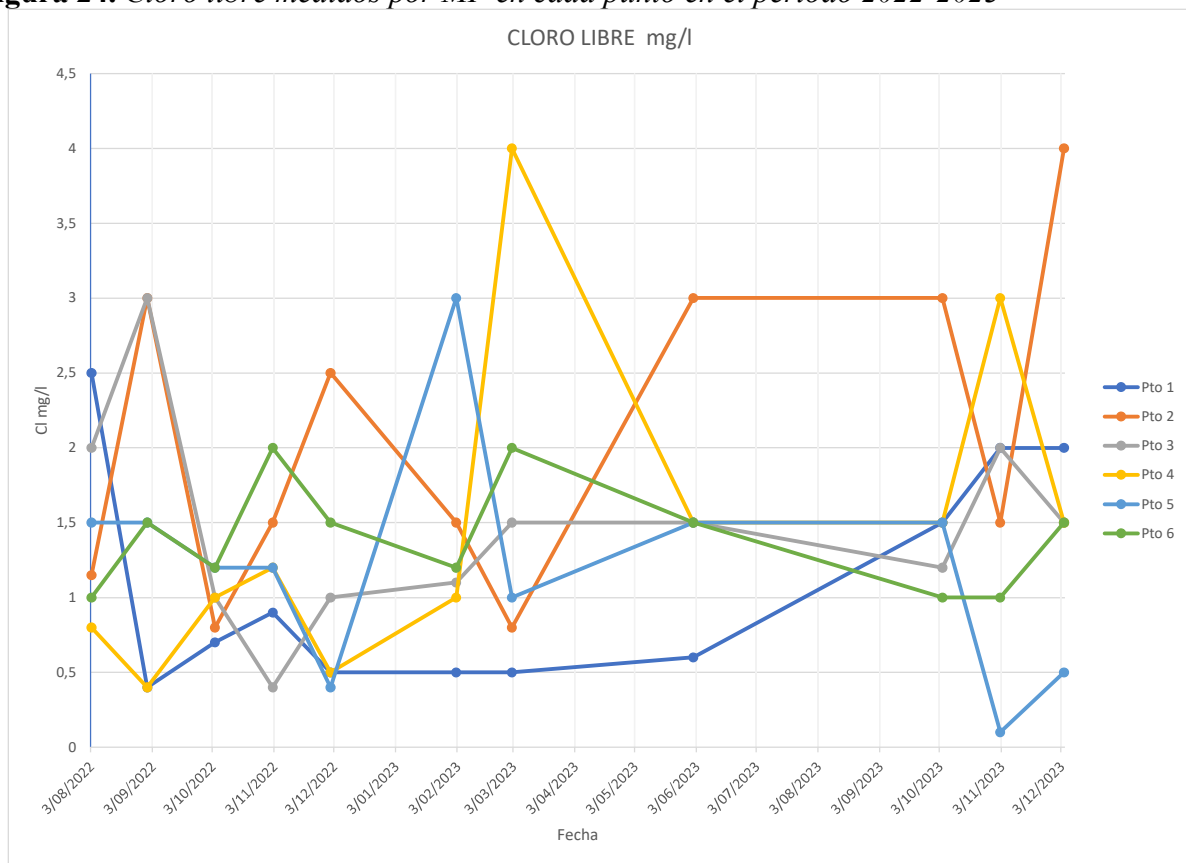
**Tabla 38.** Resultados de Cloro libre medidos a partir de los datos de MP (2022-2023)

Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
Fecha	Cl mg/l	Fecha	Cl mg/l	Fecha	Cl mg/l	Fecha	Cl mg/l	Fecha	Cl mg/l	Fecha	Cl mg/l
1/08/2022	2,50	2/08/2022	1,15	1/08/2022	2,00	3/08/2022	0,80	1/08/2022	1,50	16/08/2022	1,00
16/08/2022	0,40	17/08/2022	3,00	1/09/2022	3,00	31/08/2022	0,40	1/09/2022	1,50	31/08/2022	1,50
6/09/2022	0,70	1/09/2022	0,80	12/10/2022	1,00	4/10/2022	1,00	12/10/2022	1,20	15/09/2022	1,20
15/09/2022	0,90	15/09/2022	1,50	1/11/2022	0,40	2/11/2022	1,20	2/11/2022	1,20	29/09/2022	2,00
4/10/2022	0,50	7/10/2022	2,50	2/12/2022	1,00	1/12/2022	0,50	1/12/2022	0,40	15/11/2022	1,50
19/10/2022	0,50	19/10/2022	1,50	2/02/2023	1,10	2/02/2023	1,00	3/02/2023	3,00	29/11/2022	1,20
3/11/2022	0,50	1/11/2022	0,80	2/03/2023	1,50	2/03/2023	4,00	4/03/2023	1,00	14/12/2022	2,00
16/11/2022	0,60	16/11/2022	3,00	1/04/2023	1,50	1/06/2023	1,50	10/04/2023	1,50	28/12/2022	1,50
1/12/2022	1,50	2/12/2022	3,00	3/05/2023	1,20	4/10/2023	1,50	3/05/2023	1,50	6/02/2023	1,00
16/12/2022	2,00	16/12/2022	1,50	1/06/2023	2,00	2/11/2023	3,00	2/06/2023	0,10	16/02/2023	1,00
3/02/2023	2,00	2/02/2023	4,00	4/07/2023	1,50	4/12/2023	1,50	4/07/2023	0,50	1/03/2023	1,50
17/02/2023	1,00	17/02/2023	1,50	2/08/2023	1,50			2/08/2023	0,50	31/03/2023	1,50
7/03/2023	0,80	2/03/2023	1,20	6/09/2023	1,20			5/09/2023	2,00	1/04/2023	1,50
31/03/2023	0,25	15/03/2023	3,00	11/10/2023	1,50			11/10/2023	0,80	11/05/2023	1,50
14/04/2023	0,50	1/04/2023	1,50	2/11/2023	1,50			2/11/2023	3,00	6/06/2023	3,00
28/04/2023	0,25	18/04/2023	3,00	5/12/2023	2,00			4/12/2023	3,00	4/07/2023	3,00
2/05/2023	0,30	2/05/2023	1,50							1/08/2023	3,00
17/05/2023	0,60	17/05/2023	1,50							6/09/2023	1,50
1/06/2023	0,50	1/06/2023	0,80							11/10/2023	1,20
15/06/2023	3,00	15/06/2023	1,20							17/10/2023	1,50
1/08/2023	0,80	1/08/2023	0,80							2/11/2023	3,00
17/08/2023	1,50	17/08/2023	3,00							18/12/2023	3,00

Punto 1		Punto 2		Punto 3		Punto 4		Punto 5		Punto 6	
Fecha	Cl mg/l	Fecha	Cl mg/l	Fecha	Cl mg/l	Fecha	Cl mg/l	Fecha	Cl mg/l	Fecha	Cl mg/l
5/09/2023	1,50	5/09/2023	1,00								
19/09/2023	2,00	19/09/2023	1,50								
4/10/2023	3,00	4/10/2023	0,80								
17/10/2023	2,00	19/10/2023	1,50								
3/11/2023	2,00	3/11/2023	1,50								
20/11/2023	0,80	20/11/2023	1,50								
5/12/2023	1,50	5/12/2023	2,00								
19/12/2023	0,80	19/12/2023	0,80								

En la Figura 24 se muestra los resultados obtenidos a partir de las mediciones de Cloro libre en campo.

**Figura 24.** Cloro libre medidos por MP en cada punto en el periodo 2022-2023



En la Tabla 39, se presentan el análisis estadístico construido con los datos medidos de fosfatos.

**Tabla 39.** *Análisis estadístico de los datos medidos de Cloro libre en los puntos de MP*

Punto de monitoreo	Mínimo (mg/L)	Máximo (mg/L)	Media (mg/L)	Mediana (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)	Rango (mg/L)	Q1 (mg/L)	Q3 (mg/L)	IQR (mg/L)
<b>Punto 1</b>	0,25	3,00	1,14	0,80	0,86	2,75	0,50	2,00	1,50
<b>Punto 2</b>	0,80	4,00	1,78	1,50	0,87	3,20	1,20	2,50	1,30
<b>Punto 3</b>	0,40	3,00	1,47	1,50	0,64	2,60	1,10	2,00	0,90
<b>Punto 4</b>	0,40	4,00	1,67	1,50	1,03	3,60	1,00	3,00	2,00
<b>Punto 5</b>	0,10	3,00	1,49	1,50	0,88	2,90	0,80	2,00	1,20
<b>Punto 6</b>	1,00	3,00	1,78	1,50	0,69	2,00	1,20	3,00	1,80

El análisis gráfico–estadístico del cloro libre registrado en los seis puntos de monitoreo participativo durante el periodo 2022–2023 evidencia un comportamiento altamente variable en el espacio y en el tiempo, lo cual es consistente con la naturaleza reactiva y no conservativa de este parámetro en cuerpos de agua superficiales. A partir de la estadística descriptiva, se observa que los valores mínimos alcanzan concentraciones tan bajas como 0,10–0,25 mg/L, mientras que los máximos llegan hasta 4,00 mg/L en algunos puntos específicos, reflejando la ocurrencia de eventos puntuales de incremento más que condiciones persistentes.

Desde el punto de vista gráfico, las series temporales muestran picos abruptos seguidos de descensos rápidos, especialmente en los puntos 2, 4 y 6, lo que sugiere aportes discontinuos de origen antrópico, posiblemente asociados a descargas domésticas, procesos de limpieza o retornos de aguas tratadas. Estos comportamientos coinciden con lo reportado en estudios recientes, donde se señala que el cloro libre en aguas superficiales presenta una vida media corta, debido a su rápida reacción con la materia orgánica natural y otros compuestos reductores presentes en el agua (Zhang et al., 2020).

El análisis estadístico confirma esta alta variabilidad mediante desviaciones estándar e intervalos intercuartílicos (IQR) relativamente amplios, principalmente en los puntos con mayor presión antrópica. No obstante, la mediana cercana a 1,5 mg/L en la mayoría de los puntos indica que los valores extremos no representan una condición habitual del sistema, sino episodios aislados. Esta característica respalda el uso de medidas robustas como la mediana y el IQR para la validación de datos en esquemas de monitoreo participativo, evitando el sobreinterpretación de valores atípicos.

En los puntos ubicados en tramos más conservados del sistema, los valores de cloro libre se mantienen bajos y con menor dispersión, lo que sugiere una rápida disipación del cloro y una limitada influencia directa de fuentes cloradas. Este patrón ha sido documentado por Liu et al. (2018), quienes destacan que la dinámica del cloro residual en aguas superficiales depende fuertemente de las condiciones locales de mezcla, caudal y carga orgánica, más que de aportes continuos.

En el contexto de la implementación de un Sistema de Alertas Tempranas (SAT), los resultados indican que el cloro libre constituye un parámetro de respuesta rápida, útil para detectar alteraciones recientes en la calidad del agua. Sin embargo, su alta variabilidad natural hace necesario que su interpretación se realice de forma integrada con otros parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, y que los umbrales de alerta se definan a partir de criterios estadísticos locales (Q1–Q3), más que de límites normativos rígidos. De esta manera, el cloro libre aporta información clave para la gestión preventiva del riesgo, aunque no debe ser interpretado de forma aislada.

De manera general el análisis de los resultados evidencia que las presiones antrópicas identificadas en la Unidad Hidrográfica del río Tona inciden de manera directa en la variabilidad de la calidad del agua, particularmente en parámetros microbiológicos y fisicoquímicos asociados

a vertimientos domésticos y actividades productivas. No obstante, más allá de la descripción de estos patrones, es necesario interpretar dichos hallazgos en el marco de experiencias previas de monitoreo participativo y gobernanza del recurso hídrico.

En general el análisis de los resultados obtenidos en la Unidad Hidrográfica del río Tona permite evidenciar que el monitoreo participativo constituye una herramienta fundamental para la comprensión de las dinámicas del recurso hídrico, especialmente en contextos donde las presiones antrópicas asociadas a usos del suelo y vertimientos inciden directamente en la calidad del agua. A partir de la información generada en campo, fue posible identificar la relación entre estas actividades y la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, lo cual aporta insumos relevantes para el entendimiento de los usos del agua y su incidencia en el sistema hídrico.

En este sentido, los resultados del presente estudio se articulan con enfoques de monitoreo participativo que destacan la importancia de la generación de información desde el territorio como base para la gestión ambiental, en donde la participación de actores locales permite ampliar la cobertura del monitoreo y fortalecer la apropiación social del conocimiento. (Vera et al., 2025). Este tipo de procesos no solo contribuye a la producción de datos, sino que establece condiciones para la interacción entre comunidad e instituciones, elemento clave en la consolidación de esquemas de gobernanza del agua.

A nivel regional, la propuesta metodológica desarrollada para la cuenca del río Frío se constituye en un referente relevante en la estructuración de procesos para la gestión del recurso hídrico, al plantear una ruta organizada basada en la articulación de actores, la definición de fases y la integración de herramientas técnicas (Gómez y Rueda, 2021). En este contexto, los resultados obtenidos en la Unidad Hidrográfica del río Tona permiten complementar dicho enfoque, evidenciando que la implementación en escenarios reales incorpora dinámicas territoriales,

sociales e institucionales que fortalecen la aplicabilidad de estas metodologías y su proyección hacia procesos de gobernanza.

Por otra parte, al contrastar los resultados con estudios desarrollados en otras cuencas latinoamericanas, se reafirma que la sostenibilidad de los procesos de monitoreo participativo depende de la articulación efectiva entre comunidad, instituciones y conocimiento técnico, promoviendo esquemas de gestión más integrados e inclusivos. De igual manera, enfoques de gobernanza del agua en contextos binacionales destacan que la coordinación entre actores, el intercambio de información, el monitoreo y la toma de decisiones conjunta son elementos fundamentales para la gestión del recurso hídrico, especialmente en territorios donde confluyen múltiples intereses y escalas de intervención (Pozo Alvear y Terán Rosero, 2025)

En el contexto colombiano, particularmente en el departamento de Santander, la gobernanza del agua se entiende como un proceso que articula actores institucionales, comunitarios y productivos, en el cual la generación, circulación y uso de la información juega un papel central en la toma de decisiones y en la gestión del territorio (Ortiz Blanco, 2021). Bajo esta perspectiva, los resultados del presente estudio evidencian que el monitoreo participativo aporta directamente a estos procesos, en la medida en que genera información localizada, promueve la participación de la comunidad y facilita la interacción con las instituciones responsables de la gestión del recurso hídrico.

En este marco, los datos obtenidos a partir del monitoreo participativo no solo permiten identificar las presiones antrópicas y los usos del agua en la cuenca, sino que se constituyen en un insumo estratégico para la toma de decisiones, la planificación y la priorización de acciones en el territorio, esto fortalece la gobernanza del agua al permitir que la información sea compartida,

interpretada y utilizada de manera conjunta entre actores, favoreciendo procesos más transparentes, inclusivos y adaptativos.

En consecuencia, el monitoreo participativo se posiciona como un componente clave en la construcción de esquemas de gobernanza del agua, en tanto promueve la articulación entre actores, el reconocimiento de las dinámicas territoriales y la construcción colectiva de conocimiento. Es así como, la experiencia desarrollada en la Unidad Hidrográfica del río Tona aporta a la consolidación de enfoques integrales de gestión del recurso hídrico, donde la información generada no solo permite comprender el estado del sistema, sino también fortalecer la toma de decisiones y la gestión participativa a escala local.

#### ***4.3.2 Análisis comparativo de los datos del monitoreo participativo con campañas de monitoreo***

Con el fin de validar y fortalecer los resultados obtenidos a partir del monitoreo participativo desarrollado durante los años 2022 y 2023, en la presente investigación se plantea un ejercicio de comparación metodológica y analítica con los datos provenientes de campañas de monitoreo realizadas por laboratorio acreditado ante el IDEAM, empleando métodos analíticos de mayor complejidad y costo. Este ejercicio no busca sustituir el monitoreo comunitario, sino evaluar su coherencia, complementariedad y capacidad para identificar tendencias relevantes en la calidad del agua del río Tona.

El monitoreo participativo se llevó a cabo de manera sistemática en seis puntos estratégicos del sistema, representativos de diferentes condiciones del cauce, permitiendo caracterizar el comportamiento espacial y temporal de variables fisicoquímicas y microbiológicas en el periodo reciente, estos datos, obtenidos con una frecuencia mayor y mediante metodologías de bajo costo,

constituyen la base operativa para el análisis de tendencias y la definición de umbrales en el marco del Sistema de Alertas Tempranas (SAT).

Para efectos de validación, los resultados del monitoreo participativo fueron comparados con los registros históricos y recientes de laboratorio en puntos espacialmente equivalentes o hidráulicamente relacionados. En este sentido, el punto RT-01A TONA reviste una importancia particular, dado que corresponde a un sitio que ha sido monitoreado de forma continua durante varios años, incluso antes de la implementación del esquema participativo. Por esta razón, RT-01A se considera un punto de referencia histórico, que permite evaluar la consistencia temporal de los datos y analizar la evolución de la calidad del agua en el tramo intermedio del río Tona.

Adicionalmente, se establecieron equivalencias espaciales entre los puntos del monitoreo participativo y los puntos de laboratorio más recientes, lo que permite realizar comparaciones directas para el periodo 2022–2023 que, si bien los métodos de laboratorio ofrecen una mayor exactitud analítica y una mayor capacidad de detección, el monitoreo participativo aporta una mayor resolución temporal y una lectura más cercana a los eventos cotidianos que afectan la calidad del agua.

En este sentido, la comparación entre ambos conjuntos de datos se orienta a identificar coincidencias en rangos, tendencias y eventos críticos, así como a reconocer las limitaciones y alcances de cada metodología, en esta forma, el análisis conjunto permite sustentar que el monitoreo participativo no solo es una herramienta válida para la gestión comunitaria del recurso hídrico, sino que también puede integrarse de manera técnica y metodológicamente sólida a esquemas formales de seguimiento y alerta temprana, utilizando los datos históricos de laboratorio como soporte y mecanismo de calibración.

En la Tabla 40, se presenta la geolocalización de los puntos monitoreados dentro de las campañas realizadas en 2022-2023.

**Tabla 40.** *Puntos de monitoreo campañas*

Puntos de monitoreo campañas	O	N	Z	UH	UH subsecuente	Área de drenaje
RT-01A TONA	73° 1' 35,726"	7° 10' 28,553"	1291	2319-1 Rio Surata	2319-1-4 Tona	3-Rio Tona alto
RT-02 EL PALMAR	73° 04' 58.8"	7° 11' 46.7"	1893	2319-1 Rio Surata	2319-1-4 Tona	5.a-Rio Tona medio-
RT-01B CASA HOTEL	73°00'42.3''	7°10'32''	1418	2319-1 Rio Surata	2319-1-4 Tona	8- RíoTona bajo

En la Tabla 41, se registran los resultados para el punto RT-01A TONA en el periodo 2018-2023.

**Tabla 41.** *Resultados Punto RT-01A TONA (campaña de monitoreo)*

Fecha Muestreo	Alcalinidad	Caudal	Colif, Fecales	Conductividad	Dureza	Fósforo Total	Nitrat os	Nitrit os	OD	SS T	T °C	pH
	[mg/l]	[m³/s]	[NMP/100]	[us/m]	[mg/l]	[mgP/l]	[mgN/l]	[mgN/l]	[mgO <sub>2</sub> /l]	[mg/l]	[C]	[Unidades]
19/06/2018	79,4	0,8	13000	211	89,6	0,05	0,12	0,005	8,05	144	19,2	7,91
21/08/2018	98,9	0,252	1400	196,8	119	0,05	0,1	0,008	7,04	155	26,5	8,09
9/11/2018	70,5	2,5157	1700	178,7	88,6	0,05	0,13	0,006	8,06	142	18,2	7,83
23/11/2018	69,8	1,8131	7000	177,6	77,2	0,05	0,1	0,005	7,91	126	20,5	7,35
12/06/2019	71,9	2,586	9200	173,8	86,2	0,06	0,17	0,005	7,55	121	21,3	8,07
15/08/2019	95,8	0,186	46000	232	115	0,05	0,16	0,006	8,01	152	19,3	8,37
10/10/2019	54,3	0,275	24000	125	58	0,07	0,31	0,008	8,38	99	17,9	7,94
7/12/2020	81,5	1,165	3300	204,1	102	0,1	0,1	0,005	7,99	129	19,3	7,8
28/01/2021	119	2,26	1300	302	131	0,45	0,13	0,005	7,98	182	18,1	7,69
4/08/2021	55,2	1,276	7900	136	78,2	0,05	0,3	0,009	7,67	112	19,7	7,13
6/10/2021	61,4	1,129	4900	139,7	70	0,05	0,25	0,005	7,67	94	18,6	8,09
22/11/2021	96,1	0,225	3300	232	113	0,06	0,1	0,008	7,68	154	21,1	8,14
24/08/2022	55,8	0,781	7900	135	60,5	0,07	0,23	0,01	7,69	90	17,7	7,02

Fecha Muestreo	Alcalinidad	Caudal	Colif.Fecales	Conductividad	Dureza	Fósforo Total	Nitratos	Nitritos	OD	SS T	T °C	pH
	[mg/l]	[m³/s]	[NMP/100]	[us/m]	[mg/l]	[mgP/l]	[mgN/l]	[mgN/l]	[mgO <sub>2</sub> /l]	[mg/l]	[C]	[Unidades]
1/10/2022	70,7	1,175	7900	163,7	173	0,65	0,18	0,015	7,7	770	19,1	7,58
17/11/2022	92,8	3,658	7900	230	165	0,14	0,12	0,024	7,93	272	20,2	8,43
24/06/2023	***	1,031	***	191,3	***	***	***	***	7,95	***	19,7	8,04
17/07/2023	***	0,379	***	240	***	***	***	***	7,16	***	19,8	8,51
1/08/2023	65,5	0,646	4900	289	86,8	0,07	0,2	< 0,005	7,73	118	20,67	7,54
16/08/2023	***	0,494	***	235	***	***	***	***	7,05	***	18	8,51
28/08/2023	***	0,838	***	160,2	***	***	***	***	7,43	***	16,1	8,71
4/09/2023	***	1,452	***	***	***	***	***	***	***	***	16,1	8,48
26/09/2023	***	0,363	***	130,8	***	***	***	***	8,29	***	20,3	8,11
13/10/2023	***	0,724	***	***	***	***	***	***	***	***	16,9	6,95
17/10/2023	68,3	0,531	13000	202	85,5	0,05	0,14	< 0,005	7,04	125	21	8,57
10/11/2023	***	0,609	***	***	***	***	***	***	***	***	17,2	6,86

Los resultados obtenidos en las campañas de monitoreo realizadas mediante laboratorio acreditado ante el IDEAM en el punto RT-01A TONA, permiten caracterizar el comportamiento hidro químico y microbiológico del tramo intermedio del río Tona, el cual no coincide exactamente con un punto del monitoreo participativo, pero se localiza espacialmente entre el Punto 3 y el Punto 6 sobre el cauce principal. Esta condición hace que los datos de RT-01A funcionen como un referente de validación longitudinal, particularmente útil para evaluar la coherencia espacial de la información generada por la red comunitaria.

Desde el análisis estadístico, los valores de alcalinidad (54,3–119 mg/L) y dureza (58–173 mg/L) muestran una variabilidad moderada a lo largo del periodo 2018–2023, lo cual es consistente con cambios en el régimen hidrológico y con la influencia combinada de aportes naturales y antrópicos en este tramo, estas variables presentan oscilaciones suaves, comportamiento que coincide con las tendencias observadas en los puntos participativos adyacentes, reforzando la validez de estos últimos para la lectura de condiciones estructurales del sistema.

La conductividad eléctrica presenta un rango amplio (125–302  $\mu\text{S}/\text{m}$ ), con incrementos puntuales asociados a periodos de menor caudal y a eventos de mayor carga de sólidos disueltos, lo cual es coherente con el aumento observado en sólidos totales (hasta 770 mg/L en octubre de 2022), evidenciando episodios específicos de arrastre de material fino y aportes difusos.

El oxígeno disuelto se mantiene mayoritariamente en valores adecuados (7,04–8,38 mgO<sub>2</sub>/L), indicando una buena capacidad de reaeración y ausencia de procesos críticos de agotamiento de oxígeno, incluso en periodos con alta carga microbológica. Esta estabilidad del O.D. ha sido documentada en ríos de montaña con alta turbulencia, donde la oxigenación natural compensa incrementos temporales de materia orgánica. (Ma et al., 2025)

En contraste, los resultados microbiológicos muestran altas concentraciones de coliformes fecales, con valores que alcanzan hasta 46.000 NMP/100 mL (fecales) en algunos eventos. La variabilidad observada, sugiere una fuerte influencia de descargas domésticas y escorrentía superficial, especialmente durante periodos de lluvia o aumentos de caudal. Este comportamiento es coherente con lo registrado en el Punto 6 del monitoreo participativo y confirma que la afectación microbológica constituye una de las principales presiones sobre la calidad del agua en el tramo bajo del río Tona.

Las concentraciones de nitratos (0,10–0,31 mgN/L) y nitritos ( $\leq 0,024$  mgN/L) se mantienen en rangos bajos, mientras que el fósforo total presenta valores generalmente reducidos, aunque con algunos picos (hasta 0,65 mgP/L) que podrían estar asociados a aportes puntuales, en conjunto, estos resultados indican que, si bien existe una presión antrópica clara desde el punto de vista microbológico, los procesos de enriquecimiento trófico no parecen ser dominantes de manera permanente en este tramo.

Desde una perspectiva metodológica, la comparación entre los datos de RT-01A TONA y los registros del monitoreo participativo ubicados aguas arriba y aguas abajo evidencia una consistencia espacial en las tendencias, especialmente para parámetros fisicoquímicos como conductividad, alcalinidad y oxígeno disuelto, esto respalda el uso del monitoreo participativo como una herramienta confiable para la detección temprana de cambios relevantes, mientras que el laboratorio acreditado cumple un rol clave en la validación puntual y el ajuste fino de los umbrales utilizados en el Sistema de Alertas Tempranas (SAT).

En la Tabla 42, se registran los resultados para el punto RT-02 EL PALMAR en el año 2023, fecha donde se incluyó dentro de las campañas de monitoreo.

**Tabla 42.** *Resultados Punto RT-02 EL PALMAR (campaña de monitoreo)*

Fecha Muestreo	Alcalinidad [mg/l]	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Colif.Fecales [NMP/100]	Conductividad [us/m]	Dureza [mg/l]	Fósforo Total [mgP/l]	Nitratos [mgN/l]	Nitritos [mgN/l]	OD [mgO <sub>2</sub> /l]	SS [mg/l]	T [°C]	pH
1/08/2023	98,9	0,372	330	258	145,9	0,07	<0,1	<0,005	6,89	185	20,2	8,18
17/10/2023	108	0,458	2300	327	142	<0,05	<0,1	<0,005	6,93	208	22	8,65

Los resultados obtenidos a partir de las campañas de monitoreo realizadas por laboratorio acreditado ante el IDEAM en el punto RT-02 EL PALMAR, correspondiente al Punto 1 del monitoreo participativo, permiten realizar una validación directa de los datos generados mediante metodologías comunitarias, así como una lectura comparativa de la calidad del agua en el tramo alto del río Tona.

Desde el análisis estadístico, los valores de alcalinidad (98,9–108 mg/L) y dureza (142–145,9 mg/L) presentan una baja variabilidad entre campañas, lo que indica una condición hidroquímica relativamente estable, asociada principalmente a la geología local y al bajo nivel de intervención antrópica directa en este sector. Este comportamiento es coherente con los registros

del monitoreo participativo, donde se identifican rangos similares y una dispersión limitada, reforzando la confiabilidad de los datos de bajo costo para la identificación de tendencias generales.

En términos de conductividad (258–327  $\mu\text{S}/\text{m}$ ), se observa un incremento moderado entre agosto y octubre de 2023, el cual se refleja también en el aumento de sólidos totales (185–208 mg/L), se sugiere que esta tendencia puede indicar una mayor carga iónica disuelta durante el segundo muestreo, posiblemente asociada a variaciones de caudal y aportes difusos temporales. Este tipo de comportamiento ha sido documentado en ríos de montaña, donde los cambios hidrológicos estacionales influyen de manera directa en la concentración de sales disueltas (Zhang et al., 2019).

El oxígeno disuelto se mantuvo en valores adecuados (6,89–6,93 mgO<sub>2</sub>/L), evidenciando condiciones favorables de oxigenación y ausencia de procesos severos de degradación orgánica. Esta estabilidad coincide con las mediciones participativas realizadas en el Punto 1, donde se registran valores consistentemente altos de O.D., lo que confirma la capacidad del monitoreo comunitario para identificar condiciones de buena calidad ecológica del agua.

En contraste, el análisis microbiológico revela un incremento significativo de coliformes fecales y totales, pasando de 330 NMP/100 mL en agosto a 2.300 NMP/100 mL en octubre de 2023. Este cambio, claramente visible en la comparación gráfica entre campañas, sugiere la ocurrencia de eventos puntuales de contaminación, posiblemente asociados a escorrentía superficial o aportes domésticos temporales. Este tipo de variabilidad episódica ha sido ampliamente reportada en estudios recientes, donde se destaca la importancia de muestreos frecuentes para la detección temprana de riesgos sanitarios. (Bain et al., 2014)

Las concentraciones de nitratos (<0,1 mgN/L) y nitritos (<0,005 mgN/L) se mantuvieron por debajo de los límites de detección, mientras que el fósforo total presentó valores bajos (0,07 mgP/L y <0,05 mgP/L), lo que indica que, para el periodo evaluado, no se evidencian condiciones de enriquecimiento trófico significativo. Este resultado es consistente con lo observado en el monitoreo participativo y refuerza la interpretación de que las principales presiones sobre la calidad del agua en este punto están más relacionadas con la carga microbiológica que con procesos de eutrofización.

Desde una perspectiva metodológica, la comparación entre los datos de laboratorio acreditado y el monitoreo participativo demuestra que, aunque los métodos de alto costo ofrecen mayor exactitud analítica y detección de parámetros específicos, los datos comunitarios reproducen adecuadamente las tendencias espaciales y temporales, especialmente para variables fisicoquímicas clave. En este sentido, el laboratorio actúa como un mecanismo de validación y calibración, mientras que el monitoreo participativo cumple un rol fundamental en la detección continua de eventos críticos, aportando insumos esenciales para la implementación del Sistema de Alertas Tempranas (SAT).

En la Tabla 43, se registran los resultados para el punto RT-01B CASA HOTEL en el año 2023, fecha donde se incluyó dentro de las campañas de monitoreo.

**Tabla 43.** *Resultados Punto RT-01B CASA HOTEL (campaña de monitoreo)*

Fecha Muestreo	Alcalinidad [mg/l]	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Colif.Fecales [NMP/100]	Conductividad [us/m]	Dureza [mg/l]	Fósforo Total [mgP/l]	Nitratos [mgN/l]	Nitritos [mgN/l]	OD [mgO <sub>2</sub> /l]	SS T [mg/l]	T °C [C]	pH [Unidades]
1/08/2023	98,9	0,372	330	258	145,9	0,07	<0,1	<0,005	6,89	185	20,2	8,18
17/10/2023	108	0,458	2300	327	142	<0,05	<0,1	<0,005	6,93	208	22	8,65

Los resultados obtenidos en la campaña de monitoreo realizada mediante laboratorio acreditado por el IDEAM (RT-01B CASA HOTEL), correspondiente espacialmente al Punto 6 del monitoreo participativo, permiten validar y complementar la información generada por los métodos comunitarios de bajo costo, aportando una referencia de alta precisión analítica para el análisis del sistema.

Desde el punto de vista fisicoquímico, los valores de alcalinidad (66,9–68,2 mg/L) y dureza (71,5–97,1 mg/L) son consistentes con los rangos observados en el monitoreo participativo, lo que sugiere una estabilidad geoquímica del sistema en este tramo medio–bajo del río Tona. Esta coherencia entre metodologías respalda la confiabilidad de los datos participativos para la identificación de tendencias generales, aun cuando presentan una mayor variabilidad temporal.

El oxígeno disuelto mostró concentraciones elevadas (6,85–8,78 mgO<sub>2</sub>/L), lo cual es concordante con las mediciones participativas previas y refleja condiciones adecuadas de oxigenación, asociadas a procesos de mezcla y autodepuración natural. Sin embargo, se evidencia una ligera disminución del O.D. en el muestreo de octubre, lo que podría estar relacionado con variaciones de caudal y carga orgánica puntual, situación que el monitoreo participativo permite identificar con mayor frecuencia temporal.

En contraste, los resultados microbiológicos del laboratorio evidencian altas concentraciones de coliformes fecales y totales (2.200–4.900 NMP/100 mL y hasta 7.900 NMP/100 mL), confirmando la presión antrópica sobre este tramo del río. Estos valores coinciden con la detección recurrente de afectación microbiológica en el Punto 6 del monitoreo participativo, validando su utilidad como indicador temprano de riesgo sanitario, a pesar de emplear metodologías más simples.

En cuanto a nutrientes, las concentraciones de nitratos (0,16–0,24 mgN/L) y nitritos (<0,005 mgN/L) se mantienen bajas, lo cual concuerda con los registros participativos y sugiere que la principal presión sobre la calidad del agua en este punto no está asociada a eutrofización, sino a aportes microbiológicos de origen doméstico. La detección de fósforo total (0,23 mgP/L) en una de las campañas refuerza la necesidad de mantener vigilancia sobre eventos puntuales que podrían detonar procesos de enriquecimiento trófico en condiciones hidrológicas desfavorables.

Desde una perspectiva estadística y operativa, la comparación entre los datos de laboratorio y el monitoreo participativo evidencia que, aunque los métodos acreditados presentan mayor exactitud y un mayor costo, los datos comunitarios reproducen adecuadamente las tendencias, rangos y eventos críticos, lo que los convierte en una herramienta eficaz para la activación de alertas tempranas. En este sentido, el laboratorio cumple un rol de validación y ajuste, mientras que el monitoreo participativo permite una lectura continua del sistema, fundamental para la gestión adaptativa del recurso hídrico.

El enfoque adoptado en esta investigación se fundamenta en la necesidad de equilibrar el análisis local con la comparabilidad temporal y espacial de los datos, principio ampliamente discutido en la literatura hidrológica contemporánea. Al respecto, en el estudio de (Gupta et al., 2014) señalan que el entendimiento de los procesos hidrológicos no puede lograrse únicamente mediante estudios intensivos en puntos altamente instrumentados, sino que requiere integrar análisis comparativos basados en múltiples series de datos, que permitan identificar patrones, tendencias y comportamientos recurrentes bajo diferentes condiciones espaciales y temporales. En este sentido, el uso de conjuntos de datos obtenidos en distintos periodos de monitoreo permite fortalecer la robustez de las interpretaciones, reducir la influencia de eventos aislados y diferenciar variaciones estructurales del sistema hídrico frente a fluctuaciones coyunturales, adicionalmente

se debe incluir la comparación sistemática de múltiples observaciones que facilita la detección de comportamientos representativos del sistema, así como la identificación de valores atípicos que requieren un análisis contextual específico, sin que estos distorsionen las conclusiones generales. En consecuencia, la metodología adoptada en esta tesis se alinea con los principios de la hidrología comparativa y del análisis de muestras múltiples, contribuyendo a una lectura más consistente y operativa de los resultados del monitoreo participativo.

#### ***4.3.3 Parametrización del SAT***

A partir de la revisión de experiencias nacionales e internacionales, se evidencia que la selección de criterios para la implementación de sistemas de alertas tempranas depende de las características hidrológicas, climáticas y sociales de cada territorio, así como de la disponibilidad de información y el nivel de participación comunitaria, en cuencas de montaña y de bajo orden, como la Unidad Hidrográfica del río Tona, los SAT más efectivos son aquellos que priorizan variables de respuesta rápida, combinan información hidrometeorológica con parámetros de calidad del agua y se apoyan en esquemas de monitoreo participativo, es decir la definición de los parámetros del SAT para el río Tona se fundamenta en la integración de los análisis estadísticos del monitoreo participativo, los estudios oficiales de amenaza por inundación y avenidas torrenciales, y las lecciones aprendidas de experiencias previas, con el fin de establecer umbrales operativos que permitan una detección temprana de eventos críticos y fortalezcan la capacidad de respuesta comunitaria.

**4.3.3.1 Selección de parámetros y criterios para el diseño del SAT.** La Tabla 44 presenta una síntesis comparativa de experiencias nacionales e internacionales relacionadas con la

implementación de Sistemas de Alertas Tempranas (SAT) en contextos hidrológicos, comunitarios, agroclimáticos y de calidad del agua, las cuales constituyen referentes metodológicos y operativos para el diseño del SAT en la Unidad Hidrográfica del río Tona, esta integra iniciativas basadas tanto en enfoques tecnológicos automatizados como en esquemas participativos, evidenciando la diversidad de variables monitoreadas como: nivel, caudal, precipitación, turbidez, parámetros microbiológicos y condiciones climáticas; así como la aplicación de herramientas estadísticas, modelos predictivos, simulaciones hidráulicas y redes de observadores locales.

Este análisis comparativo permite identificar criterios transferibles al contexto del río Tona, tales como la definición espacial de puntos críticos de monitoreo, la pertinencia de umbrales multivariados, la incorporación de sensores de bajo costo, el uso de indicadores de calidad del agua como señales tempranas y, de manera transversal, el rol estratégico de la participación comunitaria en la sostenibilidad operativa del sistema.

**Tabla 44.** *Experiencias de sistemas de alertas tempranas y criterios relevantes para el diseño del SAT del río Tona*

<b>Experiencia / Localización</b>	<b>Tipo de SAT</b>	<b>Variables monitoreadas</b>	<b>Enfoque metodológico</b>	<b>Aporte al diseño del SAT río Tona</b>
Tabio, Cundinamarca (Castillo et al., 2020)	Comunitario – hidrológico	Caudal, nivel, precipitación	Simulación hidráulica y análisis histórico	Importancia de sensores en ríos de bajo caudal y definición espacial de puntos críticos
San Bernardo de Bata, Norte de Santander (Rojas, 2019)	Comunitario – hidro climático	Precipitación, ocurrencia de deslizamientos	Análisis estadístico (Gumbel, Log-normal) y validación con eventos históricos	Relación lluvia–evento como base para definir umbrales de alerta
El Salvador (García, 2013)	Comunitario – participativo	Observaciones de lluvia y nivel	Red social de observadores locales	Rol de la comunidad como actor clave del SAT
Red de biosensores rurales (Castaño et al., 2019)	Tecnológico – calidad del agua	Coliformes, metales, pesticidas	Biosensores de bajo costo	Uso de parámetros de calidad como señales tempranas de alerta
Arauca (Cárdenas-Rodríguez et al., 2022)	Automatizado – IA	Nivel, caudal, precipitación	Redes neuronales y modelos neurodifusos	Potencial de modelos predictivos para crecientes súbitas

<b>Experiencia / Localización</b>	<b>Tipo de SAT</b>	<b>Variables monitoreadas</b>	<b>Enfoque metodológico</b>	<b>Aporte al diseño del SAT río Tona</b>
Mocoa, Putumayo (Ramos-Cañón et al., 2023)	Técnico-comunitario	Precipitación, intensidad, caudal	Modelos físicos y probabilísticos	Definición de umbrales multivariados por avenidas torrenciales
Subachoque, Cundinamarca (Camacho et al., 2020)	Agroclimático participativo	Temperatura, precipitación	Análisis histórico y saber local	Integración de conocimiento local para toma de decisiones
España – Sierra de Ubrique (Fernández Ortega et al., 2023)	Calidad del agua	Turbidez, E. coli, caudal	Monitoreo continuo en eventos de crecida	Uso de turbidez y bacterias como indicadores tempranos

La definición de los parámetros y umbrales del Sistema de Alertas Tempranas (SAT) para la Unidad Hidrográfica del río Tona se fundamenta en la integración de los resultados del monitoreo participativo, el análisis estadístico descriptivo y de tendencias desarrollado en los numerales anteriores, y la información secundaria proveniente de estudios oficiales de amenaza por inundación y avenidas torrenciales, este enfoque permite establecer un conjunto de variables clave que responden de manera sensible a eventos hidrometeorológicos extremos y a procesos de deterioro de la calidad del agua, especialmente en cuencas de montaña y de bajo orden, donde los tiempos de respuesta hidrológica son cortos.

Los parámetros seleccionados se agrupan en dos componentes principales: cantidad del agua y calidad del agua, los cuales se articulan bajo un enfoque operativo que facilita la interpretación de señales tempranas y la activación progresiva de niveles de alerta.

La definición de umbrales no se plantea como valores fijos o rígidos, sino como rangos operativos ajustables, los cuales podrán ser refinados a partir de la validación en campo, los datos históricos, la ocurrencia de eventos reales y el fortalecimiento del sistema de monitoreo comunitario. Esta se desarrolló a partir de un enfoque metodológico integrado, que combina el análisis estadístico de datos provenientes del monitoreo participativo, la revisión de información secundaria oficial y la adaptación de experiencias previas de sistemas de alerta temprana

implementados en contextos similares. El proceso metodológico se estructuró en cuatro etapas principales: (i) selección de parámetros relevantes, (ii) análisis estadístico y definición de umbrales, (iii) clasificación de niveles de alerta, y (iv) asignación de responsabilidades y acciones asociadas.

En la primera etapa se seleccionaron los parámetros a incluir en el SAT, priorizando aquellos que presentan una respuesta sensible y rápida ante eventos hidrometeorológicos extremos y procesos de deterioro de la calidad del agua, es decir se fundamentó en los resultados del monitoreo participativo, donde se evidenció la variabilidad temporal de parámetros de cantidad del agua (nivel y caudal) y de calidad del agua (conductividad, sólidos disueltos totales, oxígeno disuelto, nutrientes y *Escherichia coli*). Asimismo, se consideró la viabilidad técnica de su medición en campo mediante instrumentos de bajo costo y fácil operación por parte de la comunidad.

En la segunda etapa se realizó el análisis estadístico de los datos disponibles, utilizando herramientas de estadística descriptiva y análisis gráfico para identificar rangos de variabilidad, valores extremos y comportamientos atípicos, para la definición de umbrales se emplearon criterios basados en percentiles y rangos intercuartílicos (Q3 e IQR), especialmente en parámetros de comportamiento transitorio como los nitritos, con el fin de diferenciar eventos anómalos reales de la variabilidad natural del sistema. En el caso de las variables hidrológicas, los umbrales se complementaron con información proveniente de estudios oficiales de amenaza por inundación y avenidas torrenciales, considerando caudales asociados a periodos de retorno y niveles críticos históricos.(IDEAM, 2024)

La tercera etapa consistió en la clasificación de los niveles de alerta, estableciendo una estructura escalonada que incluye alertas preventiva, amarilla, naranja y roja. Esta clasificación

permite una activación progresiva del SAT, evitando respuestas sobredimensionadas ante fluctuaciones normales del sistema y garantizando una respuesta oportuna frente a eventos críticos, cada nivel de alerta se asocia a condiciones específicas de superación de umbrales y a un conjunto de acciones predefinidas, facilitando la toma de decisiones tanto a nivel comunitario como institucional.

Finalmente, en la cuarta etapa se definieron los actores responsables de la validación de la información, la comunicación de la alerta y la coordinación de la respuesta, bajo un enfoque de gobernanza del agua, reconociendo el rol central de la comunidad en la generación de datos y la activación temprana del sistema, así como la responsabilidad de las autoridades ambientales, municipales y sanitarias en la gestión del riesgo y la implementación de medidas correctivas.

De manera complementaria, la tabla de niveles de alerta fue concebida como una herramienta dinámica y adaptable, susceptible de ajustes a partir de la validación en campo, la ocurrencia de eventos reales y la mejora progresiva de la base de datos del SAT, este carácter flexible resulta fundamental para garantizar la sostenibilidad del sistema frente a la variabilidad climática y los cambios en el uso del suelo, permitiendo que el SAT del río Tona evolucione de manera coherente con las condiciones del territorio y las capacidades locales.

**Tabla 45.** *Parámetros, umbrales y niveles de alerta propuestos para el SAT del río Tona*

Componente	Parámetro	Unidad	Fuente de información	Umbral de referencia	Nivel de alerta	Actor responsable
<b>Cantidad del agua</b>	Precipitación acumulada 24 h	mm	IDEAM / pluviómetros comunitarios	$\geq$ percentil 75 histórico	Preventiva	Comunidad / CDMB/IDEAM
	Precipitación acumulada 24 h	mm	IDEAM / comunitario	$\geq$ percentil 90 histórico	Amarilla	CDMB / Gestión del Riesgo
	Nivel del río	m	Regla limnimétrica comunitaria	Incremento $\geq$ 20 % respecto al nivel base	Amarilla	Comunidad
	Nivel del río	m	Regla limnimétrica	Supera nivel crítico histórico	Naranja	Alcaldía / CDMB/ Gestión del Riesgo

Componente	Parámetro	Unidad	Fuente de información	Umbral de referencia	Nivel de alerta	Actor responsable
Calidad del agua	Caudal estimado	m <sup>3</sup> /s	Aforo indirecto / modelo	Cercano a caudal TR25	Naranja	CDMB
	Caudal estimado	m <sup>3</sup> /s	Modelo hidrológico	Cercano a caudal TR50–100	Roja	Gestión del Riesgo
	Turbidez	NTU	Observación visual / kit	Aumento abrupto y sostenido	Preventiva	Comunidad
	Conductividad eléctrica	μS/cm	Multiparámetro	Variación > 20 % del promedio	Amarilla	Comunidad
	Sólidos disueltos totales (TDS)	mg/L	Multiparámetro	Incremento sostenido post-lluvia	Amarilla	Comunidad
	Oxígeno disuelto (OD)	mg/L	Multiparámetro	Descenso por debajo del percentil 25	Amarilla	Comunidad
	Nitritos (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	Kit colorimétrico	Detección recurrente	Preventiva	Comunidad
	Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	Kit colorimétrico	Incremento post-evento de lluvia	Amarilla	Comunidad
	<i>E. coli</i>	Pres/aus	Kit microbiológico	Presencia positiva	Naranja	Autoridad sanitaria
<i>E. coli</i>	Pres/aus	Kit microbiológico	Presencia repetida	Roja	Autoridad sanitaria	

Los parámetros asociados a la cantidad del agua responden a la necesidad de detectar crecientes súbitas e inundaciones en un contexto de cuenca de montaña, donde la precipitación intensa y concentrada constituye el principal factor detonante. La precipitación acumulada en 24 horas se prioriza como variable de alerta temprana debido a su relación directa con la escorrentía superficial y el incremento rápido del caudal, mientras que el nivel del río y el caudal estimado permiten confirmar la evolución del evento y escalar el nivel de alerta de forma progresiva.

Por su parte, los parámetros de calidad del agua cumplen una doble función dentro del SAT; en primer lugar, actúan como indicadores indirectos de eventos hidrológicos extremos, ya que variables como conductividad y TDS suelen presentar aumentos abruptos durante episodios de lluvia intensa y arrastre de sedimentos y en segundo lugar, permiten identificar riesgos sanitarios asociados a la movilización de contaminantes y microorganismos, especialmente en

puntos de captación y uso doméstico del agua. La inclusión de *Escherichia coli* como parámetro de alerta responde a su relevancia como indicador microbiológico y a la viabilidad de su detección mediante kits de monitoreo participativo.

La asignación de niveles de alerta (preventiva, amarilla, naranja y roja) facilita la toma de decisiones escalonada y la activación de protocolos de comunicación y respuesta, tanto a nivel comunitario como institucional, de igual forma, la definición de actores responsables para cada parámetro refuerza el enfoque de gobernanza del SAT, promoviendo la corresponsabilidad entre comunidad, autoridades ambientales y entidades de gestión del riesgo.

Los umbrales aquí propuestos deberán ser entendidos como valores iniciales de referencia, susceptibles de ajuste a partir del análisis de nuevos datos, la ocurrencia de eventos extremos y los procesos de retroalimentación con la comunidad monitora. Este carácter adaptativo resulta fundamental para garantizar la sostenibilidad y efectividad del SAT del río Tona en el tiempo.

**4.3.3.2 Protocolo de activación y comunicación del Sistema de Alertas Tempranas (SAT) del río Tona.** El protocolo de activación y comunicación del Sistema de Alertas Tempranas (SAT) del río Tona constituye el componente operativo que permite transformar los datos generados por el monitoreo participativo y los sistemas de medición en acciones concretas de prevención y respuesta, se estructura bajo un enfoque escalonado, participativo y adaptativo, en el cual se definen claramente los roles de los actores involucrados, los niveles de alerta y los canales de comunicación, garantizando una respuesta oportuna ante eventos hidrometeorológicos y de deterioro de la calidad del agua.

El diseño del protocolo reconoce que, en cuencas de montaña y de bajo orden como la del río Tona, los eventos de creciente súbita y contaminación asociada pueden desarrollarse en lapsos

cortos de tiempo, por lo cual la rapidez en la transmisión de la información y la claridad en la toma de decisiones resultan factores críticos para reducir el riesgo.

El protocolo del SAT del río Tona se organiza en cuatro niveles de alerta, los cuales se activan progresivamente en función de la superación de los umbrales definidos para los parámetros de cantidad y calidad del agua:

Alerta preventiva

Alerta amarilla

Alerta naranja

Alerta roja

Cada nivel de alerta implica acciones diferenciadas, responsables específicos y tiempos de respuesta acordes con la magnitud del evento.

Se propone establecer un Flujo operativo del Sistema de Alertas Tempranas, como se describe a continuación.

**4.3.3.2.1 Monitoreo y registro de datos.** La comunidad monitorea realiza el seguimiento periódico de los parámetros definidos (precipitación, nivel del río, variables fisicoquímicas y microbiológicas), utilizando instrumentos básicos como pluviómetros artesanales, reglas limnimétricas, equipos multiparámetro y kits de calidad del agua.

Los datos son registrados en formatos estandarizados, indicando fecha, hora, punto de monitoreo y observaciones de campo relevantes.

**4.3.3.2.2 Validación inicial de la información.** Los datos registrados son sometidos a una validación básica, que incluye la revisión de rangos operativos del instrumento, la coherencia con

condiciones climáticas observadas y la comparación con valores históricos recientes. En caso de detectarse valores inusuales, se realiza una medición de confirmación antes de escalar el nivel de alerta.

**4.3.3.2.3 Comparación con umbrales definidos.** Una vez validados, los datos son comparados con los umbrales operativos establecidos para cada parámetro, si uno o varios parámetros superan los valores de referencia, se procede a la activación del nivel de alerta correspondiente, priorizando siempre el parámetro más crítico.

**4.3.3.2.4 Activación del nivel de alerta.** La activación del nivel de alerta se realiza de manera inmediata por parte del monitor comunitario responsable del punto, quien notifica al coordinador local del SAT. Este actor centraliza la información y verifica la coherencia espacial y temporal del evento antes de iniciar la fase de comunicación.

**4.3.3.2.5 Comunicación y difusión de la alerta.** La información es transmitida a los actores institucionales y comunitarios definidos, utilizando canales previamente acordados (mensajería instantánea, llamadas telefónicas, grupos comunitarios y reportes escritos). En niveles de alerta naranja y roja, se activa la comunicación con las entidades municipales de gestión del riesgo y la autoridad ambiental.

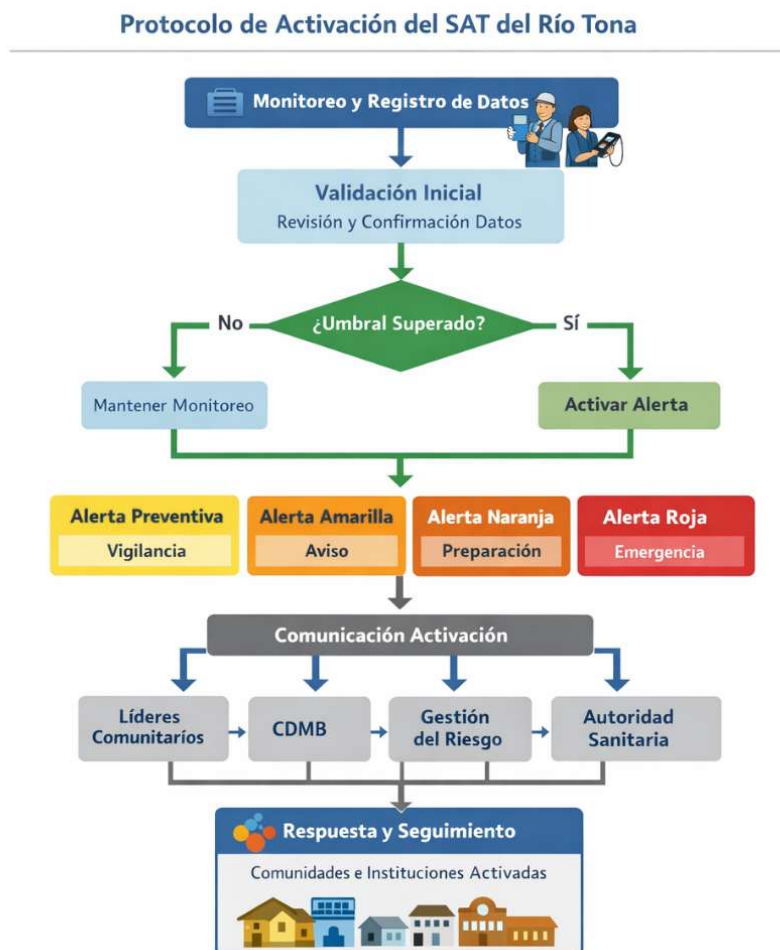
**4.3.3.2.6 Seguimiento y retroalimentación.** Durante el evento, se mantiene el monitoreo continuo y la actualización periódica de la información, luego finalizado el evento, se realiza una evaluación conjunta para identificar oportunidades de mejora del SAT y ajustar los umbrales o

procedimientos si es necesario. En la Tabla 46, se describe los niveles de alerta las acciones a ejecutar en un tiempo establecido.

**Tabla 46.** Niveles de alerta y acciones a implementar

Nivel de alerta	Condición de activación	Acciones principales	Tiempo de respuesta
Preventiva	Superación leve de umbral o tendencia creciente	Intensificar monitoreo, informar a la comunidad	Inmediato (0-1 h)
Amarilla	Superación moderada de umbrales	Notificación a líderes comunitarios y autoridades locales	≤ 1 h
Naranja	Superación crítica de umbrales	Activación de protocolos municipales, preparación para evacuación	≤ 30 min
Roja	Evento en desarrollo o inminente	Evacuación, cierre de captaciones, respuesta institucional	Inmediato

**Figura 25.** Diagrama del Protocolo de operatividad del SAT



Nota. Autor generado por IA

#### **4.3.4 Análisis de los resultados microbiológicos y fisicoquímicos para la operación del Sistema de Alertas Tempranas (SAT)**

Los resultados obtenidos a partir del monitoreo participativo de *Escherichia coli* y del análisis estadístico de parámetros como nitritos permiten establecer implicaciones operativas diferenciadas para cada punto de monitoreo dentro del Sistema de Alertas Tempranas (SAT) del río Tona, esta diferenciación resulta fundamental para priorizar acciones, asignar niveles de alerta y optimizar la respuesta institucional y comunitaria frente a riesgos sanitarios y ambientales.

En este contexto, el Punto 1 cumple la función de línea base del estado natural del sistema, al presentar de manera predominante resultados negativos para *E. coli.*, desde la perspectiva del SAT, este punto se asocia a un nivel de vigilancia, donde la ausencia de contaminación microbiológica confirma condiciones relativamente estables del cuerpo de agua. No obstante, la detección de un evento positivo aislado debe ser interpretada como una alerta preventiva, asociada posiblemente a aportes puntuales o eventos de lluvia intensa y en caso de registrarse dos o más eventos positivos consecutivos, se establece una alerta crítica, dado que esta recurrencia sugiere una alteración sostenida del sistema y un incremento del riesgo sanitario que amerita acciones de verificación y comunicación inmediata.

El Punto 2 se identifica como un punto crítico de riesgo y, por tanto, debe ser tratado como estación prioritaria de alerta temprana para riesgo microbiológico, la presencia de *E. coli* en este punto implica la activación inmediata de una alerta crítica, incluso ante un solo evento positivo, debido a su localización estratégica y a la influencia directa de descargas antrópicas; desde el enfoque del SAT, este punto requiere una articulación directa con acciones de saneamiento y control, lideradas por la autoridad ambiental (CDMB) y el municipio, así como la activación de medidas preventivas para los usuarios aguas abajo. Es importante mencionar que, la priorización

de este punto permite que el sistema de alertas funcione no solo como mecanismo de respuesta, sino también como herramienta de gestión del riesgo y apoyo a la toma de decisiones institucionales.

Por su parte, el Punto 6 cumple una función clave como punto de control de recuperación del sistema, al ubicarse aguas abajo de las principales presiones identificadas, los resultados obtenidos en este punto deben ser interpretados bajo un nivel de vigilancia permanente, permitiendo evaluar la capacidad de autodepuración del río y la evolución de la calidad del agua en relación con los resultados observados en el Punto 2. Desde la estructura del SAT, este punto no solo aporta información para la detección de riesgos, sino que también permite valorar la efectividad de las acciones implementadas aguas arriba y el comportamiento del sistema frente a eventos de contaminación.

Adicionalmente, desde la perspectiva estadística, la combinación del análisis gráfico con los estadísticos descriptivos permite identificar eventos anómalos reales, diferenciándolos de la variabilidad natural del sistema, el uso de umbrales basados en el tercer cuartil (Q3) y el rango intercuartílico (IQR) resulta especialmente adecuado para parámetros como los nitritos, debido a su carácter transitorio y a su alta sensibilidad a cambios rápidos en las condiciones hidrológicas. Este enfoque permite activar alertas tempranas ante incrementos súbitos sin sobredimensionar eventos aislados, lo cual es coherente con esquemas recientes de monitoreo participativo y gestión adaptativa del recurso hídrico, donde se prioriza la detección temprana de cambios relevantes sobre el análisis exclusivo de valores promedio. (Buytaert et al., 2014)

En conjunto, estas implicaciones fortalecen el carácter operativo del SAT del río Tona, al permitir una lectura diferenciada de los puntos de monitoreo y una activación más precisa de los

niveles de alerta, integrando información microbiológica, estadística y territorial en un mismo esquema de toma de decisiones.

Finalmente, el diseño del protocolo de activación y comunicación del SAT, junto con la asignación de roles y responsabilidades, consolida una herramienta operativa que articula el conocimiento local con las directrices institucionales de gestión del riesgo. Si bien el sistema presenta una alta viabilidad técnica, su efectividad dependerá de procesos continuos de validación en campo, fortalecimiento comunitario y respaldo institucional, permitiendo su ajuste progresivo frente a la variabilidad climática y los cambios en el territorio.

## **5. Conclusiones**

La presente investigación permitió definir una ruta estratégica para el monitoreo participativo en la Unidad Hidrográfica del río Tona, orientada al fortalecimiento de la gobernanza del agua y la gestión del riesgo asociado a eventos hidrometeorológicos y de deterioro de la calidad del recurso hídrico. A partir del análisis integrado de información primaria y secundaria, se evidenció que el monitoreo participativo constituye una alternativa viable y pertinente para cuencas de montaña y de bajo orden, donde la cobertura de las redes oficiales de monitoreo resulta limitada.

El análisis estadístico descriptivo y gráfico de los datos obtenidos mediante el monitoreo participativo permitió identificar tendencias, rangos de variabilidad y eventos anómalos relevantes para parámetros de cantidad y calidad del agua. La aplicación de herramientas como el rango intercuartílico (IQR) y el tercer cuartil (Q3) demostró ser adecuada para la validación de datos y la definición de umbrales operativos, especialmente en parámetros de comportamiento transitorio

como los nitritos, evitando la sobredimensión de eventos aislados y fortaleciendo la detección temprana de cambios significativos en el sistema.

La selección de criterios para el diseño del Sistema de Alertas Tempranas (SAT) del río Tona, basada en la revisión de experiencias nacionales e internacionales, permitió establecer un conjunto de parámetros ajustados a las características hidrológicas, climáticas y sociales del territorio. La integración de variables de cantidad del agua, como precipitación, nivel y caudal, con parámetros de calidad del agua, en particular indicadores microbiológicos como *Escherichia coli*, fortaleció el enfoque preventivo del sistema y su utilidad para la protección de los usos del agua aguas abajo.

La definición de umbrales y niveles de alerta diferenciados, junto con la priorización espacial de los puntos de monitoreo, evidenció la capacidad del SAT para focalizar acciones de gestión del riesgo y saneamiento ambiental. En particular, la identificación del Punto 2 como estación prioritaria de alerta temprana para riesgo microbiológico permitió establecer criterios claros para la activación inmediata de alertas críticas y la articulación con acciones institucionales de control y saneamiento.

Finalmente, el diseño del protocolo de activación y comunicación del SAT consolidó un esquema operativo que articula a la comunidad, la autoridad ambiental y las entidades de gestión del riesgo, promoviendo una respuesta escalonada y oportuna ante eventos críticos. No obstante, se concluye que la efectividad y sostenibilidad del SAT del río Tona dependerán de procesos continuos de validación en campo, fortalecimiento de capacidades comunitarias y respaldo institucional, que permitan ajustar el sistema frente a la variabilidad climática y los cambios en el uso del territorio, garantizando así su consolidación como una herramienta clave para la gobernanza del agua en el ámbito local.

### Referencias

- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. (2021a, octubre 13). *Fuentes de Agua*.  
<https://www.amb.com.co/amb/conoce-amb/nuestros-procesos/procesos-operativos/fuentes-de-agua/>
- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. (2021b, diciembre 6). *Embalse*.  
<https://www.amb.com.co/amb/conoce-amb/nuestros-procesos/procesos-operativos/embalse/>
- Adjovu, G. E., Stephen, H., James, D., y Ahmad, S. (2023). Measurement of Total Dissolved Solids and Total Suspended Solids in Water Systems: A Review of the Issues, Conventional, and Remote Sensing Techniques. *Remote Sensing*, 15(14), 3534.  
<https://doi.org/10.3390/rs15143534>
- Andersen, D. C. (2021). Deposition and Decomposition of Ungulate Dung and Associated Nitrogen Inputs on a Dryland River Floodplain. *The Southwestern Naturalist*, 66(3), 213–224. <https://www.jstor.org/stable/48761619>
- Bain, R., Cronk, R., Wright, J., Yang, H., Slaymaker, T., y Bartram, J. (2014). Fecal Contamination of Drinking-Water in Low- and Middle-Income Countries: A Systematic Review and Meta-Analysis. *PLOS Medicine*, 11(5), e1001644.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001644>
- Buytaert, W., Zulkafli, Z., Grainger, S., Acosta, L., Alemie, T. C., Bastiaensen, J., De Bièvre, B., Bhusal, J., Clark, J., Dewulf, A., Foggin, M., Hannah, D. M., Hergarten, C., Isaeva, A., Karpouzoglou, T., Pandeya, B., Paudel, D., Sharma, K., Steenhuis, T., ... Zhumanova, M. (2014). Citizen science in hydrology and water resources: Opportunities for knowledge

- generation, ecosystem service management, and sustainable development. *Frontiers in Earth Science*, 2. <https://doi.org/10.3389/feart.2014.00026>
- Cáceres Rivera, J. L., Fernández Martínez, C. A., y Torres Palacios, C. (2022). *Efectos que ha generado los cambios de uso del suelo en los ecosistemas naturales en la sub-cuenca hídrica del río Tona en los últimos 10 años*. <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/10498>
- Carrillo Peña, G. A. (2018). *Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido swat*. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/5505>
- CDMB. (2019). *Evaluación regional del agua—ERA*. <https://www.cdm.gov.co/cdm/tematicas/evaluacion-regional-del-agua-era>
- CDMB. (2024a). *Informe de Recursos Naturales 2023* (anual No. 1; p. 402). CDMB. ERA 2023
- CDMB. (2024b). *Plan de Acción Cuatrienal CDMB 2024-2027, “ El agua nos une es tiempo de la seguridad hídrica ”*. <https://www.cdm.gov.co/images/documentos/gestion/rendicion-cuentas/2024/PAC%20aprobado%2030%20de%20abril.pdf>
- Correa-González, J. C., Chávez-Parga, Ma. del C., Cortés, J. A., y Pérez-Munguía, R. M. (2014). Photosynthesis, respiration and reaeration in a stream with complex dissolved oxygen pattern and temperature dependence. *Ecological Modelling*, 273, 220–227. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.11.018>
- Fernández-Vargas, G. (2020). La gobernanza del agua como marco integrador para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Latinoamérica. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, 23(2), Article 2. <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1561>

- Filzmoser, P., y Todorov, V. (2011). Review of robust multivariate statistical methods in high dimension. *Analytica Chimica Acta, A selection of papers presented at the 12th International Conference on Chemometrics in Analytical Chemistry*, 705(1), 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.03.055>
- Gómez, A. E. Y. C., y Rueda, H. M. (2021). Methodological roadmap for the development of communal monitoring of microbasins. Case study: Río Frío. *ITECKNE*, 18(1), 26–38. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v18i1.2544>
- Gómez-Anaya, J. A., Novelo-Gutiérrez, R., y Astudillo-Aldana, M. R. (2017). Efecto de las descargas domésticas y de beneficio de café sobre la calidad del agua y la diversidad de larvas de Odonata (Insecta) en un arroyo de bosque mesófilo de montaña en Veracruz, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 372–380. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.004>
- Gupta, H. V., Perrin, C., Blöschl, G., Montanari, A., Kumar, R., Clark, M., y Andréassian, V. (2014). Large-sample hydrology: A need to balance depth with breadth. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(2), 463–477. <https://doi.org/10.5194/hess-18-463-2014>
- IDEAM. (2024). *Informe del estado del ambiente y los recursos naturales 2023* (p. 349). <https://www.ideam.gov.co/sala-de-prensa/informes/Estado%20del%20ambiente%20y%20los%20recursos%20naturales>
- Ingenieria Civil Ambiental Ltda y Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (Eds.). (2005). *Estudio de Impacto Ambiental Rio Tona Bajo*.
- Iribarne, P., y Lavaggi, M. L. (2021). Aportes para el monitoreo participativo de la calidad del agua del río Tacuarembó en el noreste uruguayo. +E: *Revista de Extensión Universitaria*, (14.Ene-Jun), e0009. <https://doi.org/10.14409/extension.2021.14.Ene-Jun.e0009>

- Iwu, C. D., du Plessis, E., Korsten, L., y Okoh, A. I. (2021). Prevalence of *E. coli* O157:H7 strains in irrigation water and agricultural soil in two district municipalities in South Africa. *International Journal of Environmental Studies*, 78(3), 474–483. <https://doi.org/10.1080/00207233.2020.1834318>
- Kareem, J., y Leventeli, Y. (2024). Evaluation of river water quality using multivariate statistics and water quality indices: A case of Göynük canyon (Turkey). *Kuwait Journal of Science*, 51(3), 100228. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2024.100228>
- Kaushal, S. S., Likens, G. E., Pace, M. L., Utz, R. M., Haq, S., Gorman, J., y Grese, M. (2018). Freshwater salinization syndrome on a continental scale. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(4), E574–E583. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711234115>
- Larrotta Ballesteros, J. F. (2020). *Revisión sistemática de literatura sobre el efecto de la agricultura en la calidad del agua superficial en ecosistemas de alta montaña*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/39913>
- Leija, E. G., Pavón, N. P., Sánchez-González, A., Rodríguez-Laguna, R., y Ángeles-Pérez, G. (2021). Dinámica espacio-temporal de uso, cambio de uso y cobertura de suelo en la región centro de la Sierra Madre Oriental: Implicaciones para una estrategia REDD+ (Reducción de Emisiones por la Deforestación y Degradación). *Revista Cartográfica*, (102), 43–68. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.832>
- Ma, C., Sun, W., Yang, Z., Wang, J., y Zhou, L. (2025). Spatiotemporal variations in land use impacts on river water quality in a mountain-to-plain transitional basin in arid region of northern China. *Journal of Contaminant Hydrology*, 271, 104542. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2025.104542>

- Maes, S., Andersson-Li, M., Sjöstedt, J., Hildahl, J., Yu, D., Neumann, N., Odlare, M., y Jonsson, A. (2025). Unravelling sources of fecal pollution in oligotrophic mountain waters: Integrating *Escherichia coli* enumeration, microbial source tracking, and eDNA analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(8), 849. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14298-7>
- Mendoza, J. M., Rosso-Pinto, M., Tavera-Quiroz, H. C., Coronado-Arango, A., Rios-Kerguelen, J. R., Anaya-Guzmán, A. A., y Arrieta-López, A. (2021). Análisis de la Fragilidad Ambiental Asociada a la Contaminación Del Recurso Hídrico Como Herramienta Para El Fortalecimiento de la Gobernanza Del Agua En La Cuenca Del Río Sinú. *Prospectiva (1692-8261)*, 19(2), 1–17. <https://doi.org/10.15665/rp.v19i2.2606>
- Miranda, I. N. G., y Mesa, G. A. P. (2016). Revisión de los métodos estadísticos multivariados usados en el análisis de calidad de aguas. *Revista Mutis*, 6(1), 54–63. <https://doi.org/10.21789/22561498.1112>
- Nakhle, P., Boithias, L., Pando-Bahuon, A., Thammahacksa, C., Gallion, N., Sounyafong, P., Silvera, N., Latsachack, K., Soulileuth, B., Rochelle-Newall, E. J., Marcangeli, Y., Pierret, A., y Ribolzi, O. (2021). Decay Rate of *Escherichia coli* in a Mountainous Tropical Headwater Wetland. *Water*, 13(15), 2068. <https://doi.org/10.3390/w13152068>
- Ortiz Blanco, M. D. (2021). *Determinación y valoración de los instrumentos de gobernanza del agua en el departamento de Santander*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/41100>
- Pozo Alvear, A. K., y Terán Rosero, G. J. (2025). Cuencas Binacionales Ecuador- Colombia: Mira, Mataje y Carchi-Guáitara. Desafíos de coordinación para fortalecer la gobernanza del agua

- transfronteriza. *ARANDU UTIC*, 12(2), 3935–3947.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10344138>
- Schwertman, N. C., y de Silva, R. (2007). Identifying outliers with sequential fences. *Computational Statistics y Data Analysis*, 51(8), 3800–3810.  
<https://doi.org/10.1016/j.csda.2006.01.019>
- Shangguan, Q., DeGrandpre, M. D., Hall Jr., R. O., y Payn, R. A. (2025). Freshwater carbonate buffering revisited. *Limnology and Oceanography Letters*, 10(5), 619–635.  
<https://doi.org/10.1002/lol2.70047>
- Silva, A. M. L., y Valencia, N. M. (2026). Tres categorías clave para comprender la cartografía digital: Navegación, activismo y poder. *Revista Cartográfica*, (112), 73–94.  
<https://doi.org/10.35424/rcarto.i112.6030>
- Tahraoui, H., Bouallouche, R., Madi, K., Benkouachi, O. R., Boudraa, R., Belkacemi, H., Lekmine, S., Moussa, H., Touzout, N., Ola, M. S., Triki, Z., Zamouche, M., Kebir, M., Nasrallah, N., Assadi, A. A., Benguerba, Y., Zhang, J., y Amrane, A. (2025). Modeling Total Alkalinity in Aquatic Ecosystems by Decision Trees: Anticipation of pH Stability and Identification of Main Contributors. *Water*, 17(20), 2939.  
<https://doi.org/10.3390/w17202939>
- Vera, M., Moraes, M. A. A., y Paris, M. (2025). Gobernanza del agua en la Cuenca del Arroyo Los Padres (Santa Fe, Argentina). Claves para un monitoreo sostenible de los recursos hídricos: Water Governance in the Los Padres Creek Basin (Santa Fe, Argentina). Keys for Sustainable Monitoring of Water Resources. *Revista Estudios Ambientales - Environmental Studies Journal*, 13(2), 7–23. (Cuenca del Arroyo Los Padres, Santa Fe, Argentina). <https://doi.org/10.47069/estudios-ambientales.v13i2.3107>

- Vorobiev, E. V., Usova, E. V., y Orkhova, Y. V. (2021). Analysis of Sources of Anthropogenic Pollution of the Transboundary River, the Serevsky Donets, Based on the Dynamics of the Anion Composition (Nitrites, Nitrates, Sulfates, Chlorides, Phosphates) in 2007-2016. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 720(1), 012059. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012059>
- Xu, H., Wang, Y., Li, X., Zhou, X., Xia, X., Zhang, Y., Guo, M., Li, X., Li, D., y Hu, T. (2025). Spatiotemporal Variations and Driving Factors of Water Hardness in Drinking-Water Sources in Taihu Lake (2011–2023). *Water*, 17(23), 3415. <https://doi.org/10.3390/w17233415>
- Zhao, Y., y Chen, M. (2025). Prediction of river dissolved oxygen (DO) based on multi-source data and various machine learning coupling models. *PLOS ONE*, 20(3), e0319256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0319256>