

PROPUESTA DE MONITOREO CONTINUO DE CALIDAD Y CANTIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL DEL APROVECHAMIENTO PARA CONSUMO HUMANO DE LA ZONA LAS TIPAS

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

1.1. Introducción

El agua es un recurso natural fundamental no solo para la vida en sí misma, sino también para el desarrollo sostenible, crecimiento socioeconómico, la agricultura y la producción de energía. Sin embargo, si bien el agua es sinónimo de vida, también puede ser un vehículo para la propagación de microorganismos patógenos que representan una amenaza significativa para la salud humana. Esta dualidad subraya la necesidad crítica de implementar medidas efectivas de gestión y tratamiento del agua para garantizar su disponibilidad en cantidad y calidad adecuadas.

En la Ciudad de Tarija, el tratamiento del agua se lleva a cabo en la planta potabilizadora ubicada en la zona de Tabladita. El agua es conducida a la planta desde el Rincón de La Vitoria, y en época de estiaje se realiza el bombeo desde la zona de Las Tipas para poder cumplir con la demanda de la población. Esta planta, construida entre los años 1989-1990 con un caudal de diseño de 160 l/s, es del tipo convencional y a la fecha se encuentra en buenas condiciones de funcionamiento, aunque en determinados periodos trabaja para un caudal de 342 L/s, superando en más del doble la capacidad prevista en su diseño original.

Los desafíos se agravan durante la época de estiaje, cuando es necesario bombear agua desde la zona de Las Tipas para satisfacer la demanda. Según testimonios de los

operadores de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) de Tabladita, el agua que se extrae de Las Tipas a menudo llega con un nivel elevado de turbiedad, lo que dificulta el tratamiento eficiente del recurso. Este problema se ha traducido en dificultades para poner en funcionamiento la nueva planta de tratamiento concluida en el año 2022, que hasta la fecha no se puede lograr su puesta en funcionamiento por la mala calidad del agua.

El propósito de este proyecto es presentar una propuesta de monitoreo continuo de la calidad y cantidad disponible del agua para consumo humano en la obra de toma ubicada en la zona de Las Tipas, donde se presenta una alternativa para automatizar el monitoreo del agua a través de la implementación de sensores adecuados que permitan tener una información rápida y de calidad sin la necesidad de recurrir a un laboratorio o la movilización de personal para este trabajo, la implementación de sensores automáticos permitirán obtener información en tiempo real de los parámetros que son exigidos por la Norma Boliviana NB 512 como ser el pH, conductividad, turbiedad, temperatura, sólidos disueltos y oxígeno disuelto, los cuales también deben cumplirán con lo estipulado en al NB 496 para la toma de muestras en la fuente de agua.

Para enfrentar estos desafíos, surge la necesidad de adoptar nuevas tecnologías que permitan anticiparse a las variaciones en la calidad del agua y ajustar los procesos de tratamiento en consecuencia. Este proyecto propone la implementación de un sistema de monitoreo continuo que permita monitorear en tiempo real tanto la calidad como la cantidad de agua disponible para consumo humano en la obra de toma ubicada en Las Tipas I. La propuesta incluye la automatización del monitoreo mediante la instalación de sensores que proporcionen datos en tiempo real, cumpliendo con los requisitos establecidos por la Norma Boliviana NB 496. Estos sensores medirán parámetros clave como el pH, la conductividad,

la turbiedad, la temperatura, los sólidos disueltos y el oxígeno disuelto, ofreciendo una base sólida para la toma de decisiones informada y oportuna.

1.2. Antecedentes

El agua es un recurso natural esencial para el ser humano y para el desarrollo sostenible de las comunidades. Tanto las fuentes de aguas subterráneas y superficiales son fundamentales para una amplia gama de actividades, desde el uso doméstico hasta la agricultura y la industria. El acceso a agua limpia y segura es fundamental para prevenir enfermedades y promover un estilo de vida saludable. Por lo tanto, el monitoreo regular del agua potable es indispensable para detectar posibles contaminantes y garantizar que cumpla con los estándares de calidad establecidos, asegurando así su seguridad para el consumo humano.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2013) subraya que el monitoreo de la calidad del agua proporciona una comprensión de: (a) las condiciones de la calidad del agua en arroyos, ríos, aguas subterráneas y sistemas acuáticos nacionales; (b) como varían esas condiciones a nivel local, regional y nacional; (c) si las condiciones están cambiando con el tiempo; (d) como las características naturales y las actividades humanas afectan esas condiciones; y (e) donde esos efectos son más pronunciados.

Donde plantea como puntos base para describir la importancia del monitoreo de la calidad del agua proporcionando una guía detallada sobre cómo diseñar y establecer sistemas efectivos de monitoreo de la calidad del agua. Describe métodos para evaluar las condiciones del agua, identificar fuentes de contaminación y establecer estrategias de monitoreo basadas en datos confiables. La publicación también destaca la importancia de la colaboración entre

distintas entidades y la aplicación de tecnologías avanzadas para mejorar la gestión y protección de los recursos hídricos.

De este modo la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018) afirma que la vigilancia del agua contribuye a proteger la salud pública mediante la promoción de la mejora de la calidad, cantidad, accesibilidad, cobertura (poblaciones con Acceso confiable) asequibilidad y continuidad del abastecimiento de agua de consumo humano (denominados “indicadores de servicio”).

Para esto se trata directrices actualizadas y detalladas con el fin de garantizar la seguridad del agua potable en todo el mundo. Estas guías abordan una amplia gama de contaminantes y establecen valores límite para asegurar la protección de la salud pública. Además, proporcionan recomendaciones sobre monitoreo, tratamiento y gestión de sistemas de abastecimiento de agua para garantizar su calidad y seguridad.

Por consiguiente, se menciona que el estado actual de los recursos hídricos pone en relieve la necesidad de mejorar su gestión. Reconocer, medir y expresar el valor del agua, e incorporarlo a la toma de decisiones es fundamental para lograr una gestión sostenible y equitativa de los recursos hídricos y para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda para el Desarrollo Sostenible de 2030 de las Naciones Unidas, (UNESCO, 2021).

Se aborda el tema del monitoreo del agua como parte integral de la gestión sostenible de este recurso vital destacando la importancia de tener sistemas de monitoreo eficaces para comprender y gestionar adecuadamente la calidad y la disponibilidad del agua. El informe resalta la necesidad de recopilar datos precisos y oportunos sobre la calidad del

agua en diferentes contextos, así como de desarrollar capacidades para interpretar y utilizar estos datos en la toma de decisiones.

Como menciona Conde y Freire (2019), el desperdicio de material coagulante surge al desconocer los parámetros básicos de calidad del agua como: turbiedad, caudal, pH, entre otros que deben ser medidos y monitoreados constantemente al ingreso de la planta de tratamiento, considerando que la cantidad de dosificación de coagulante es directamente proporcional a la cantidad de agua que ingresa a la planta de tratamiento, el control y monitorización es realizado por la pericia del operador una o dos veces al día, sumándose a estos factores climatológicos cambiantes que tiende a variar tanto en cantidad y calidad del agua al ingreso de la planta de tratamiento.

Además, enfatiza que el análisis de los procesos de tratamiento del agua en la planta, la identificación de variables críticas, el diseño de un sistema basado en tecnología de sensores y la implementación en condiciones reales. Concluyendo que la implementación de este sistema mejoró la eficiencia y confiabilidad del proceso, resultando en una mejor calidad del agua y mayor seguridad para el consumo humano. Además, facilitó la detección temprana de problemas y la toma de decisiones informadas por parte de los operadores del sistema de agua potable.

Por su parte Carriazo (2021) relaciona los resultados entre el método convencional para medición de la calidad del agua para consumo humano en zonas de difícil acceso y el dispositivo basado en la tecnología del internet de las cosas (IoT), que muestran fiabilidad de las medidas realizadas ya que presentan un error relativo promedio inferior al 5%.

Con esto podemos hacer referencia que este enfoque innovador no solo mejora la eficiencia del monitoreo, sino que también contribuye a la detección temprana de problemas

en la calidad del agua, lo que puede tener un impacto significativo en la salud pública y el medio ambiente. La combinación de IoT y analítica de datos ofrece una solución integral para la gestión proactiva del agua, permitiendo una respuesta rápida y eficaz ante posibles eventos adversos.

Dado que “Las plantas de tratamiento de agua potable requieren constante monitorización y control de los procesos para mejorar la eficiencia del tratamiento del agua, por lo cual la capa de dispositivos cuenta con sensores de las principales variables (temperatura, humedad, conductividad, pH, caudal), que intervienen en el afluente que alimenta a la planta de tratamiento. La capacidad de integración entre microcontroladores es importante, ya que deben mantener una comunicación constante para el control entre las etapas del proceso de tratamiento de agua; buscando evitar errores humanos al agregar productos químicos, abrir y cerrar válvulas, etc.”, (Contreras y Rojano, 2023).

Donde es esencial desarrollar un sistema innovador para monitorear y controlar el proceso de tratamiento de agua potable en una la planta. Utilizando tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) e Inteligencia Artificial (IA), el estudio busca mejorar la eficiencia y la calidad del agua producida. El sistema propuesto permite la recolección de datos en tiempo real y la toma de decisiones automatizadas para optimizar el proceso de tratamiento, lo que garantiza una mayor precisión en la dosificación, detección de problemas y fallos en los equipos en tiempo real.

En este sentido el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA, 2017) espera que su aplicación permita disponer de información precisa oportuna para la toma de decisiones e implementación de acciones de protección de la calidad de los ríos, arroyos, lagos, lagunas, acuíferos y otros cuerpos de agua que pudiesen estar viéndose afectados por

diferentes factores tanto ambientales como origen antrópico. para la realización del monitoreo se necesita definir el sistema de monitoreo, propio y característico de cada cuerpo de agua, y elaborar un plan de monitoreo para su aplicación.

Para lograr este objetivo la guía aborda aspectos clave como la selección de parámetros de monitoreo, la ubicación estratégica de las estaciones de monitoreo, los métodos de muestreo y análisis, así como la gestión de datos y la interpretación de resultados, donde también menciona pautas sobre la frecuencia y la duración del monitoreo.

1.3. Planteamiento del problema

Actualmente, la Cooperativa de Servicios de Agua y Alcantarillado “COSAALT R.L.” no cuenta con un sistema de monitoreo continuo de calidad y cantidad del agua en su fuente de abastecimiento. Este es un problema crítico, especialmente considerando que el Municipio de San Lorenzo vierte sus aguas residuales poco tratadas al río Guadalquivir, esta situación continua con los asentamientos aledaños a lo largo de la trayectoria del río hasta llegar a la zona de Las Tipas.

Un aspecto particularmente preocupante es la alta turbidez del agua bombeada desde la obra de toma de Las Tipas, que en ocasiones supera los 2000 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez). Este nivel elevado de turbidez complica significativamente el proceso de tratamiento, especialmente en la dosificación de sulfato de aluminio, que se realiza de manera empírica. La dosificación incorrecta no solo reduce la eficiencia del tratamiento, sino que también resulta en el desperdicio del coagulante, incrementando costos operativos sin mejorar la calidad del agua.

Además, la PTAP de tabladita ha sido construida durante los años 1989-1990 con un caudal de diseño de 160 l/s, actualmente opera a una capacidad de 342 L/s, mismo que

supera en más del doble la capacidad inicialmente prevista en su diseño original. Este funcionamiento al límite de su capacidad la hace vulnerable a cualquier variación brusca en la calidad del agua, lo que podría provocar alteraciones en el tren de tratamiento y, en el peor de los casos, la interrupción en la producción de agua potable.

La falta de un sistema de monitoreo en tiempo real impide la optimización de los tratamientos unitarios necesarios para garantizar la calidad del agua, lo que subraya la urgencia de implementar tecnologías que permitan un monitoreo continuo de los parámetros clave. Esta implementación no solo mejoraría la eficiencia operativa de la PTAP, sino que también permitiría una gestión más proactiva y sostenible del recurso hídrico.

1.4. Formulación del problema

¿De qué manera la aplicación de un sistema de monitoreo continuo en tiempo real del agua permite realizar el control de la variabilidad de los parámetros de calidad y cantidad para mejorar la eficiencia y evitar que el tren de tratamiento sufra alteraciones?

1.5. Justificación del problema

La falta de un sistema de monitoreo continuo de la calidad y cantidad del agua en la fuente de abastecimiento de la PTAP Tabladita representa un desafío significativo para garantizar la eficiencia del tratamiento y la calidad del agua suministrada a la población. Actualmente, el proceso de potabilización enfrenta dificultades debido a la alta turbidez del agua que se bombea desde Las Tipas, lo que requiere ajustes constantes en la dosificación del sulfato de aluminio, una operación que se realiza de manera empírica y sin datos precisos en tiempo real.

Este escenario conduce a varios problemas críticos. Primero, la dosificación incorrecta del coagulante no solo aumenta los costos operativos por el desperdicio de material, sino que también compromete la calidad del agua tratada. Segundo, la capacidad operativa de la PTAP Tabladita está siendo forzada más allá de sus límites de diseño, lo que la hace vulnerable a cualquier cambio en la calidad del agua entrante, pudiendo causar interrupciones en la producción de agua potable.

En respuesta a esta situación, la implementación de sensores que permitan el monitoreo continuo de parámetros clave como el pH, la conductividad, turbidez, temperatura, sólidos disueltos y el oxígeno disuelto, resulta crucial. Estos datos permitirán detectar variaciones en la calidad del agua y ajustar los procesos de tratamiento en tiempo real, optimizando la eficiencia del sistema y garantizando que el agua cumpla con los estándares de calidad establecidos por la Norma Boliviana NB 512 y NB 496.

Por otra parte, “La implementación de prototipos proporciona grandes ventajas para el sector ambiental ya que ahorra tiempo y recursos, ya que se puede monitorear estos parámetros sin la necesidad de trasladarse al lugar de estudio”, (Silva y Coello, 2020).

Además, este sistema de monitoreo contribuirá a la puesta en marcha efectiva de la nueva planta de tratamiento de Tabladita, asegurando que opere bajo condiciones óptimas desde su inicio. La disponibilidad de datos precisos y fiables facilitará la toma de decisiones informadas, no solo en la operación diaria sino también en la planificación a largo plazo del mantenimiento de la infraestructura de captación de agua.

En resumen, la implementación de un sistema de monitoreo continuo no solo es necesaria para mejorar la eficiencia operativa de la PTAP Tabladita, sino también para asegurar la sostenibilidad del suministro de agua potable a la ciudad de Tarija. Este proyecto

representa un paso importante hacia la modernización de la gestión de recursos hídricos en la región, promoviendo un enfoque más proactivo y tecnificado en la protección y aprovechamiento del agua.

1.6. Límites

El presente trabajo de investigación se enfocará exclusivamente en el diseño e implementación de sensores de monitoreo en tiempo real de la calidad del agua para el consumo humano dentro del área de captación la zona de Las Tipas I.

El diseño de la propuesta se basará en el análisis de las características y modelos más adecuados de equipos para el monitoreo de calidad y cantidad del agua que estén disponibles en el mercado nacional. Esto implica que la selección de los sensores y demás instrumentos dependerá de la tecnología accesible en el país al momento de su implementación.

Además, el desarrollo de este proyecto se apoyará en la información histórica y actual disponible a través de las instituciones responsables del manejo de agua en la región. Cualquier limitación en la disponibilidad o precisión de estos datos pueden influir en la fiabilidad de las conclusiones obtenidas a partir del monitoreo continuo.

Figura 1

Obra de toma Las Tipas I.



Nota. Zona de la obra de tomas de Las Tipas I. Elaboración propia.

1.7. Alcances

Desarrollar campañas de análisis de calidad in situ y la toma de muestras del agua para el análisis en el laboratorio de Hidrosanitaria y Reusó del Agua del Centro de Investigación del Agua (CIAGUA) de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, desde el mes de enero hasta mes de julio del año 2024. Además de la realización de 9 aforos de la cantidad del agua superficial conjuntamente al análisis de calidad del agua de la zona Las Tipas usando los equipos molinete electromagnético OTT MF pro, el Perfilador Acústico Doppler de Corrientes ADCP Riverboat SP y medidor multiparamétrico HANNA HI 9829

que permitan verificar el estado actual en el que se encuentra el afluente utilizando los protocolos y metodologías adecuadas que recomiendan las normativas nacionales e internacionales.

Realizar la recopilación de información que permita identificar a que subprocesos de tratamiento se le puede mejorar la eficiencia operativa de la PTAP de Tabladita mediante implementación de sensores de monitoreo automáticos en la obra de toma de Las Tipas. El área donde se centrará principalmente la propuesta será en la obra de toma de Las Tipas, utilizando toda la información necesaria para la automatización del monitoreo y esto venga a simplificar la operación de la planta.

Además, diseñar el sistema de monitoreo continuo incluyendo la ubicación de los sensores, realizar un presupuesto de los equipos necesarios junto con las especificaciones técnicas de referencia para su adquisición.

1.8. Objetivos

1.8.1. *Objetivo general*

Elaborar una propuesta para la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real de la calidad y cantidad del agua de la obra de toma de Las Tipas, con la finalidad de que los operadores de la planta puedan anticiparse a las variaciones para garantizar la calidad del agua a los usuarios.

1.8.2. *Objetivos específicos*

- Elaborar un diagnóstico y evaluación del monitoreo de calidad y cantidad del agua de las fuentes en aprovechamiento de la zona Las Tipas para el consumo humano por parte de COSAALT R.L.

- Desarrollar nueve campañas de aforo y análisis de la calidad de agua de consumo humano según NB 512 del río Guadalquivir en la zona de Las Tipas para identificar los parámetros clave que deben medirse y su rango de variabilidad, así como la clasificación de la situación actual de la fuente.
- Analizar el equipamiento necesario y los sensores disponibles para la medición automática de parámetros de calidad y cantidad de agua que cumplan con requerimientos técnico-económicos y características de precisión, durabilidad, mantenimiento y calibración.
- Elaborar un presupuesto detallado y especificaciones técnicas para la adquisición e instalación de sensores de monitoreo de calidad y cantidad de agua en la zona de las Tipas.

1.9. Metodología

La presente investigación asume un enfoque cuantitativo, ya que, busca llegar al conocimiento “desde afuera”, y por medio de la medición y el cálculo. En el caso particular de la investigación del monitoreo de la cantidad y calidad de agua para el aprovechamiento en la zona de Las Tipas, se utiliza la recopilación de la información mediante el uso de estrategias estadísticas basadas en la medición numérica, esto permite predecir patrones de comportamiento de las variables y probar los diferentes fundamentos teóricos expuestos en la bibliografía actual.

Dentro de este enfoque se utilizó el diseño de la investigación no experimental del tipo descriptivo, cuyo objetivo central fue caracterizar, exponer, describir, presentar e identificar aspectos particulares de la problemática que presenta la falta de información

medida en tiempo real y su influencia en la eficiencia del tratamiento de la PTAP de Tabladita.

A pesar, de que el aprovechamiento de agua para consumo humano es una prioridad como servicio básico y más aun considerando que la ciudad de Tarija es capital departamental, se evidencia deficiencias en la implementación de tecnología para el control de la calidad y cantidad de agua, es por esto que se planteó para el presente trabajo desarrollar una investigación aplicada, ya que busca resolver un problema en un contexto determinado, es decir busca la aplicación o utilización de conocimientos, con el propósito de implementarlos de forma práctica para satisfacer una necesidad concreta, proporcionando una solución a problemas del sector social o productivo.

Los materiales y el equipamiento que se utilizó para la ejecución de la presente investigación fueron dispuesto por el Centro de Investigación del Agua de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. A continuación, se hace una breve descripción de las características de los equipos utilizados:

Tabla 1

Equipos utilizados para el monitoreo de calidad y cantidad de agua.

Nombre	Precisión	Resolución	Temperatura de funcionamiento
Molinete electromagnético OTT MF pro	±2% de lectura ±0.015 m/s (±0.05 pies/s) a 3.04 m/s (0 a 10 pies/s); ± 4% de	0 ≤ valor < 10: 3 decimales; 10 ≤ valor < 100: 2 decimales; valor < 1000:	−20 a 55 °C (−4 a 131 °F)

		lectura entre 3.04 y 1 decimal; valor ≥ 1000 : 0 4.87 m/s (10 a 16 decimales pies/s)	
Perfilador Acústico Doppler de Corrientes ADCP Riverboat SP	$\pm 1\%$ de la velocidad del agua en relación con el ADCP	1mm/s	-5° a 45C (La temperatura interna del PCP de StreamPro debe estar 50°C)
Medidor Multiparamétrico HI 9829 (Temperatura)	$\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\pm 0.27\text{ }^{\circ}\text{F}$; $\pm 0.15\text{ K}$	0.01 $^{\circ}\text{C}$; 0.01 $^{\circ}\text{F}$	-5 a 55 $^{\circ}\text{C}$ (de 23 a 131 $^{\circ}\text{F}$)
Medidor Multiparamétrico HI 9829 (pH)	$\pm 0.02\text{ pH}$; $\pm 0.5\text{ mV}$	0.01 pH; 0.1 mV	-5 a 55 $^{\circ}\text{C}$ (de 23 a 131 $^{\circ}\text{F}$)
Medidor Multiparamétrico HI 9829 (Conductividad)	$\pm 1\%$ de la lectura o $\pm 1\text{ }\mu\text{S/cm}$ (el que sea mayor)	Manual 1 $\mu\text{S/cm}$; 0,001 mS/cm; 0.01 Automática 1 $\mu\text{S/cm}$ de 0 a 9999 $\mu\text{S/cm}$	-5 a 55 $^{\circ}\text{C}$ (de 23 a 131 $^{\circ}\text{F}$)
Medidor Multiparamétrico HI 9829 (Turbiedad)	$\pm 0.3\text{ FNU}$ o $\pm 2\%$ de la lectura (la que sea mayor)	0.1 FNU de 0.0 a 99.9 FNU 1 FNU de 100 a 1000 FNU	-5 a 55 $^{\circ}\text{C}$ (de 23 a 131 $^{\circ}\text{F}$)
Medidor Multiparamétrico HI 9829 (Sólidos totales disueltos)	$\pm 1\%$ de la lectura o $\pm 1\text{ ppm (mg/L)}$ (el que sea mayor)	1 ppm (mg/L) 0.001 ppt (g/L)	-5 a 55 $^{\circ}\text{C}$ (de 23 a 131 $^{\circ}\text{F}$)

		de 0.0 a 300.0 %: $\pm$		
Medidor		1.5 % de la lectura o		
Multiparamétrico		± 1.0 % (el que sea	0.1 %	-5 a 55 °C (de 23
HI	9829	más alto); de 300.0 a		a 131 °F)
(Oxígeno		500.0 %: ± 3 % de la	0.01 ppm (mg/L)	
disuelto)		lectura de 0.00 a		
		30.00 ppm (mg/L)		

Nota: Elaboración propia en base a los manuales de cada equipo.

1.10. Instrumentos

Los equipos que se utilizarán para las campañas de aforo del caudal y análisis de calidad in situ son los siguiente:

1.10.1. Molinete electromagnético OTT MF pro

El equipo que se utilizará para la medición de caudales será mediante aforos directos con el molinete electromagnético OTT MF pro de última generación.

Con este equipo se pueden medir flujos turbulentos, ruidos y bajos. Cuando el sensor se coloca en agua que corre, un campo magnético alrededor del sensor crea un voltaje proporcional a la velocidad de flujo. Esta amplitud de voltaje, que representa el índice de flujo de agua alrededor del sensor, es captada por electrodos en el sensor y procesada por el microprocesador del sensor. La señal procesada se transmite digitalmente por medio del cable del sensor al medidor portátil y la información que se muestra en la pantalla del medidor. El sistema incluye un medidor portátil, un sensor con cable y accesorios.

Figura 2

Molinete OTT MF pro.



Nota: Tomada de <https://www.reactivosyequipos.com.mx/medidor-de-velocidad-portatil-fh950-con-cable-de-20-pies/product?id=62337765566>

El medidor y el sensor obtienen información de velocidad de los conductos y flujos. Estas mediciones son importantes para la calibración en las industrias de las aguas residuales municipales, como así también para desarrolla y mantiene las curvas de relación de etapa de descarga.

1.10.2. Perfilador Acústico Doppler de Corrientes ADCP River Boart SP

El River Boat ADCP permite registrar con gran exactitud, eficiencia y confiabilidad la profundidad, la magnitud y dirección de las velocidades de flujo en la columna de agua. Su funcionamiento consiste en ondas acústicas verticales que se envían desde el transductor, viajan hacia el fondo del lecho, se reflejan y vuelven al equipo.

Figura 3

ADCP River Boart SP.



Nota. Adaptada de gráfico de ADCP River Boart SP, de *SEBA HYDROMETRIE*
<https://www.directindustry.es/prod/seba-hydrometrie-gmbh-co-kg/product-63216-2348244.html>

La profundidad del canal es calculada por medio del equipo dependiendo del tiempo que se demoró dicha onda mecánica en ir hasta el fondo y volver al transductor. Para calcular el caudal, el equipo automáticamente genera superficies de control a lo largo de toda la vertical y calcula las velocidades de las partículas en esas superficies de control con áreas conocidas.

Cada una de estas superficies se convierte en un diferencial de caudal, los cuales son integrados al final para obtener así el caudal total. Las velocidades en las superficies de control son calculadas a partir del reflejo de una pequeña porción de la onda mecánica en las partículas disueltas en el agua, a partir del cambio en la frecuencia de la onda recibida y por medio de la teoría del efecto Doppler, el equipo calcula la velocidad de dicha partícula, promedia las velocidades de todas las partículas encontradas y obtiene así la velocidad final de la superficie de control.

1.10.3. Medidor multiparamétrico HI 9829

El HI 9829 es un medidor multiparámetro de registro, portátil y a prueba de agua que controla hasta 14 parámetros diferentes de calidad del agua. La sonda multisensor basada en microprocesador permite la medición de parámetros clave que incluyen pH, potencial redox , conductividad, oxígeno disuelto, turbidez, amonio, cloruro, nitrato y temperatura. La sonda transmite digitalmente las lecturas con opciones para registrar datos mientras está desconectada del medidor. Un GPS opcional proporciona seguimiento de la ubicación de las mediciones. El sistema completo es fácil de instalar y fácil de usar. El HI9829 es altamente personalizable y se suministra con todos los accesorios necesarios, empaquetados en un estuche duradero.

Figura 4

Medidor multiparamétrico HI 9829.



Nota. Imagen tomada de https://www.hannacolombia.com/productos/producto/hi-9829-medidor-multiparametro-impermeable-para-ph-ise-ce-od-turbidez-con-opcion-de-gps?srsId=AfmBOojsfRn8bFhRDxpWABDTVfp9NWra4SBrqRby6G-1v43-dT6G_54

HI 9829 ha sido diseñado para los entornos más duros y es ideal para realizar mediciones de campo en lagos, ríos y mares. El medidor cumple con las normas IP67 (30 minutos de inmersión a una profundidad de 1 metro) mientras que la sonda multisensor cumple con las normas IP68 (inmersión permanente en agua).

1.11. Diseño de la propuesta

El diseño de la investigación es determinante respecto a las relaciones entre el alcance del estudio que se plantea y los métodos y técnicas que se utilizarán para la recolección y análisis de datos.

Se busca por medio de la medición de variables, en este caso la calidad y cantidad de agua aprovechada de la zona de Las Tipas, caracterizar el fenómeno y los impactos en la eficiencia de tratamiento de la PTAP, por lo cual se realizará una recolección de datos durante un periodo de lluvias y un periodo de estiaje. Los instrumentos o técnicas de investigación utilizados son considerando un diseño pre experimental (cuando el investigador no tiene control sobre las variables) son los siguientes:

- Recopilación de datos existentes
- Análisis documental
- Medición directa

El proceso de planificación o método aplicado fue de carácter teórico-metodológico, es decir, los procedimientos destinados a la recolección, procesamiento y análisis de datos se basaron en el método inductivo, ya que se basa en la observación de hechos y fenómenos siendo la dirección del razonamiento de lo particular a lo general, es decir, partiremos de casos particulares, que en nuestro caso será el aprovechamiento para agua potable de la zona

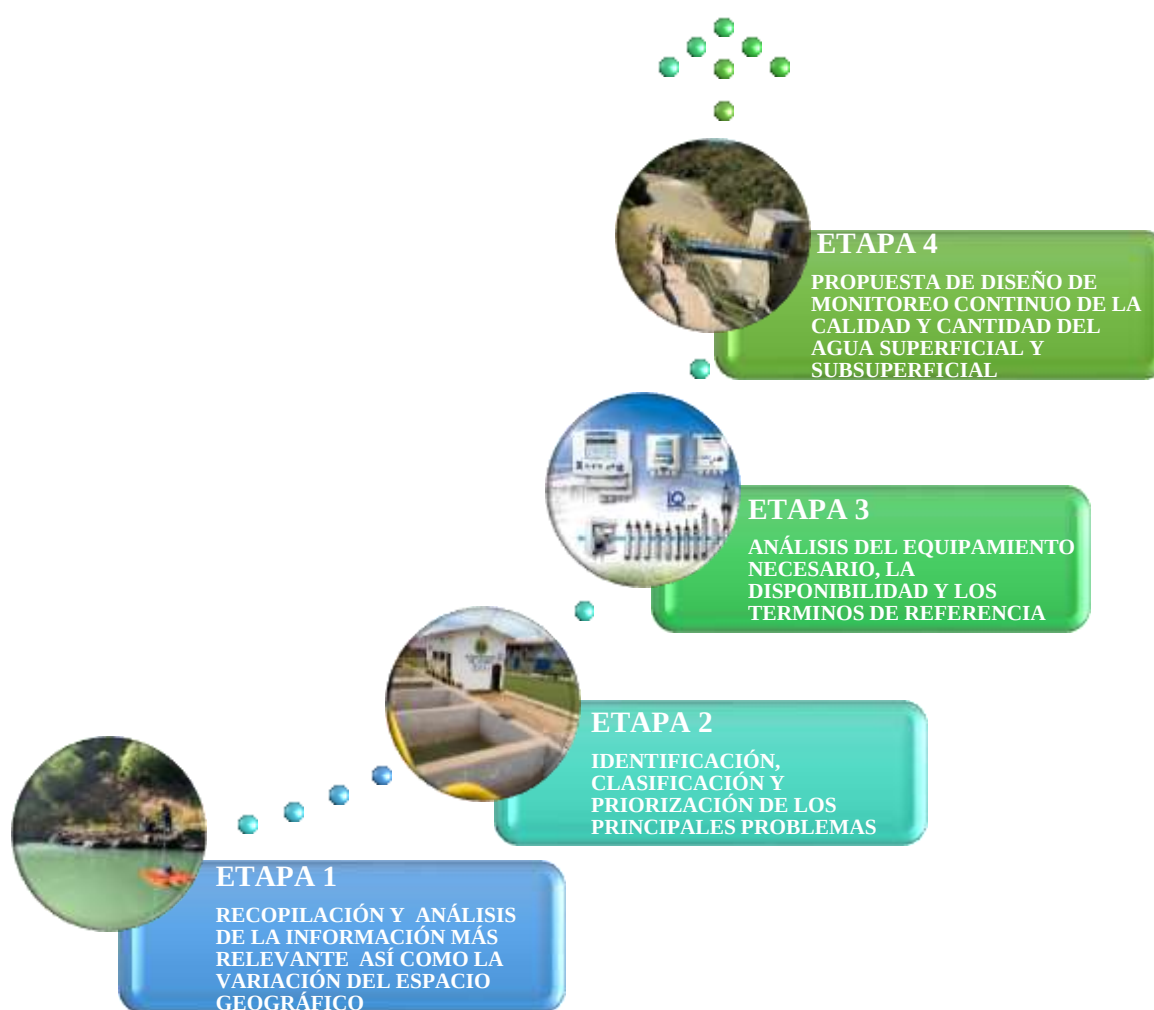
de Las Tipas que permitirá llegar a una proposición general con base al comportamiento de las variables que se midieron.

1.12. Etapas de la investigación

Para el desarrollo del presente trabajo se dividió el estudio en 4 etapas:

Figura 5

Etapas del proyecto de investigación.



Nota. Elaboración propia

ETAPA 1: Recopilación y análisis de la información más relevante para determinar la calidad y cantidad del agua en la zona de Las Tipas, así como su variación en el espacio geográfico.

- a. Recopilación y análisis de la información relevante. Selección de los parámetros de calidad y cantidad del agua.
- b. Reconocimiento del terreno, análisis rápido y la evaluación de los procesos y problemas pertinentes, así como la ponderación de las limitaciones.
- c. Actualización de la información de calidad y cantidad del agua.
Planificación de actividades de monitoreo en la obra de toma.
- d. Análisis y ajuste de anteriores de la clasificación de la fuente de agua.
- e. Determinación de la variación de la calidad y cantidad del agua disponible para su aprovechamiento a lo largo del tiempo.

ETAPA 2: Identificación, clasificación y priorización de los principales problemas derivados por la falta de información en tiempo real de la calidad y cantidad del agua en la obra de toma para la PTAP de tabladita.

Fase 1: COMPRENSIÓN DEL SISTEMA Y EL ANÁLISIS DEL PROBLEMA

- a. Recopilación de información de los métodos de monitoreo usados para la recolección de datos, los registros de mantenimientos y la recolección de datos de históricos de la obra de toma.
- b. Identificación de las deficiencias, frecuencias y limitaciones o deficiencias con el actual método de monitoreo de la calidad y cantidad del agua.
- c. Clasificación de los problemas identificados en función de su naturaleza y gravedad.

Fase 2: EVALUACIÓN DETALLADA DEL PROCESO

- a. Evaluación del impacto potencial de los problemas que representan riesgos más graves para la salud pública, seguridad del suministro de agua y el funcionamiento general del sistema.
- b. Priorización de problemas identificados en función de su impacto potencial y urgencia para su atención.
- c. Evaluación de los resultados de monitoreo y los datos históricos obtenidos.

ETAPA 3. Análisis del equipamiento necesario para la obra de toma y la disponibilidad de los sensores, así como los términos de referencia.

- a. Revisión de requerimientos, requisitos específicos e identificación de los parámetros se van a medir en el monitoreo continuo de la calidad y cantidad del agua de la obra de toma.
- b. Identificación de los equipos basándose en los requisitos definidos para llevar a cabo el monitoreo en tiempo real de la calidad y cantidad del agua.
- c. Investigación y evaluación de diferentes tecnologías y fabricantes de equipos disponibles en el mercado que satisfagan los requisitos de la propuesta.
- d. Elaboración de los términos de referencia con la base de los requisitos de la propuesta y la selección de equipos incluyendo las especificaciones técnicas y criterios de selección.

ETAPA 4: Propuesta de monitoreo continuo de calidad y cantidad del agua superficial y subsuperficial del aprovechamiento para consumo humano de la zona Las Tipas.

- a. Desarrollar un plan detallado de implementación del sistema de monitoreo continuo.
- b. Definir los procedimientos operativos estándar para la operación y mantenimiento del sistema de monitoreo continuo.
- c. Identificar y evaluar los riesgos potenciales asociados con la implementación y operación del sistema de monitoreo continuo.
- d. Establecer un plan para la generación de informes periódicos sobre resultados del monitoreo continuo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Importancia del monitoreo en tiempo real de los parámetros en la fuente de agua para consumo humano

El monitoreo en tiempo real del agua destinada para consumo humano ha adquirido una relevancia crucial en el ámbito de la salud pública y la gestión ambiental. La calidad del agua es un factor determinante para la seguridad y el bienestar de las poblaciones, y cualquier alteración en sus características fisicoquímicas o microbiológicas puede tener consecuencias graves para la salud. Tradicionalmente, la vigilancia de la calidad del agua se ha llevado a cabo mediante análisis periódicos que, aunque efectivos, no siempre permiten una detección oportuna de contaminantes o cambios inesperados en la composición del agua.

En este contexto, la modernización de las técnicas de monitoreo surge como una herramienta esencial para asegurar que el agua que llega a los hogares sea segura y apta para el consumo. Este tipo de monitoreo permite la vigilancia continua de parámetros críticos, como la turbidez, el pH, la presencia de patógenos y contaminantes químicos, entre otros. La capacidad de detectar y responder de manera inmediata a cualquier desviación de los estándares de calidad establecidos no solo previene riesgos para la salud, sino que también optimiza la gestión de los sistemas de abastecimiento de agua, permitiendo intervenciones rápidas y efectivas.

Por su parte Ibrahim et al. (2018) expone que la implementación de un monitoreo automatizado de la calidad del agua en tiempo real es crucial para asegurar que el agua destinada al consumo humano mantenga estándares de calidad adecuados. Este tipo de monitoreo permite detectar rápidamente la presencia de contaminantes y cambios en parámetros clave, como la turbidez, que pueden indicar contaminación en el sistema de

distribución. Al implementar tecnologías como sensores de turbidez y sistemas basados en IoT, se puede lograr una vigilancia continua y oportuna del agua, lo que a su vez no solo permite el monitoreo en tiempo real, sino que también incluye un sistema de alertas que notifica a los operadores cuando los niveles de turbidez superan los umbrales preestablecidos. Esto facilita una intervención rápida y la toma de decisiones informadas.

Dentro de este contexto, la tecnología adquiere un papel crucial en un mundo donde los desafíos ambientales, como el cambio climático y la contaminación, aumentan la vulnerabilidad de las fuentes de agua. En este sentido, el monitoreo en tiempo real se posiciona como una herramienta fundamental para garantizar el suministro de agua segura, minimizando los riesgos de brotes de enfermedades transmitidas por el agua y mejorando la calidad de vida de las personas.

2.1.1. *Garantizar la calidad del agua*

La calidad del agua destinada al consumo humano es un componente fundamental para la salud pública y el bienestar de las comunidades. El acceso a agua potable segura no solo es un derecho humano esencial, sino también un pilar crítico en la prevención de enfermedades y en la promoción de una vida saludable. En un mundo cada vez más afectado por el crecimiento demográfico, la urbanización, la contaminación y el cambio climático, garantizar la calidad del agua se ha convertido en un desafío complejo que requiere un enfoque integral y multidisciplinario.

En su artículo Bartram y Cairncross (2010) argumentan que el acceso a agua potable segura y la implementación de medidas de saneamiento adecuados son fundamentales para prevenir enfermedades transmisibles por el agua y reducir significativamente la carga global de morbilidad, especialmente en países en desarrollo. Las intervenciones en agua y

saneamiento no solo contribuyen a la salud pública, sino que también resultan en beneficios económicos significativos al reducir los costos de atención médica y mejorar la calidad de vida.

Igualmente, el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA, 2018) establece en el compendio normativo de la NB 512 que garantizar la calidad del agua para consumo humano requiere un control estricto y continuo de sus características físicas, químicas, microbiológicas, organolépticas y radiológicas. La normativa señala que es fundamental caracterizar el agua a través de valores máximos aceptables de estos parámetros para proteger la salud pública. Además, el reglamento destaca la importancia de proteger las fuentes de agua desde la captación hasta su distribución, asegurando que el agua entregada a los usuarios cumpla con los estándares establecidos.

Es por ello que garantizar la calidad del agua para el consumo humano es una tarea esencial y continua que requiere la colaboración de múltiples sectores y actores. La protección de la salud pública y el bienestar de las comunidades dependen en gran medida de la disponibilidad de agua potable segura. A medida que enfrentamos desafíos crecientes relacionados con la contaminación, el cambio climático y el crecimiento poblacional, es imperativo que las estrategias para la gestión del agua sean cada vez más rigurosas y adaptativas.

2.1.2. *Gestión sostenible del recurso hídrico*

La gestión sostenible del recurso hídrico es un desafío crítico en el contexto global actual. A medida que las poblaciones crecen y las demandas de agua aumentan, garantizar un suministro de agua potable seguro y suficiente se ha vuelto una prioridad para los gobiernos, las organizaciones internacionales y las comunidades locales. La escasez de agua,

la contaminación de las fuentes y el cambio climático son algunos de los factores que amenazan la disponibilidad y calidad del agua destinada al consumo humano. Por lo tanto, es esencial adoptar enfoques integrales que promuevan la sostenibilidad en la gestión del agua, asegurando su disponibilidad para las generaciones presentes y futuras.

Según el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua - IMTA y Rojas Rueda (2022) el manejo sostenible del agua es un elemento clave dentro del objetivo de desarrollo sostenible (ODS) número 6, que está enfocado en garantizar el acceso universal a agua limpia y saneamiento. Este objetivo destaca la necesidad de proteger los recursos hídricos y los ecosistemas relacionados, promoviendo el desarrollo sostenible y la estabilidad política. Además, subraya la importancia de asegurar que cada persona tenga acceso a suficiente agua segura y a un costo asequible. Sin embargo, la seguridad hídrica enfrenta constantes desafíos debido a factores como el cambio climático y el aumento de la demanda de agua. Uno de los principales motivos es la falta de coordinación entre instituciones, la insuficiente participación pública y la fragmentación de políticas son desafíos críticos en la gobernanza del agua. Frente a estos retos, podemos destacar la necesidad de fortalecer las instituciones, mejorar la planificación y adoptar tecnologías innovadoras que promuevan la resiliencia y la adaptación a las condiciones cambiantes.

2.2. Criterios para la selección de parámetros de medición

La vigilancia de la calidad del agua para el abastecimiento a la población, comienza en el origen de la misma, es decir, en embalses, ríos y pozos, continúa durante su tratamiento en las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) y a través de su paso por la red de distribución hasta que llega al consumidor. Estos parámetros son necesarios medir para obtener datos que describan las características físicas, químicas y biológicas del agua.

Así mismo la NB 512 dispone los lineamientos para asegurar la calidad del agua destinada al consumo humano, deben estar enfocados en la selección de parámetros que deben ser monitoreados constantemente. Este enfoque se basa en la identificación de riesgos potenciales para la salud y en la protección de la población ante posibles contaminantes.

Igualmente, el Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA, 2016) establece mediante la NB 496 que la selección de parámetros de medición para el agua destinada al consumo humano debe basarse en un análisis de riesgos que considere la calidad de la fuente de agua, la naturaleza de los contaminantes potenciales, y la eficacia de los procesos de tratamiento disponibles, garantizando así un monitoreo efectivo y continuo en función de las condiciones específicas del entorno.

2.2.1. Relevancia sanitaria

La garantía sanitaria en la calidad del agua que se consume es representa un constante reto para las instituciones responsables de brindar este servicio básico. El agua no potable tiene efectos en la salud provocando enfermedades como la hepatitis A, la diarrea, etc. Para conseguir la garantía en la calidad del agua es indispensable disponer de unas infraestructuras adecuadas y, además, llevar a cabo un correcto mantenimiento de las instalaciones.

Como señala Dufour et al. (2003) la garantía sanitaria en la calidad del agua es un desafío constante para las instituciones encargadas de proveer este servicio básico. La infraestructura adecuada y el mantenimiento continuo de las instalaciones son esenciales para evitar enfermedades relacionadas con el agua no potable, como la diarrea y la hepatitis A. Asimismo, los esfuerzos por asegurar la calidad del agua incluyen monitoreos regulares que permiten una evaluación constante de los riesgos para la salud pública.

Se ha comprobado que la implementación de métodos precisos para medir estos parámetros microbianos asegura que el agua sea segura para el consumo humano y que se cumplan los estándares de calidad requeridos. De esta manera, una vigilancia constante y efectiva de los parámetros microbiológicos no solo previene la exposición a riesgos sanitarios, sino que también garantiza la provisión de agua segura y saludable para la población.

2.2.2. Relevancia ambiental

La de la calidad del agua no solo afecta directamente la salud humana, sino que también tiene un impacto significativo en el medio ambiente. La medición precisa de los parámetros del agua es crucial para identificar y mitigar la contaminación que resulta de diversas actividades humanas, como la agricultura y la industria. La preservación de los ecosistemas acuáticos depende de la implementación de estándares rigurosos que regulen la calidad del agua y controlen la descarga de contaminantes. Este enfoque no solo protege la biodiversidad, sino que también asegura que los recursos hídricos sigan siendo seguros para el consumo humano.

Según Boyd (2015) el deterioro de la calidad del agua se ha convertido en un problema grave en muchos países debido a la creciente contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Este fenómeno es resultado directo de la actividad humana, como la agricultura y la industria. La medición precisa de parámetros del agua es esencial para mitigar estos impactos y garantizar que los recursos hídricos sigan siendo seguros para el consumo humano, además de proteger los ecosistemas naturales que dependen de ellos.

Asimismo, la contaminación de fuentes superficiales y subterráneas ha intensificado el desafío de preservar la calidad del agua, lo que resalta la necesidad de implementar estrategias efectivas para proteger tanto el medio ambiente como la salud pública.

2.3. Parámetros físico-químicos

Los parámetros fisicoquímicos son características medibles que definen la calidad del agua, abarcando tanto aspectos físicos como químicos. Estos parámetros incluyen la temperatura, turbidez, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, y la presencia de contaminantes como metales pesados, nutrientes y compuestos orgánicos. Evaluar estos parámetros es crucial para determinar la aptitud del agua en distintos usos, como el consumo humano, la agricultura, la industria y la protección de los ecosistemas acuáticos.

De acuerdo con Arora (2017), los parámetros físico-químicos establecen las propiedades básicas del agua, como su temperatura, color, turbidez, pH, conductividad y salinidad. Estos son esenciales para determinar si el agua es apta para diversos fines, ya sea para consumo humano, actividades industriales o preservación de la vida acuática. Su medición y el control permiten evaluar la calidad del agua y su impacto en la salud y el medio ambiente

En este sentido, los parámetros físico-químicos juegan un papel fundamental en el tratamiento del agua destinada al consumo humano. Factores como el pH, el oxígeno disuelto, la temperatura, la conductividad, la turbidez y los sólidos totales disueltos deben ser monitoreados tanto antes como durante el proceso de tratamiento. Estos indicadores no solo reflejan la calidad inicial del agua, sino que también influyen en la eficiencia y efectividad de los procesos de purificación.

2.3.1. pH

Según Soult (2024), el pH es un parámetro fundamental que mide la acidez o alcalinidad de una solución, influenciado por la concentración de iones de hidrógeno. Este parámetro es crucial en el tratamiento del agua, ya que afecta directamente procesos clave como la desinfección y la coagulación. Mantener el pH dentro de los rangos óptimos es esencial para garantizar la eficiencia de estos procesos y asegurar que el agua tratada sea segura para el consumo humano.

Por su parte, la Norma Boliviana NB 512, define al pH como uno de los parámetros operativos más importantes en el control de la calidad del agua para consumo humano. Aunque el pH no suele afectar directamente a los consumidores, su medición y control son esenciales para garantizar la eficacia de los procesos de tratamiento del agua, como la coagulación y desinfección. La normativa establece un rango aceptable de pH entre 6.5 y 9.0 para garantizar su calidad y seguridad para el consumo humano. Este rango permite que el agua no sea ni demasiado ácida ni demasiado alcalina, protegiendo tanto la salud humana como las infraestructuras de distribución.

Es importante resaltar que el monitoreo constante del pH del agua, tanto antes de su ingreso a la planta como durante el proceso de tratamiento, se realiza utilizando medidores electrónicos que permiten ajustes automáticos en tiempo real. Esto asegura que el pH del agua se mantenga dentro de los niveles óptimos, evitando la corrosión de las tuberías y garantizando la eliminación efectiva de patógenos. Un pH descontrolado no solo puede reducir la eficiencia del tratamiento, sino también poner en riesgo la salud pública, ya que puede aumentar la solubilidad de contaminantes tóxicos, como los metales pesados.

2.3.2. *Oxígeno disuelto*

El oxígeno disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno libre presente en el agua en forma de moléculas de O_2 , y constituye un indicador clave de su calidad. Mantener una concentración adecuada de OD es fundamental para garantizar la potabilidad del agua, ya que influye en las características organolépticas, como el sabor y el olor, y en los procesos de tratamiento, como la oxidación de contaminantes. Niveles adecuados de OD reflejan un ecosistema saludable, mientras que niveles bajos pueden indicar contaminación o condiciones desfavorables para la vida acuática.

De acuerdo con Shapiro (2018), el oxígeno disuelto es un parámetro crucial cuya concentración está influenciada por factores como la temperatura, la presión atmosférica y la actividad iónica del agua. La medición precisa de este parámetro es esencial no solo para evaluar la salud de los ecosistemas acuáticos, sino también para garantizar la calidad geoquímica de las aguas superficiales y subterráneas. La disponibilidad de oxígeno disuelto es fundamental para muchos procesos biológicos y químicos que dependen de su presencia para mantener el equilibrio ecológico y la calidad del agua tratada.

2.3.3. Temperatura

La temperatura del agua es un parámetro físico fundamental que influye en múltiples aspectos de la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos. Afecta la solubilidad de gases como el oxígeno disuelto, la tasa metabólica de los organismos acuáticos y la eficiencia de los procesos biológicos y químicos en el agua. Cambios drásticos en la temperatura pueden alterar el equilibrio ecológico, favoreciendo la proliferación de algunas especies y perjudicando a otras, lo que hace su medición crucial para la gestión ambiental.

De acuerdo con Dimkić (2020), la temperatura del agua influye significativamente en los procesos de captación y tratamiento. Las variaciones en la temperatura afectan la

efectividad de procesos como la coagulación y la desinfección. En temperaturas más bajas, estos procesos se ralentizan, lo que puede reducir la eficiencia en la eliminación de contaminantes. Por esta razón, es crucial monitorizar y ajustar la temperatura del agua durante todo el proceso de tratamiento para asegurar que se cumplan los estándares de calidad del agua potable.

2.3.4. Conductividad

La conductividad en el agua es una medida de la capacidad del agua para conducir electricidad, la cual depende de la presencia de iones disueltos, como sales, ácidos o bases. Cuanto mayor sea la cantidad de iones en el agua, mayor será su conductividad. Este parámetro es esencial para evaluar la calidad del agua, ya que indica la concentración de sustancias disueltas y puede usarse como un indicador de contaminación. La conductividad es relevante en aplicaciones como el monitoreo de aguas residuales, aguas subterráneas y sistemas de tratamiento de agua potable.

Monroy González et al. (2019) destacan que la conductividad no solo ayuda a evaluar la concentración de sólidos disueltos, sino que también permite detectar contaminantes que podrían comprometer la calidad del agua destinada al consumo humano. Mantener la conductividad en niveles adecuados es esencial para prevenir la corrosión en las tuberías y asegurar que el agua tratada cumpla con los estándares de seguridad.

2.3.5. Turbidez

La turbidez es el grado de transparencia del agua o algún otro líquido, y cuantifica la presencia de partículas suspendidas que afectan la transmisión de la luz a través de ella. Estas partículas pueden ser de origen orgánico o inorgánico, como arcillas, sedimentos, microorganismos y compuestos orgánicos disueltos. La turbidez no solo altera la apariencia

visual del agua, haciéndola parecer turbia u opaca, sino que también puede ser un indicador de la calidad del agua y de la presencia de contaminantes.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud OMS (2017), la turbidez es un parámetro fundamental en el tratamiento del agua para el consumo humano, ya que mide la presencia de partículas suspendidas que afectan la claridad del agua. Aunque por sí sola no siempre representa un riesgo directo para la salud, la turbidez puede ser un indicio de la presencia de microorganismos patógenos y de eventos peligrosos en el sistema de suministro de agua. Su importancia radica en que niveles elevados de turbidez pueden comprometer la efectividad de los procesos de desinfección, al proteger a los patógenos de la acción de los desinfectantes. Por lo tanto, es crucial monitorear y reducir la turbidez en cada etapa del tratamiento del agua para asegurar la eliminación adecuada de contaminantes y garantizar la seguridad del agua destinada al consumo humano.

2.3.6. *Sólidos totales disueltos*

Los sólidos disueltos, de un tamaño inferior a 2 micras, se refieren a cualquier mineral, sal, metal, en forma de moléculas, átomos, cationes o aniones disuelto en el agua. Los sólidos totales disueltos (TDS) comprenden las sales inorgánicas (principalmente calcio, magnesio, potasio, sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica que se disuelven en el agua. La concentración de TDS es la suma de todas las sustancias filtrables presentes en el agua que pueden determinarse gravimétricamente. Sin embargo, en la mayoría de los casos, los TDS están compuestos predominantemente por iones. Este parámetro es ampliamente utilizado en estudios de calidad de masas de agua naturales, incluyendo tanto aguas superficiales como subterráneas.

De acuerdo con Kumar et al. (2023), los sólidos totales disueltos (TDS) representan la cantidad de minerales, sales y metales presentes en el agua en forma disuelta. Este parámetro es crucial para evaluar la calidad del agua, ya que niveles elevados de TDS pueden afectar tanto el sabor como la potabilidad del agua. En el tratamiento del agua, controlar los niveles de TDS es esencial para evitar problemas como la corrosión de infraestructuras y para asegurar la eficiencia de los procesos de purificación. Además, concentraciones elevadas de TDS pueden hacer que el agua no sea apta para el consumo humano.

2.4. Parámetros de cantidad del agua

El análisis de la cantidad de agua disponible en un sistema es un aspecto fundamental en la gestión y planificación de los recursos hídricos. Los parámetros de cantidad de agua permiten evaluar no solo la disponibilidad del recurso, sino también su distribución a lo largo del tiempo, lo cual es esencial para garantizar un suministro constante y sostenible. Entre los parámetros más relevantes se encuentran el caudal, las precipitaciones y la capacidad de almacenamiento en embalses o acuíferos. La medición precisa de estos parámetros es clave para una gestión eficiente de los recursos hídricos, especialmente en contextos de escasez de agua o en zonas con una alta demanda del recurso.

2.4.1. Caudal

El caudal es un parámetro que mide el volumen de agua que pasa a través de una sección transversal de un río, canal o tubería en un determinado tiempo. Se expresa comúnmente en metros cúbicos por segundo (m^3/s) y es uno de los indicadores más importantes en la hidrología para evaluar la cantidad de agua en movimiento en un cuerpo de agua. La medición del caudal es esencial para una amplia gama de aplicaciones, desde la gestión de recursos hídricos hasta la planificación de infraestructuras y la evaluación de

riesgos de inundación. Diversos métodos, como el uso de correntómetros o estaciones hidrométricas, permiten determinar el caudal de manera precisa y fiable.

Según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN, 2018), El caudal es una medida esencial para la gestión del agua, ya que indica la cantidad de agua disponible en un río o cuerpo de agua en un tiempo y lugar determinados. Este monitoreo no solo ayuda a determinar cuánta agua se tiene para consumo humano y para los ecosistemas, sino que también es fundamental para planificar el uso del agua y prever su distribución a lo largo del tiempo. Además, el monitoreo de caudal está vinculado a aspectos legales y de derechos de uso, lo que lo convierte en un factor crucial en la toma de decisiones sobre la gestión de recursos hídricos.

2.4.2. Técnicas de monitoreo y análisis de datos

El monitoreo continuo de la cantidad de agua en cuerpos hídricos se basa en la medición de niveles y caudales, lo cual es fundamental para la gestión adecuada de los recursos hídricos. La medición de los niveles de agua puede realizarse de dos maneras principales: observación directa y registro continuo, cada una con ventajas y limitaciones que responden a necesidades distintas.

2.4.2.1. Observación directa o discreta.

Consiste en la medición manual del nivel de agua a una hora determinada, utilizando instrumentos como la mira hidrométrica, limnómetro, maxímetro o limnicontacto. Estos dispositivos permiten obtener lecturas de forma sencilla y económica, aunque con una precisión limitada.

Este tipo de medición requiere que un observador tome las lecturas en horarios establecidos, con el objetivo de estandarizar los resultados que permitan crear series históricas comparables. A pesar de ser un método económico, depende de la consistencia y disponibilidad del observador, lo que introduce limitaciones en la calidad de los datos obtenidos.

2.4.2.2. Observación mediante registro continuo.

La observación con registro continuo se lleva a cabo mediante el uso de equipos mecánicos, digitales o automáticos, que permiten la recopilación de datos constantes sobre el nivel del agua. Este método ofrece una alta precisión y permite el monitoreo detallado de las variaciones del nivel de agua durante diferentes épocas hidrológicas, como temporadas húmedas, secas y periodos de transición.

Aunque el costo de estos equipos es elevado, su eficacia y exactitud han hecho que sean indispensables para obtener información detallada y continua. Esta información resulta crucial para la planificación de recursos hídricos, llevar un control de la calidad del agua que permitan tomar decisiones en la gestión del riesgo.

CAPÍTULO III: DIAGNÓSTICO Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO DE CALIDAD Y CANTIDAD DE AGUA EXISTENTES DE COSAALT R.L.

3.1. Diagnóstico integral del sistema de monitoreo de COSAALT R.L.

El monitoreo de la calidad del agua, desde la fuente hasta el grifo, es vital para la producción y distribución segura y eficiente del agua potable. El objetivo del monitoreo de la calidad del agua potable y el agua sin tratar es prevenir los riesgos para la salud humana y el medio ambiente, así como cumplir con las normas y regulaciones del agua potable.

El monitoreo continuo de las fuentes naturales de agua, como los ríos, los lagos y las aguas subterráneas, proporciona agua potable más segura y de mayor calidad, ayuda a detectar temprano las sustancias que pueden dañar nuestro medio ambiente y nuestra salud. El monitoreo también ayuda a identificar el nivel de nitratos, sustancias orgánicas y turbidez en las fuentes de agua para que los usuarios sepan cómo tratar el agua y puedan optimizar el proceso.

Con las tecnologías de comunicación y de software actuales y futuras, existen soluciones digitales sólidas para ayudar a los usuarios a convertir los datos en conocimientos accionables que impulsen mejores resultados, optimicen las operaciones y reduzcan los costos.

El contexto de desarrollo del proyecto es importante, pues permitirá apoyar al desarrollo de un sistema de evaluación de riesgo respecto a zonas vulnerables, por tanto la cantidad como la calidad del agua son las variables que destacan sobre el análisis requerido, principalmente determinando la presencia del agua superficial y subsuperficial disponible para su aprovechamiento en el sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de

Tarija , a través de las operaciones de la EPSA local COSAALT R.L. El agua subterránea no corresponde al alcance del presente estudio, por tanto, toda la red de distribución de agua potable que esté vinculada a pozos de explotación de agua subterránea se ha excluido del análisis.

En este contexto, es importante revisar las mediciones o monitoreos de COSAALT R.L. en el sistema correspondiente a tal delimitación, y los demás esfuerzos institucionales que regionalmente desarrollan monitoreo de la cantidad de agua y calidad en las fuentes de agua superficiales y subsuperficiales, aprovechadas con obras de toma convencionales (presa derivadora, toma lateral directa y galería filtrante) que conducen sus aguas a la planta de tratamiento de agua potable, mediante sistemas de conducción a gravedad, bombeo, y luego es distribuido por medio de tanques de almacenamiento ubicados en el área de concesión de COSAALT R.L.

3.2. El rol de COSAALT R.L. en el desarrollo y monitoreo del sistema de agua potable en Tarija

La Cooperativa de Servicios de Agua y Alcantarillado de Tarija Responsabilidad Limitada (COSAALT R.L.) es la responsable de la prestación de los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario a la ciudad de Tarija.

Hasta el año 1986, la prestación de servicios de agua potable en la ciudad de Tarija estuvo a cargo de la Administración Regional para Obras Sanitarias de TARIJA (AROS – TARIJA), dependiente del Ministerio de Urbanismo y Vivienda. COSAALT LTDA. Fue fundada el 22 de septiembre de 1986 y obtuvo su Personería Jurídica el 27 de noviembre de 1986 mediante Resolución de Consejo Nacional de Cooperativas, ejerciendo su influencia en

toda la jurisdicción correspondiente al municipio de Tarija, pudiendo ampliar sus servicios a otros ámbitos territoriales y jurisdiccionales del departamento. Siendo su duración indefinida.

La Ley del Sistema de Regulación Sectorial (SIRESE) No. 1600 de 28 de octubre de 1994 establece las normas para la concesión de aprovechamiento de aguas y la concesión del servicio público de agua potable y alcantarillado sanitario. En este marco se crea la Superintendencia de Aguas, cuyo principal objetivo es regular controlar y supervisar las actividades del sector aguas.

COSAALT LTDA. Mediante Oficio GG 341/98 de fecha 27 de julio de 1998 presentó la solicitud de regularización de su Concesión a la Superintendencia de Saneamiento Básico, la misma que aprobó la regularización de la Concesión, mediante Resolución Administrativa SA No. 55/99 en fecha 4 de diciembre de 1998. Cumplidos todos los requisitos, el 16 de febrero de 2001 se suscribe el contrato de Concesión entre la Superintendencia de Saneamiento Básico y COSAALT LTDA. Por 40 años.

El primer sistema de dotación de agua potable para la ciudad de Tarija fue construido el año 1937, efectuándose algunas mejoras el año 1964 y otras de 1970 a 1977.

En la gestión 1977, se realizó una consultoría para diseñar el mejoramiento y ampliación del sistema, ejecutada por la empresa CONNAL. Dicho estudio permitió solicitar al Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el financiamiento para las obras, solicitud que se hizo efectiva en fecha 5 de mayo de 1988.

Durante el año 1986 ocurrieron transformaciones institucionales importantes relacionadas con la adopción de un modelo cooperativo en la Gestión y Prestación de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario de la ciudad de Tarija.

Luego de realizados los trámites administrativos y al amparo de la ley General de Sociedades Cooperativas a través del Instituto Nacional de Cooperativas (INALCO), en fecha 27 de noviembre de 1986, otorga a nuestra Cooperativa, el reconocimiento de Personería Jurídica con el N° 03181 e inmediatamente se tramita la inscripción en el Registro Nacional de Cooperativas, con el N° 2919, documentos que le permiten desenvolverse como Cooperativa. En fecha 12 de febrero de 2019, la Autoridad de Fiscalización y Control de Cooperativas AFLOOP, mediante RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA REGULATORIA H-2a FASE-N° 027/2019, resuelve registrar la denominación de COOPERATIVA DE SERVICIOS PÚBLICOS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO SANITARIO TARIJA RL. “COSAALT” RL., homologar el Estatuto Orgánico de COSAALT RL, y la inscripción en el Registro Estatal de Cooperativas N° 2919 del Sector: SERVICIOS PÚBLICOS – AGUA Y ALCANTARILLADO.

Actualmente la Cooperativa por medio del departamento de producción y el departamento de control de calidad, tiene un sistema de monitoreo climático, de calidad y cantidad de agua, en funcionamiento.

3.3. Descripción del sistema actual de monitoreo

3.3.1. Estructura y tecnología utilizada

Para el levantamiento de información correspondiente a los equipos fijos que se utilizan para el monitoreo de calidad y cantidad de agua se utilizó una ficha de identificación y evaluación de estaciones, esto permitió estandarizar la información recolectada.

3.4. Definición de los sistemas hídricos de abastecimiento y distribución que contempla la cuenca de aporte al área de estudio

3.4.1. Fuentes de agua superficial, subsuperficial y subterránea de la ciudad de Tarija

Del inventario de fuentes realizadas, se tiene que para consumo humano la Cooperativa de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado de Tarija COSAALT R.L. actualmente tiene en explotación las siguientes fuentes superficiales:

- Río del Rincón de la Vitoria (2 Tomas superficiales)

Adicionalmente se tiene 4 fuentes de aguas subsuperficiales, que captan mediante galerías filtrantes, estas son:

- Rincón de la Vitoria
- Erquis
- Los Álamos
- Las Tipas

Estas fuentes tienen un sistema de transporte de agua que está constituido por 7 tramos, según el siguiente detalle:

Tabla 2

Detalle del sistema de transporte de la red operada por COSAALT R.L. en la ciudad de Tarija.

Tramo	Descripción
Tramo 1: Rincón de la Vitoria a Desarenador	Sistema y ubicación: Canal de la Vitoria, Sección en U 54 cm x 70-110 cm
	Año de operación: 1940
	Nombre del canal / tubería: Canal de la Vitoria
	Longitud: 13500 metros
	Material: Hormigón ciclópeo

	Caudal real transportado: 342.25 l/s (Caudal máximo, disminuye en época de estiaje) Caudal real derivaciones: En promedio anual, se derivan 253.5 l/s Tipo de protección: Mampostería de piedra Observaciones: El caudal máximo de transporte disminuye en la época de estiaje. En promedio anual, se derivan 253.5 l/s. Sistema y ubicación: S/N (sin nombre específico), Circular, D=16" Año de operación: 1940 Nombre del canal / tubería: S/N (sin nombre específico) Longitud: 1129 metros
Tramo 2:	Material: F.F.D (Fierro Fundido Dúctil)
Desarenador a Planta de Tabladita	Caudal real transportado: 324.25 l/s (Caudal máximo, disminuye en época de estiaje) Caudal real derivaciones: En promedio anual, se derivan 235.5 l/s Tipo de protección: Tubería enterrada de D=16" Observaciones: El caudal máximo de transporte disminuye en la época de estiaje. En promedio anual, se derivan 235.5 l/s.
Tramo 3: Río Guadalquivir a Planta de Tabladita	Sistema y Ubicación: Las Tipas, Circular, D=12" Año de Operación: 1992 Nombre del Canal / Tubería: Las Tipas

	Longitud: 1670 metros Material: F.F.D (Fierro Fundido Dúctil) Caudal Real Transportado: 110 l/s Caudal Real Derivaciones: Ninguna Tipo de Protección: Ninguna Observaciones: Tubería de D=12".
	Sistema y Ubicación: S/N (sin nombre específico), Circular, D=16" Año de Operación: 1940 Nombre del Canal / Tubería: S/N (sin nombre específico)
Tramo 4: Planta de Tabladita a Depósitos de La Loma	Longitud: 3855 metros Material: F.F.D (Fierro Fundido Dúctil) Caudal Real Transportado: S/R (Sin Registro) Caudal Real Derivaciones: Ninguna Tipo de Protección: Ninguna Observaciones: Tubería de D=16".
Tramo 5: Río Erquis a Depósito de Tomatas "A"	Sistema y Ubicación: Aducción Tomatas "A", Circular, D=3" Año de Operación: S/R (Sin Registro) Nombre del Canal / Tubería: Aducción Tomatas "A" Longitud: 157 metros Material: F.G. (Fibra de Vidrio)

		Caudal Real Transportado: 11.45 l/s
		Caudal Real Derivaciones: Ninguna
		Tipo de Protección: Ninguna
		Observaciones: Tubería de D=3".
Tramo 6: Río Erquis a Depósito de Tomatas "B"		Sistema y Ubicación: Aducción Tomatas "B", Circular, D=4" y D=3"
		Año de Operación: S/R (Sin Registro)
		Nombre del Canal / Tubería: Aducción Tomatas "B"
		Longitud: 229 metros (70 metros de D=4" y 159 metros de D=3")
		Material: F.G-P.V.C (Fibra de Vidrio - Policloruro de Vinilo)
		Caudal Real Transportado: 14.8 l/s
		Caudal Real Derivaciones: Ninguna
		Tipo de Protección: Ninguna
Tramo 7: Río Erquis a Tanque de las Barrancas		Observaciones: Tuberías de D=4" y D=3".
		Sistema y Ubicación: Aducción Galería Filtrante, Circular, D=12"
		Año de Operación: S/R (Sin Registro)
		Nombre del Canal / Tubería: Aducción Galería Filtrante
		Longitud: 1210 metros
		Material: F.G-P.V.C (Fibra de Vidrio - Policloruro de Vinilo)

Caudal Real Transportado: 50 l/s

Caudal Real Derivaciones: Ninguna

Tipo de Protección: Ninguna

Observaciones: Tubería de D=12".

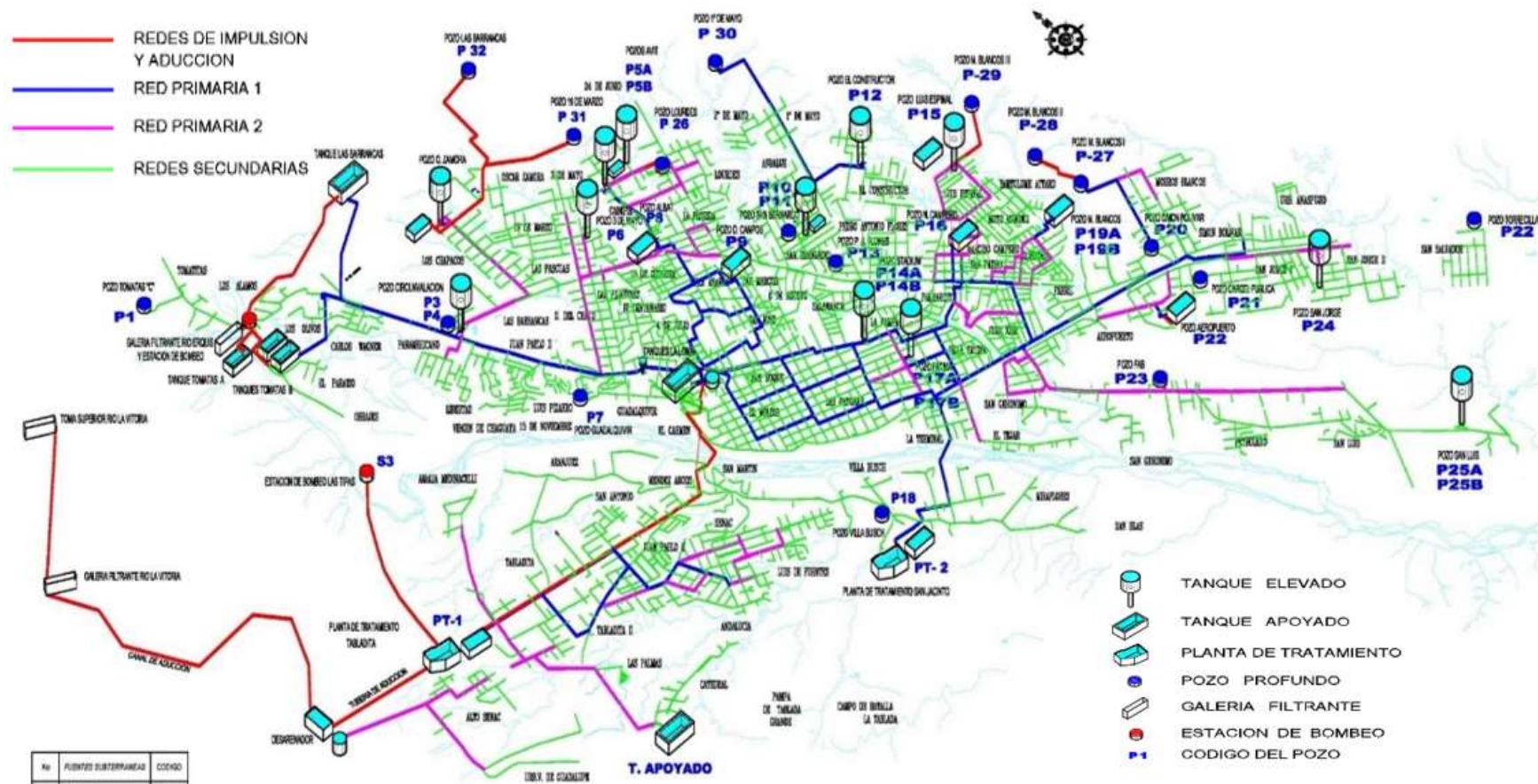
Nota. Elaboración propia en base de registros de COSAALT R.L.

De manera adicional se tiene aprovechamiento de aguas subterráneas, actualmente 53 pozos, que se encuentran distribuidos a lo largo del casco urbano y periurbano de la ciudad de Tarija. Esto promedia un caudal cercano a los 180 l/s con un máximo de hasta de 250 l/s en los meses más críticos. La capacidad instalada de los pozos es de 355 l/s.

Mediante el siguiente esquema se puede apreciar toda la distribución y captación de redes que se tiene.

Figura 6

Esquema de fuentes, infraestructura de captación y conducción del sistema de agua potable de Tarija.



Nota. Recopilada de reportes de COSAALT R.L.

3.4.2. *Sistemas hídricos de abastecimiento de fuentes superficiales y subsuperficiales de la ciudad de Tarija*

La actual red de captación agua superficial y subsuperficial por parte de COSAALT R.L. está compuesta por los siguientes sistemas hídricos:

- Sistema hídrico Rincón de la Vitoria
- Sistema hídrico Erquis
- Sistema hídrico Los Álamos
- Sistema hídrico Las Tipas

3.4.3. *Sistema hídrico Rincón de la Vitoria*

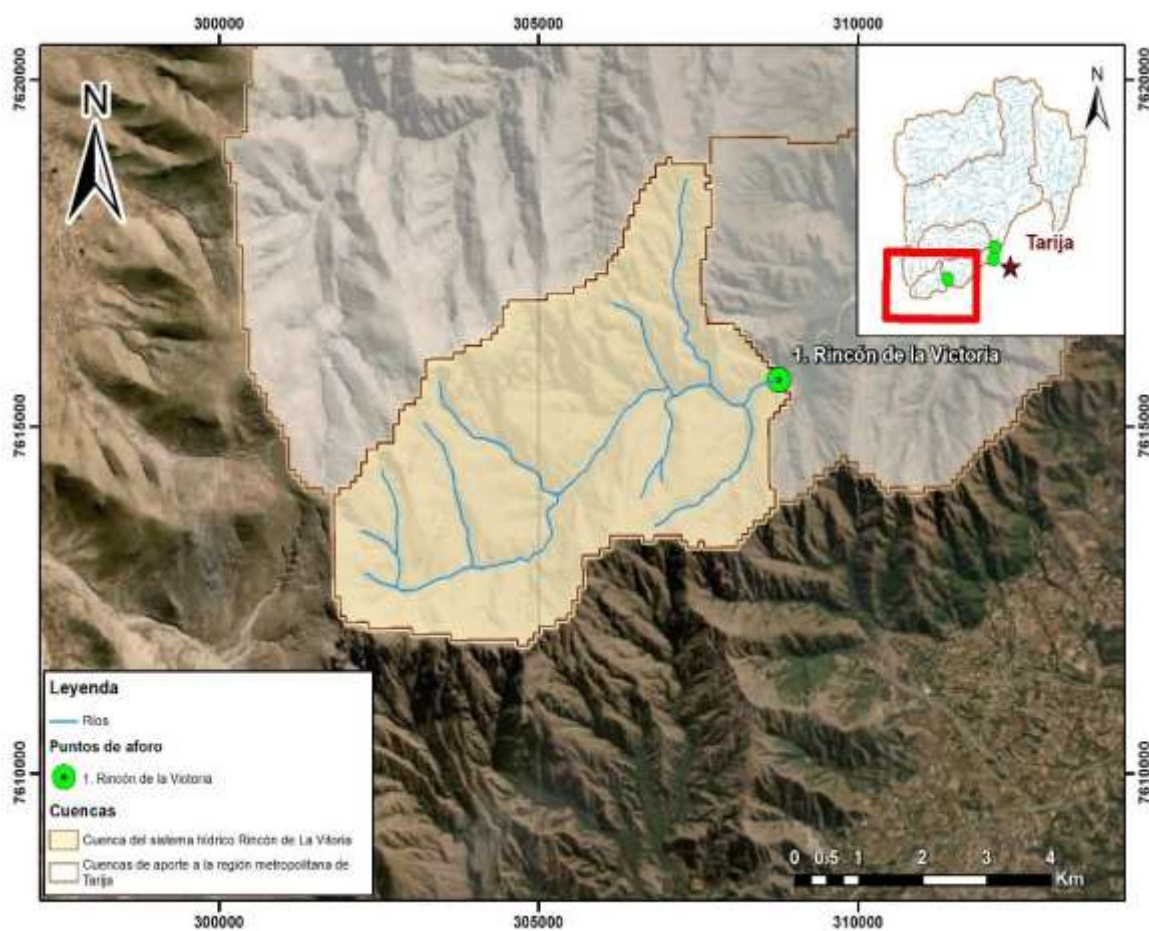
Los parámetros morfológicos que influyen en el Sistema Hídrico Rincón de la Vitoria son:

- Área: 27.2 km²
- Perímetro: 29.78 km
- Elevación máxima y mínima: 4225 msnm y 2257 msnm
- Longitud del cauce principal: 7.52 km
- Pendiente media del cauce principal: 23.5%
- Índice de compacidad y de forma: 1.61 y 0.48

Además, en la siguiente figura se puede apreciar las cuencas que influyen en el sistema hídrico Rincón de la Vitoria.

Figura 7

Mapa de cuencas que aportan al sistema hídrico Rincón de la Vitoria.



Nota. Elaboración propia.

La principal fuente de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Tarija es actualmente el río Vitoria. Las obras de captaciones directas son tres: una de ellas mediante un azud derivador y vertedero lateral que conduce a un canal gravitacional, una obra de toma directa y una galería filtrante ubicada aguas abajo de la toma directa. Todas las obras de toma se encuentran sobre el mismo río Vitoria y están ubicados aproximadamente a 12 Km al oeste de la ciudad.

En la siguiente Tabla se detallan las características principales del sistema de abastecimiento de agua potable, cuya fuente es el río La Vitoria.

Tabla 3

Resumen de características-SISTEMA HÍDRICO Rincón de la Vitoria.

Componente	Sistema de Agua Potable
	<u>Rincón de la Vitoria:</u>
	1) Caudales:
	Caudal medio época de lluvia de 326.44 l/s, mínimo 90 l/s, máximo 342.9 L/s (limitado por la capacidad de conducción del canal).
	Caudal medio época de estiaje 142.06 l/s
	Caudal medio anual 249.62 l/s
	2) Obras de captación: a 12 km, al oeste de la ciudad a una altura de 2200 m.s.n.m.
Fuente	Presa de derivación: Rincón de la Vitoria del año 1989
	Galería filtrante: 1600m, debajo de la presa de derivación del año 1939
	Toma directa.
	3) Aducción: Desde la presa derivadora del Rincón de la Vitoria hasta el desarenador, y luego a la planta de tratamiento de La Tabladita, con una longitud total de aproximadamente 13 km, y mediante un canal de mampostería de piedra con tramos de tubería de fierro fundido.
	Planta Potabilizadora La Tabladita
Tratamiento	El agua es tratada en la planta de tratamiento de La Tabladita construida el año 1990, con los siguientes procesos:

	a) Floculación
	b) Sedimentación
	c) Filtración
	d) Cloración
Almacenamiento después de Tratamiento	En la misma planta en tanques de almacenamiento para su distribución directa a la red, en un reservorio de 1800 m ³ ; también en los tanques La Loma.
Distribución	Red de agua domiciliaria Tarija a través de medidores de consumo administrativos por COSAALT R.L.

Nota. Elaboración propia, en base a la información proporcionada por COSAALT R.L.

3.4.4. Sistema hídrico Erquis

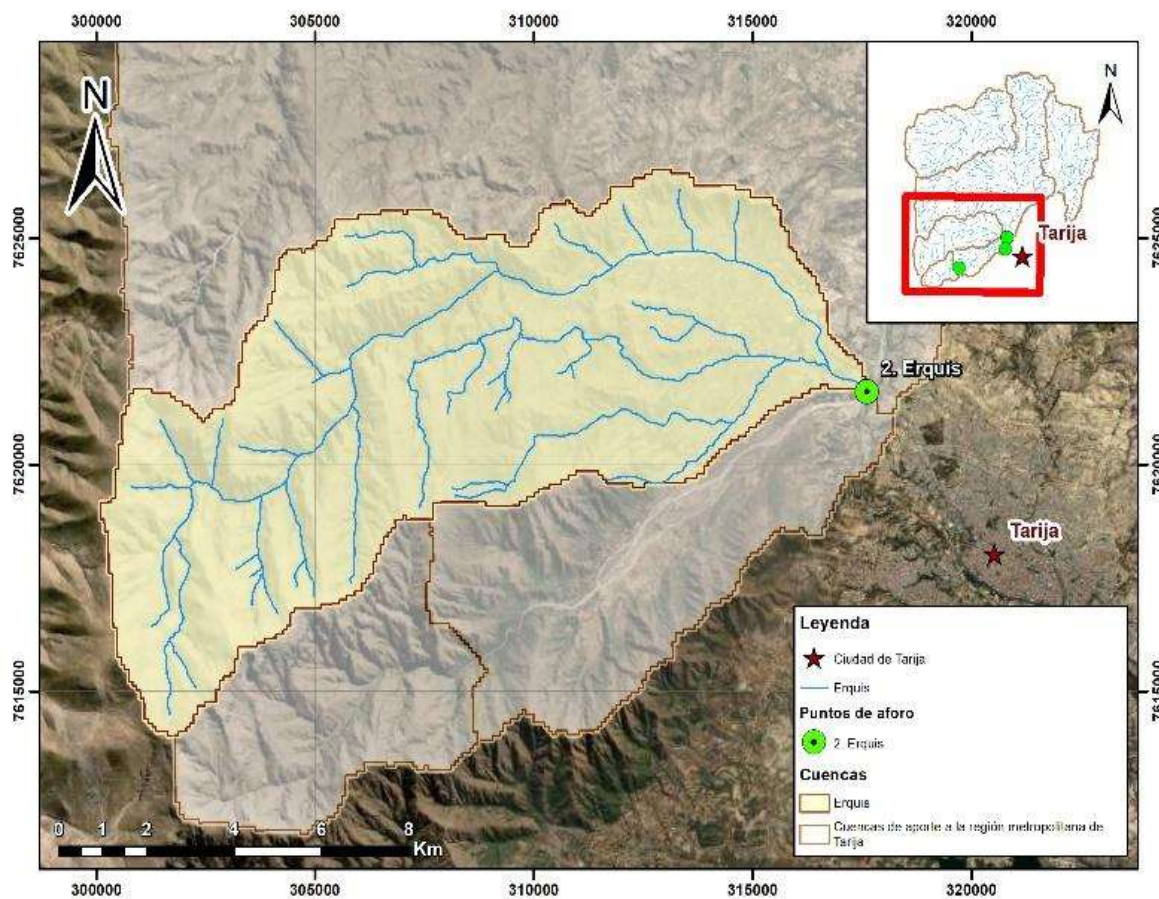
Los parámetros morfológicos que influyen en el Sistema Hídrico Erquis son:

- Área: 104.74 km²
- Perímetro: 65.51 km
- Elevación máxima y mínima: 4334 m.s.n.m. y 1924 m.s.n.m.
- Longitud del cauce principal: 21.89 km
- Pendiente media del cauce principal: 16.7%
- Índice de compacidad y de forma: 1.81 y 0.22

En la siguiente figura se puede apreciar las cuencas que influyen en el Sistema Hídrico Erquis.

Figura 8

Mapa de cuencas que aportan al sistema hídrico Erquis.



Nota. Elaboración propia.

Otra fuente es la captación mediante Galería Filtrante en el Río Erquis. Se trata de una toma sub superficial, en la cual el agua se conduce mediante bombeo a través de una línea de impulsión hasta el tanque de Las Barrancas. En la siguiente Tabla se detallan las características principales del sistema de abastecimiento de agua potable, cuya fuente es el río Erquis.

Tabla 4

Resumen de características-SISTEMA HÍDRICO Erquis.

Componente	Sistema de Agua Potable
------------	-------------------------

	<u>Sistema de Bombeo Erquis:</u>
	1) Caudales:
	Caudal medio época de lluvia 39.26 l/s
	Caudal medio época de estiaje 44.39 l/s
	Caudal medio anual 41.40 l/s
	2) Obras de captación:
Fuente	Galería filtrante
	3) Impulsión:
	Bombeo (2 bombas de 100 HP c/u) hacia el tanque Las Barrancas, mediante tubería de acero los primeros 140 m, y el resto hasta el tanque Las Barrancas con tubería PVC. Longitud total de la tubería de impulsión 1.84 km., y altura de bombeo de 68 m.
	Bombeo hacia los Tanques Tomatas A y Tomatas B, mediante una bomba de 20 HP.
Almacenamiento	Tanque las Barrancas.
	Tanque Tomatas A y Tomatas B.
Tratamiento	Cloración
Almacenamiento después de Tratamiento	En la misma planta en tanques de almacenamiento para su distribución directa a la red.
Distribución	Sistema de distribución independiente: la red de agua de Tomatitas se abastece del tanque Tomatas A, y la red de agua de Tarija del tanque Las Barrancas.

Nota. Elaboración propia, en base a la información proporcionada por COSAALT R.L.

3.4.5. Sistema hídrico Los Álamos

Los parámetros morfológicos que influyen en el Sistema Hídrico Los Álamos son:

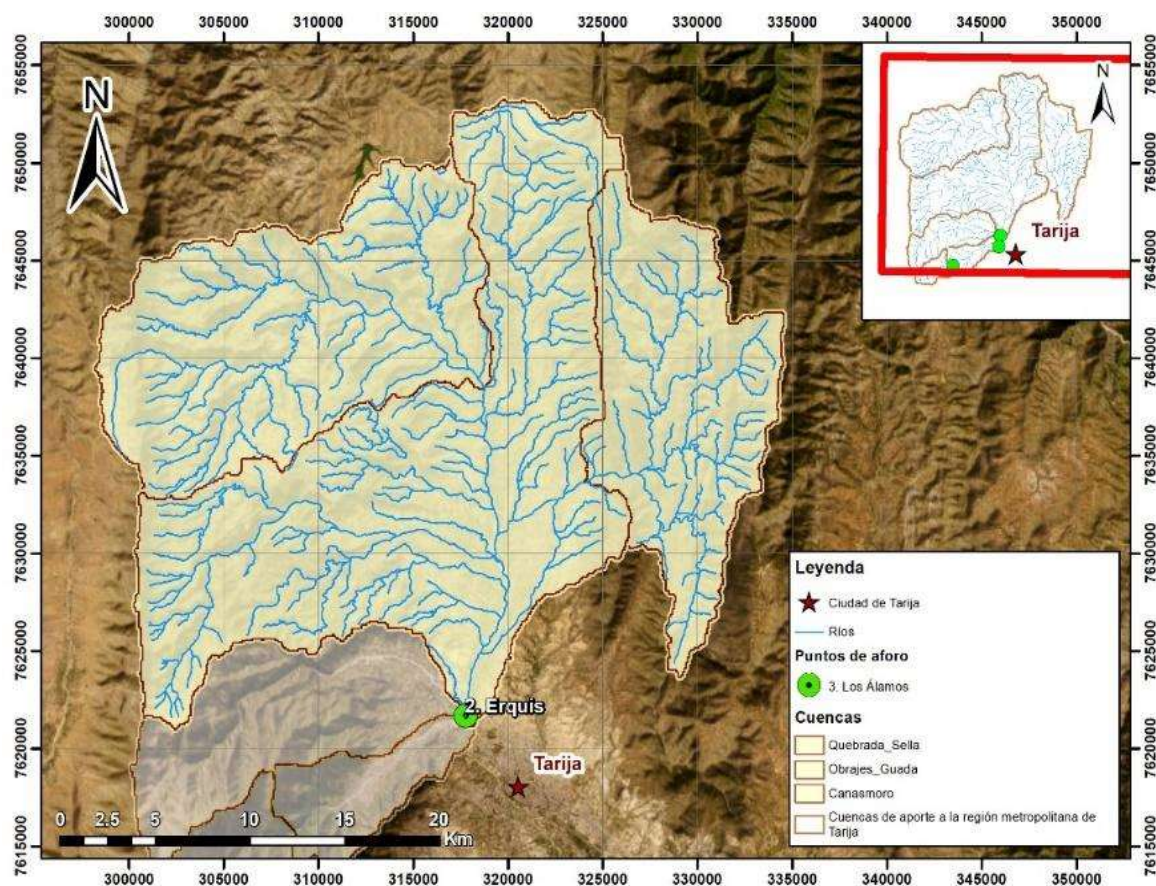
- Área: 757.6 km²

- Perímetro: 183.59 km
- Elevación máxima y mínima: 4048 m.s.n.m. y 1919 m.s.n.m.
- Longitud del cauce principal: 33.3 km
- Pendiente media del cauce principal: 8.97%
- Índice de compacidad y de forma: 1.88 y 0.68

Además, en la siguiente figura se puede apreciar las cuencas de aporte que componen el sistema hídrico Los Álamos.

Figura 9

Mapa de cuencas que aportan al sistema hídrico Los Álamos.



Nota. Elaboración propia.

Tabla 5*Resumen de características-sistema hídrico Los Álamos.*

Componente	Sistema de Agua Potable
	<u>Sistema de Bombeo Los Álamos:</u>
	1) Caudales:
	Caudal medio época de lluvia 110 l/s
	Caudal medio época de estiaje 130 l/s
	Caudal medio anual 150 l/s
Fuente	2) Obras de captación:
	Galería filtrante
	3) Impulsión:
	Bombeo (3 bombas sumergibles de 150 HP c/u) hacia el tanque Las Barrancas 2, mediante tubería de acero los primeros de 400 DN hasta el tanque Las Barrancas. Longitud total de la tubería de impulsión 1.5 km., y altura de bombeo de 74 m.
Almacenamiento	Tanque las Barrancas 2
Tratamiento	Cloración
Almacenamiento después de Tratamiento	En la misma planta en tanques de almacenamiento para su distribución directa a la red.
Distribución	Sistema de distribución independiente: la red de agua de Tomatitas se abastece del tanque Tomatas A, y la red de agua de Tarija del tanque Las Barrancas.

Nota. Elaboración propia, en base a la información proporcionada por COSAALT R.L.

3.4.6. Sistema hídrico Las Tipas

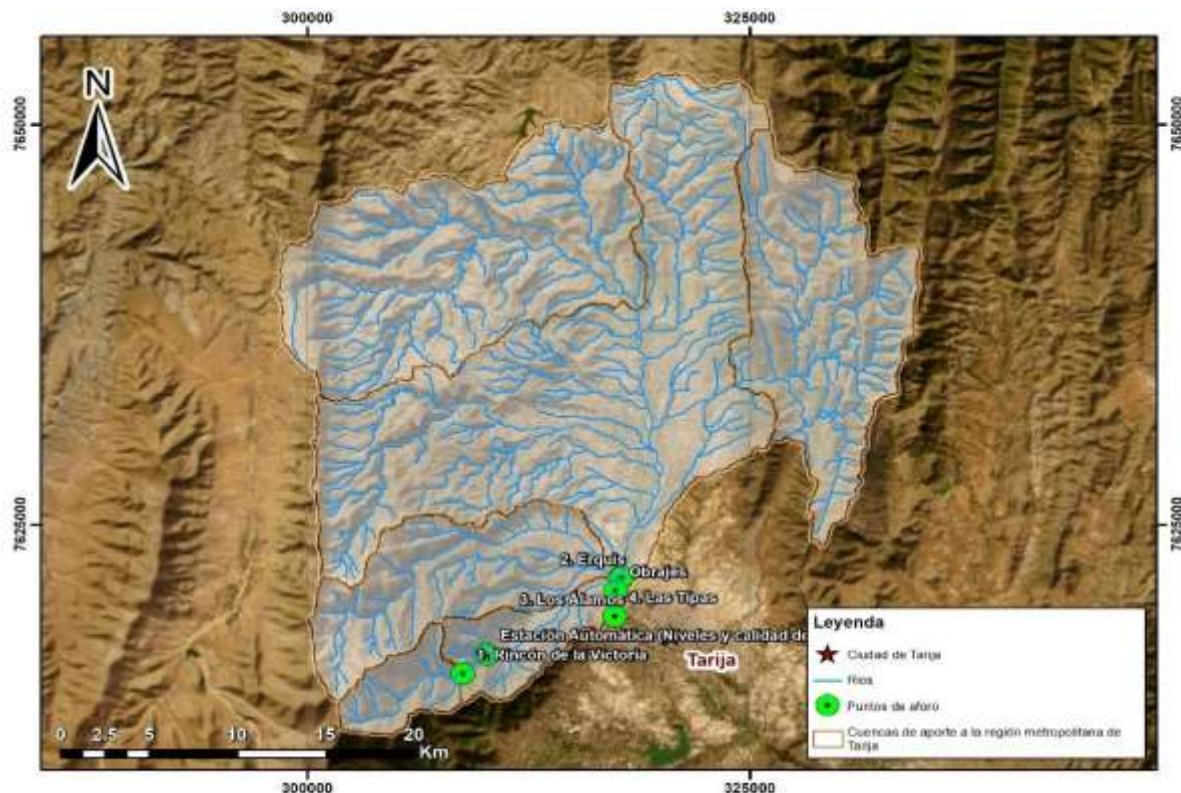
Los parámetros morfológicos que influyen en el sistema hídrico Las Tipas son:

- Área: 928.58 km²
- Perímetro: 191.44 km
- Elevación máxima y mínima: 4334 msnm y 1908 msnm.
- Longitud del cauce principal: 35.35 km
- Pendiente media del cauce principal: 8.97%
- Índice de compacidad y de forma: 1.77 y 0.74

En la siguiente figura se puede apreciar las cuencas de aporte que componen el en el sistema hídrico Las Tipas.

Figura 10

Mapas de cuencas que aportan al sistema hídrico Las tipas.



Nota. Elaboración propia.

Una segunda fuente de captación es la denominada Las Tipas 1, la cual entra en funcionamiento únicamente en época de estiaje y está ubicada en el Angosto de Aranjuez, de donde se dirigen las aguas del río Guadalquivir mediante bombeo y una línea de impulsión al tratamiento existente en La Tabladita.

En la siguiente Tabla se detallan las características principales del sistema de abastecimiento de agua potable, cuya fuente es la toma de Las Tipas.

Tabla 6

Resumen de características-sistema hídrico Las Tipas

Componente	Sistema de agua potable
Fuente	<u>Sistema de Bombeo Las Tipas:</u>
	1) Caudales:
	Caudal medio época de estiaje 74.76 l/s
	Caudal medio anual 31.97 l/s
Fuente	2) Obras de captación
	Toma directa.
	3) Impulsión:
Fuente	Tubería de fierro fundido dúctil de 300 mm de diámetro con una longitud de 1650 m.
	4) Datos:
	Altura de bombeo 98 m.
Tratamiento	Bombeo a través de 2 bombas de 100 HP y con caudales de 40 l/s cada una.
	El agua es tratada en la planta de tratamiento de La Tabladita construida el año 1990, con los siguientes procesos:

	a) Floculación
	b) Sedimentación
	c) Filtración
	d) Cloración
Almacenamiento	En la misma planta en tanques de almacenamiento para su después de Tratamiento distribución directa a la red.
Distribución	Red de agua domiciliaria Tarija

Nota. Elaboración propia, en base a la información proporcionada por COSAALT R.L.

3.4.7. Sistema hídrico de abastecimiento de aguas subterráneas

Los pozos de la EPSA COSAALT R.L. son actualmente 53, se encuentran distribuidos a lo largo del casco urbano y periurbano de la ciudad de Tarija. La variación en la producción de agua potable, las áreas o zonas de servicio son modificadas; por ejemplo, el río La Vitoria reduce considerablemente su caudal en época de estiaje. Para ello, COSAALT R.L. activa una serie de pozos para reforzar la dotación de agua a sus usuarios/as. En época húmeda, la cobertura desde La Vitoria se amplía a un 60% del caudal distribuido. Adicionalmente, existe pozos independientes denominados: Sistemas de Autoabastecimiento de Recursos Hídricos (SARH), que son utilizados para el uso industrial.

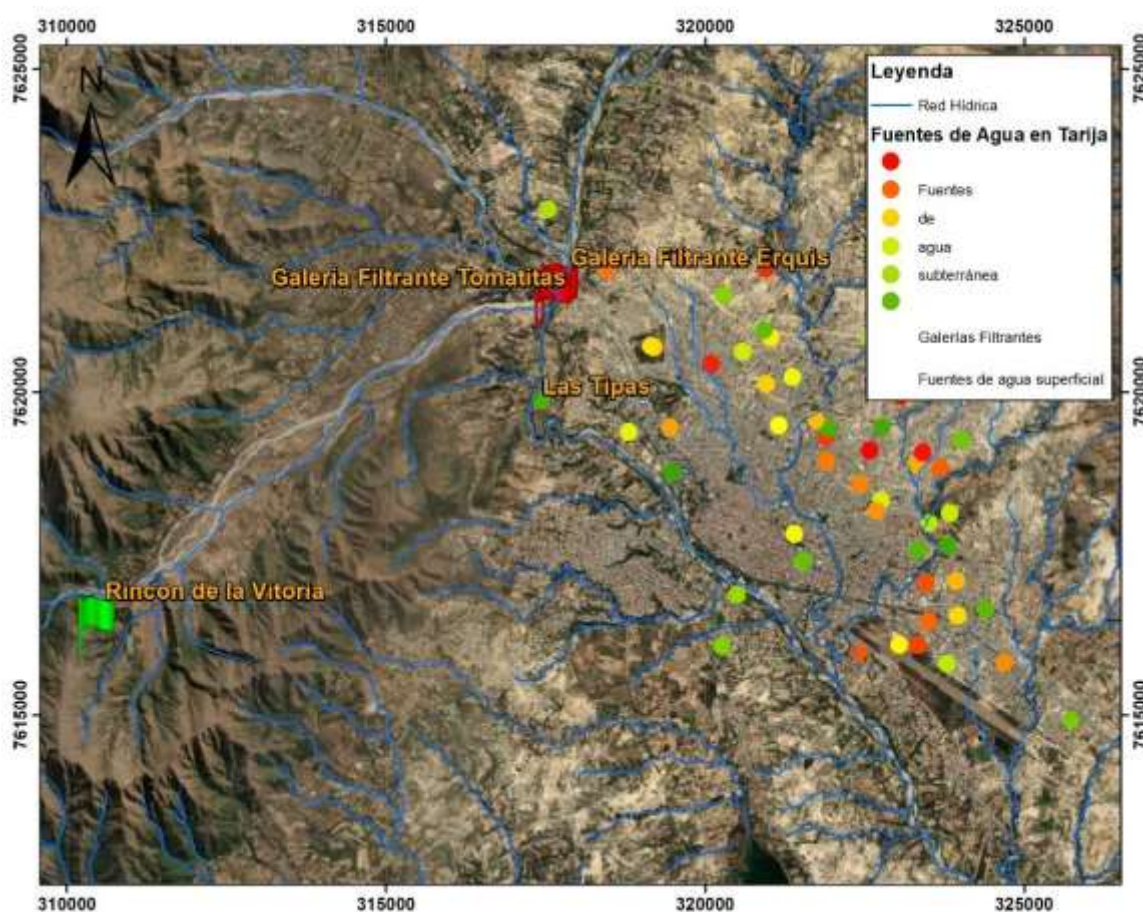
En promedio, COSAALT R.L. distribuye 564 l/s de agua potable en Tarija. Esto representa una producción anual de unos 17.9 hm³ de agua. El consumo del recurso (por habitante al día) es de 238 l/d, lo que representa un consumo anual de 10.3 hm³ de agua para los actuales 205,000 habitantes del área urbana.

Ante la reducción drástica que se produce en la época de estiaje, en caudales de las aguas superficiales, COSAALT R.L. hace uso de las aguas subterráneas mediante la

explotación de 53 pozos. Esto promedia un caudal cercano a los 180 l/s, con un máximo de hasta de 250 l/s en los meses más críticos. La capacidad instalada de los pozos es de 355 l/s y se tiene un volumen anual de producción según los datos de la gestión 2023 de 4.80 hm³.

Figura 11

Ubicación de las fuentes de aguas subterráneas en la ciudad de Tarija.



Nota. Elaboración propia.

Se observa la ubicación de las fuentes superficiales, subsuperficiales y subterráneas en la ciudad de Tarija. A continuación, se detalla la ubicación geográfica de todas las fuentes de aguas subterráneas de COSAALT R.L.

Tabla 7

Fuentes de agua subterráneas de la ciudad de Tarija.

Nº	TIPO_DE_FUENTE	FUENTE	X_UTM_	Y_UTM_	Z_	Profundidad	Diámetro	Caudal 1º año Op.	Estado	Meses de Operación	Promedio mensual de horas bomba de funcionamiento	Volumen total producido
			Zona_20S	Zona_20S	m.s.n.m							2023 (m³)
						(m.)	pulg.	m³/hr				
1	Subterráneas	Circunvalación "A"	319,205.00	7620,695.00	1,864.00	124	8	9	Sin operación	-	-	-
2	Subterráneas	Circunvalación "B"	319,150.00	7620,720.00	1,864.00	120	8	36	Sin operación	-	-	-
3	Subterráneas	Guadalquivir	319,450.00	7619,450.00	1,933.00	140	8	44.28	Operable	E, F, A, S O, N, D	313.42	215,532.07
4	Subterráneas	Avit "A"	321,035.00	7620,850.00	1,916.00	111	10	65.88	Operable	Todo el año	531.33	417,814.78
5	Subterráneas	Avit "B"	320,089.00	7620,438.00	1,916.00	121	8	44.28	Operable	Todo el año	492.58	192,739.68
6	Subterráneas	Albat	320,960.00	7620,128.00	1,915.00	80	8	25.06	Operable	Todo el año	360.75	89,656.16
7	Subterráneas	San Bernardo "A"	321,900.00	7619,300.00	1,937.00	S/R	6	15.3	Operable	Todo el año	705	100,975.18
8	Subterráneas	San Bernardo "B"	321,940.00	7619,435.00	1,932.00	S/R	8	36	Operable	Todo el año	438.08	102,060.90
9	Subterráneas	Vela	321,155.00	7619,485.00	1,880.00	157	8 y 6	7	Operable	Todo el año	504.83	122,002.92
10	Subterráneas	El Constructor "A"	322,583.00	7619,095.00	1,959.00	S/R	8	13.32	Operable	Todo el año	723.5	172,352.45
11	Subterráneas	El Constructor "B"	322,780.00	7619,460.00	1,957.00	196	8 y 6	19.8	Operable	Todo el año	722.08	87,314.90
12	Subterráneas	Luis Espinal "A"	323,305.00	7618,875.00	1,910.00	135	8	25.81	Operable	Todo el año	665.42	
13	Subterráneas	Luis Espinal "B"	323,687.00	7618,819.00	1,907.00	S/R	8	26.93	Operable	Todo el año	612.46	226,066.50
14	Subterráneas	Narciso Campero	322,765.00	7618,320.00	1,889.00	106	8	33.48	Sin Operación	-	-	-
15	Subterráneas	Morros Blancos "A"	323,515.00	7617,975.00	1,903.00	136	8	41.4	Operable	Todo el año	453.08	102,813.12
16	Subterráneas	Morros Blancos "B"	323,338.00	7617,555.00	1,902.00	138	8	37.8	Operable	Todo el año	543.17	250,373.81

17	Subterráneas	Aeropuerto "A"	323,338.00	7616,091.00	1,878.00	S/R	6	21.6	Operable	Todo el año	722	954,46.08
18	Subterráneas	Aeropuerto "B"	323,500.00	7616,460.00	1,877.00	194	6	15.84	Operable	Todo el año	724	140,676.48
19	Subterráneas	Cárcel Pública	323,965.00	7616,540.00	1,889.00	S/R	6	15.84	Sin Operación	-	-	-
20	Subterráneas	San Jorge II	324,695.00	7615,820.00	1,870.00	145,13	8	16.92	Sin Operación	-	-	-
21	Subterráneas	San Luis	324,450.00	761,435.00	1,830.00	131,6	8	41.04	Operable	Todo el año	702.58	297,925.92
22	Subterráneas	Base Aérea	323,050.00	7616,090.00	1,859.00	105,5	4	22	Sin Operación	-	-	-
23	Subterráneas	Valle Hermoso	320,500.00	7616,865.00	1,860.00	129	6	11.52	Operable	Todo el año	538.67	59,894.69
24	Subterráneas	Villa Fátima "A"	321,530.00	7617,384.00	1,863.00	S/R	8	S/R	Operable	Todo el año	179.5	97,598.74
25	Subterráneas	Villa Fátima "B"	321,545.00	7617,400.00	1,864.00	109	8	68.4	Operable	Todo el año	349	99,766.51
26	Subterráneas	Stadium (PN)	321,403.00	7617,802.00	1,872.00	147	10	65	Operable	Todo el año	158	60,065.28
27	Subterráneas	Simón Bolívar	323,940.00	7617,080.00	1,890.00	132	8	46.08	Operable	Todo el año	455.33	114,229.84
28	Subterráneas	Oscar Zamora	320,300.00	7621,500.00	1,922.00	135	8	63	Operable	Todo el año	533.42	433,243.08
29	Subterráneas	Tomatas "C"	317,545.00	7622,830.00	1,935.00	105	6	19.94	Operable	Todo el año	515.67	97,672.14
30	Subterráneas	3 de mayo	320,590.00	7620,625.00	1,911.00	122	8	22.61	Operable	Todo el año	560.5	135,910.26
31	Subterráneas	Pedro Antonio Flores	321,910.00	7618,925.00	1,890.00	S/R	8	36	Operable	Todo el año	604.33	124,277.76
32	Subterráneas	Lourdes	321,371.00	7620,239.00	1,945.00	S/R	12	S/R	Operable	Todo el año	721.08	271,804.46
33	Subterráneas	Anaspugio A (Lado Población)	323,800.00	7617,626.00	1,894.00	S/R	S/R	S/R	Operable	Todo el año	722	232,182.72
34	Subterráneas	Anaspugio B (Lado Granja)	323,835.00	7618,130.00	1,902.00	S/R	S/R	S/R	Operable	Todo el año	722	306,715.68
35	Subterráneas	1º de Mayo	322,589.00	7620,854.00	1,845.00	206	10	S/R	Operable	Todo el año	722	78,200.64
36	Subterráneas	San Jacinto A	320,271.00	7616,071.00	1,890.00	214	8 y 6	S/R	Operable	Todo el año	654.83	207,549.36
37	Subterráneas	San Jacinto B	320,156.00	7616,086.00	1,880.00	112	6	50.4	Operable	Todo el año	659.5	225,287.28
38	Subterráneas	San Salvador	325,746.00	7614,919.00	1,868.00	S/R	8	S/R	Operable	Todo el año	506.58	114,667.56
39	Subterráneas	Los Álamos	318,463.00	7621,903.00	1,969.00	144	6	36	Operable	Todo el año	516.67	128,158.38

40	Subterráneas	19 de marzo	320,927.00	7620,962.00	1,940.00	S/R	8	32.4	Operable	Todo el año	718.92	296,994.96
41	Subterráneas	Las Barrancas	320,954.00	7621,913.00	1,855.00	S/R	10	S/R	Operable	Todo el año	551.79	66,333.42
42	Subterráneas	27 de mayo	323,063.00	7619,947.00	1,927.00	157	6	13.14	Operable	Todo el año	317.88	51,472.37
43	Subterráneas	Guadalquivir II (PN)	319,474.00	7618,751.00	1,882.00	109	8	41.4	Operable	E, JL, A, S, O, N, D	275.17	117,076.25
44	Subterráneas	Guadalquivir III (PN)	318,799.00	7619,383.00	1,889.00	S/R	8	36.8	Operable	Todo el año	349.33	53,972.28
45	Subterráneas	Andaluz (PN)	321,737.00	7619,567.00	1,881.00	S/R	8	11	Sin Operación	-	-	-
46	Subterráneas	Pedro Antonio Flores II (PN)	322,436.00	7618,577.00	1,884.00	S/R	8	12.6	Operable	Todo el año	498.17	52,300.84
47	Subterráneas	Narciso Campero II (PN)	322,689.00	7618,166.00	1,882.00	S/R	8	21.6	Sin Operación	-	-	-
48	Subterráneas	Morros Blancos Aeropuerto Industrial (PN)	323,450.00	7617,049.00	1,878.00	S/R	8	57.78	Sin Operación	-	-	-
49	Subterráneas	Simón Bolívar (PN)	324,397.00	7616,637.00	1,869.00	S/R	8	69.5	Operable	F, M, A, My, S, O, N, D	224.58	77,249.52
50	Subterráneas	San Jorge I (PN)	323,796.00	7615,797.00	1,866.00	S/R	8	28.3	Operable	E, F, JL, S, O, N, D	206.25	40,953.24
51	Subterráneas	San Gerónimo (PN)	322,397.00	7615,963.00	1,855.00	S/R	8	61.2	Operable	E, A, S, O, N, D	309.67	139,788.00
52	Subterráneas	Santa Rosa	323,410.00	7619,071.00	1,907.00	S/R	6	13.8	Operable	Todo el año	528.75	51,705.40
53	Subterráneas	Monte Cristo	324,028.00	7619,251.00	1,917.00	S/R	6	13	Operable	Todo el año	455.42	48,687.05

Nota. Elaboración propia, en base a la información proporcionada por COSAALT R.L.

3.4.8. *Sistemas hídricos de distribución*

En total se tienen 14 sistemas de distribución:

1. Sistema Central
2. Sistema los Chapacos
3. Sistema de la Circunvalación
4. Sistema Albat-Avit
5. Sistema 3 de Mayo
6. Sistema de San Bernardo
7. Sistema de Luis Espinal
8. Sistema de Morros Blancos
9. Sistema de Aeropuertos
10. Sistema de San Luis
11. Sistema de San Jorge
12. Sistema de Tomatitas
13. Sistema de Pedro Antonio Flores
14. Sistema Simón Bolivia

La zona más extensa de la red de distribución corresponde al sector abastecido desde la planta de tratamiento La Tabladita, que en la época húmeda se amplía absorbiendo sectores abastecidos por pozos. La zona que es abastecida por el pozo Lourdes se recorta y se incorpora a la zona de La Vitoria. El sector abastecido por pozos Morros Blancos también

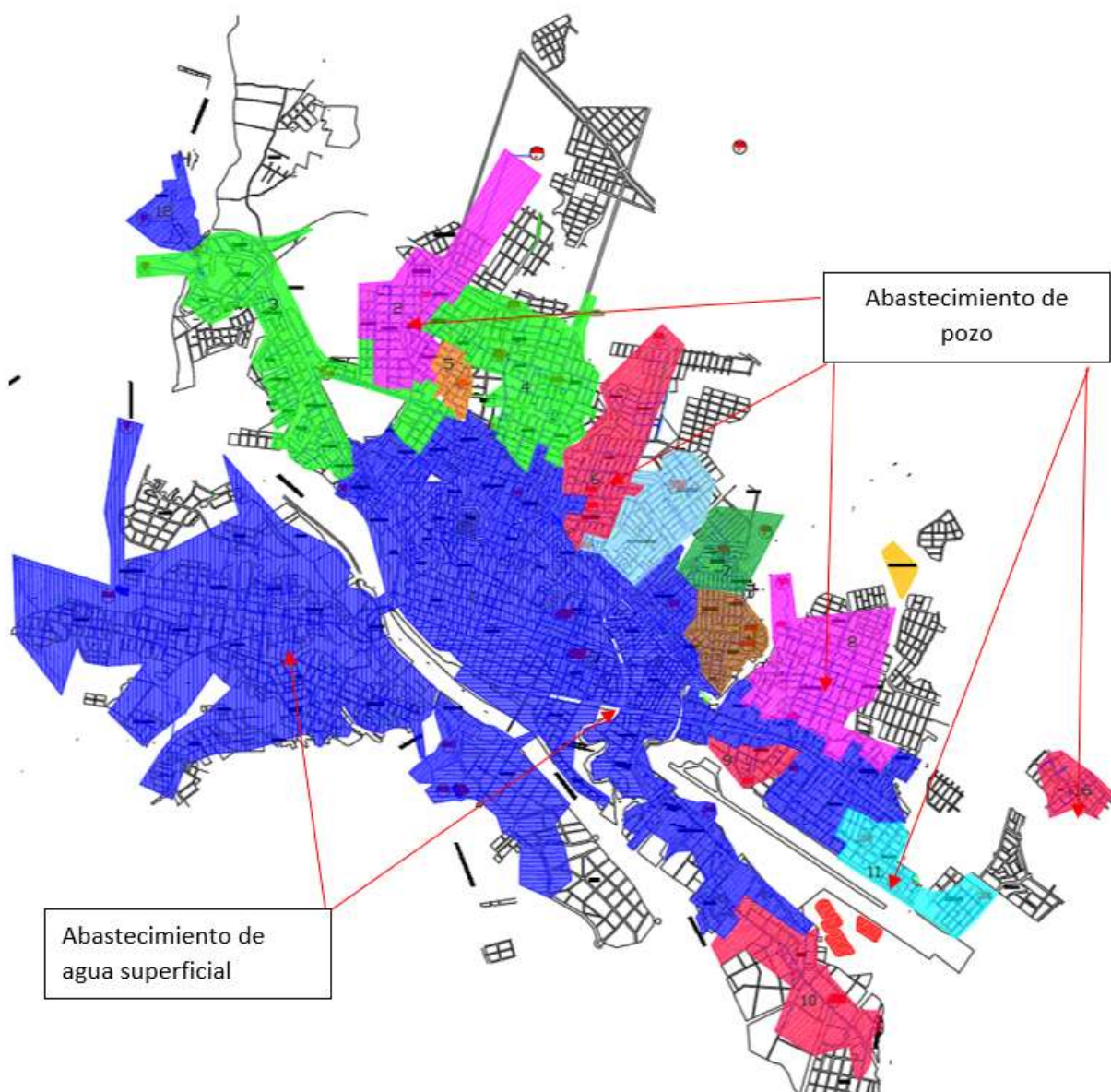
reduce su área, manteniendo en funcionamiento los dos pozos mezclando el agua con La Vitoria. El pozo Narciso Campero se suspende, igual que los pozos Simón bolívar, San Jacinto A y B, FAB, Villa Fátima y Guadalquivir; se mantienen operando con reducción de horario los pozos Aeropuerto A y B, San Jorge II y Pedro Antonio Flores. Durante la época de lluvias también se suspende el bombeo desde la Estación Las Tipas.

Por lo tanto, se definen dos sistemas hídricos de distribución estacionales:

- Sistema hídrico de distribución época húmeda
- Sistema hídrico de distribución época seca

Figura 12

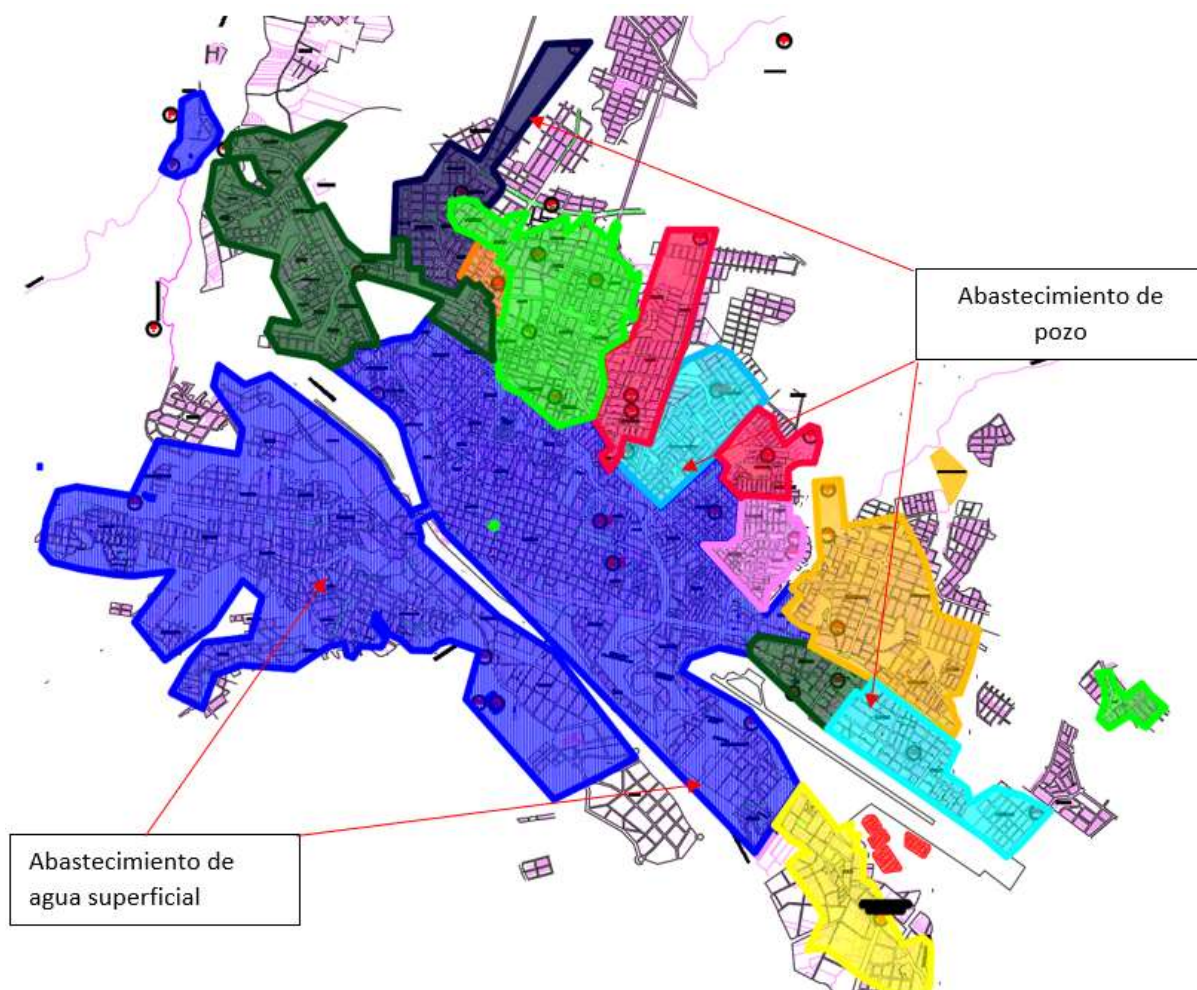
Sistema de distribución en época húmeda.



Nota. Extraído de informe de COSAALT R.L.

Figura 13

Sistema de distribución en época seca.



Nota. Extraído de informe de COSAALT R.L.

3.5. Inventario de usos y demandas de agua para los sistemas hídricos definidos y consensuados

Considerando los 4 sistemas hídricos de abastecimiento superficial y subsuperficial de agua, y adicionalmente el sistema hídrico de abastecimiento de agua subterránea, se detalla a continuación las diferentes demandas que deben ser consideradas en cada uno y la incidencia en la disponibilidad de agua para consumo humano.

3.5.1. *Demanda de agua para consumo humano*

El sistema tarifario que aplica COSAALT R.L. está desglosado para las categorías siguientes:

Tabla 8

Clasificación por tipo de usuario de COSAALT R.L.

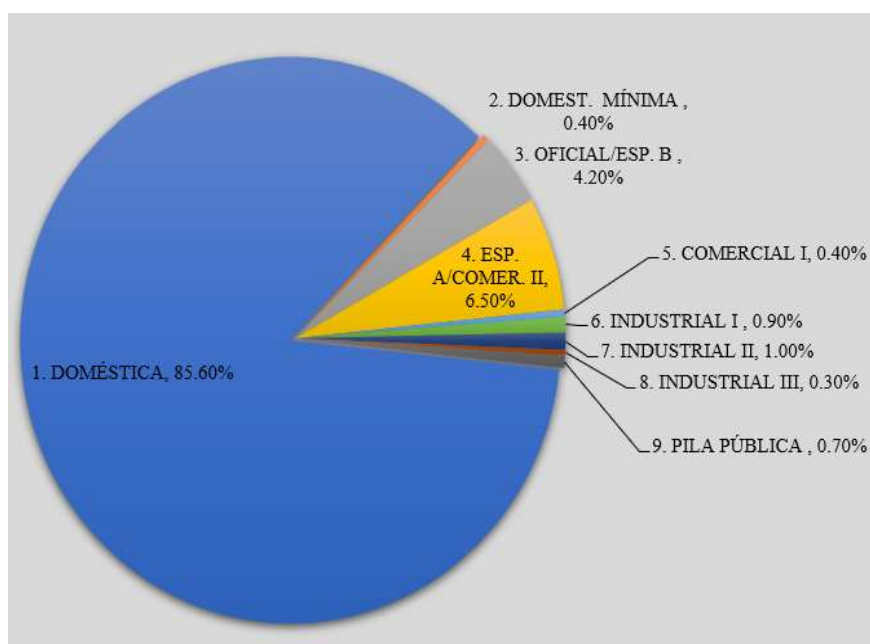
Categoría	Descripción
1 – Doméstica	Usuarios cuyo predio se describe como usuarios que utilizan el servicio para satisfacer las necesidades domésticas de sus núcleos familiares.
2 – Doméstica mínima	Usuarios con servicio clausurado (servicio cortado) o que, sin tenerlo, cuentan con la red matriz por el frontis donde se encuentran ubicados los inmuebles.
3 – Oficial (Especial B)	Usuarios cuyo predio se describe como oficinas públicas, clínicas dentales, consultorios médicos, albergues de huérfanos, asilos de ancianos y hospital general.
4 – Especial (Comercial II)	Usuarios cuyo predio se describe como dependencias de la universidad, caja nacional de salud (CNS) y oficinas de CODETAR, hoteles, residenciales y alojamientos.
5 – Comercial	Usuarios en cuyo predio se establecen almacenes, piscinas, saunas, curtiembres, pensiones, oficinas profesionales, bancos, teatros y cines. Locales comerciales.
6 – Industrial I	Usuarios cuyo predio se usa para el desarrollo de una actividad industrial como fábricas de hielo, de gaseosas, de mosaicos, bodegas y destilerías, estaciones de servicio y empresas constructoras.
7 – Industrial II	
8 – Industrial III	
9 – Pila pública	Usuarios que tienen servicios comunitarios que no cuentan con instalaciones propias.

Nota. Elaboración propia, en base a la información proporcionada por COSAALT R.L.

A partir de estos datos del escenario base, se prevé que el consumo se vaya reduciendo a lo largo del tiempo de 136 a 131 en 2036. El detalle de la distribución porcentual de consumo clasificado por tipo de usuario, donde se observa que el consumo predominante es el doméstico con el 85.6%, le sigue el tipo de usuarios Especial A/Comercial II con 6.5%, luego el usuario tipo Oficial/Especial B con 4.2%.

Figura 14

Distribución porcentual del consumo por tipo - Tarija.



Nota. Elaboración propia en base del plan maestro metropolitano para los municipios de Cercado, Uriondo, y Méndez

3.5.1.1. Área de servicio actual

Para el Municipios de Tarija, el área de servicio se ha determinado en función de las zonas de cobertura actual para cada sistema. En la Tabla siguiente se presenta el área que el operador está cubriendo en cada servicio.

Tabla 9

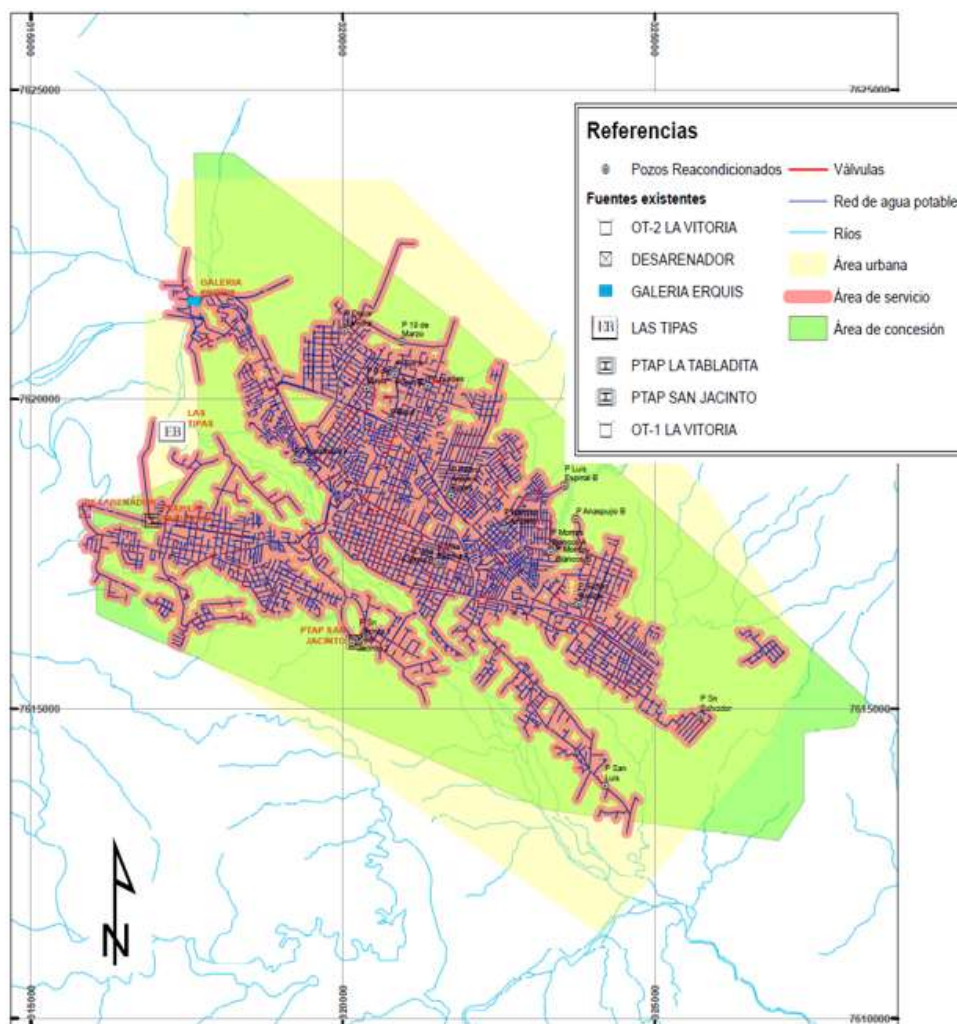
Área cubierta con los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario en la ciudad de Tarija.

Municipio	Área de Servicio (Ha)	
	Agua Potable	Alcantarillado
Tarija	4.187	3.702

Nota. Extraído de informe de COSAALT R.L.

Figura 15

Área de servicio de agua potable actual - Tarija.



Nota. Elaboración propia.

3.5.2. Volúmenes de demanda por fuente

Considerando los tres tipos de fuentes que se tienen en actual explotación en la ciudad de Tarija

Fuentes superficiales:

- Rincón de la Vitoria
- Las Tipas

Fuentes Subsuperficiales:

- Rincón de la Vitoria
- Erquis
- Álamos

Fuente subterráneas:

- 53 pozos de los cuales se encuentran en operación 49

3.5.3. Volúmenes captados por tipo de fuente del periodo 2019-2023

Considerando los reportes enviados de manera semestral a la AAPS se realizó la sistematización y cálculo de los volúmenes generados por tipo de fuente.

Tabla 10

Volúmenes de captación superficial del periodo 2019 - 2023.

Nº	Mes	Captación superficial m ³				
		2019	2020	2021	2022	2023
1	ENERO	907,093.73	902,963.64	873,254.82	845,463.74	855,882.72

2	FEBRERO	819,383.04	849,348.29	778,425.98	768,845.95	746,105.47
3	MARZO	906,406.45	891,532.22	891,237.60	859,364.64	852,561.50
4	ABRIL	797,376.96	862,674.35	846,780.48	813,421.44	871,430.40
5	MAYO	871,497.79	848,196.97	862,846.56	825,188.26	867,373.06
6	JUNIO	761,711.04	793,331.33	785,505.60	592,608.96	758,082.24
7	JULIO	636,836.26	671,585.44	765,873.79	487,656.29	510,610.18
8	AGOSTO	669,640.61	661,797.00	784,101.60	384,315.84	453,911.04
9	SEPTIEMBRE	597,801.60	618,993.21	697,896.00	292,870.08	377,058.24
10	OCTUBRE	584,045.57	624,416.25	702,330.05	379,582.85	378,377.57
11	NOVIEMBRE	666,671.04	566,532.00	707,279.04	309,018.24	343,932.48
12	DICIEMBRE	863,114.40	739,085.47	769,690.95	652,002.91	737,711.71
ANUAL		9,081,578.48	9,030,456.17	9,465,222.47	7,210,339.20	7,753,036.61

Nota. Elaboración propia, en base a la información proporcionada por COSAALT R.L.

Tabla 11

Volúmenes de captación subsuperficial del periodo 2019 - 2023.

Nº	MES	Captación sub subsuperficial m ³				
		2019	2020	2021	2022	2023
1	ENERO	96,881.29	48,233.00	80,441.74	89,079.41	198,676.80
2	FEBRERO	78,353.53	56,593.48	86,922.83	13,879.62	60,264.00
3	MARZO	102,322.55	82,956.74	100,105.81	64,103.26	131,803.20
4	ABRIL	98,054.11	83,165.76	54,227.30	70,352.64	76,075.20
5	MAYO	173,275.20	85,266.00	58,253.54	73,499.69	77,941.44
6	JUNIO	175,606.56	81,984.96	64,906.06	215,948.74	157,237.20
7	JULIO	162,732.49	82,725.62	61,146.83	439,329.24	253,578.82
8	AGOSTO	102,766.25	82,581.70	121,177.51	444,180.82	368,139.17

9	SEPTIEMBRE	158,960.52	20,550.02	127,029.60	445,767.33	381,764.16
10	OCTUBRE	161,750.77	84,124.04	66,992.40	448,319.34	396,520.27
11	NOVIEMBRE	145,384.42	98,191.33	55,073.84	407,574.80	381,542.40
12	DICIEMBRE	137,137.54	92,210.69	53,994.67	230,288.98	165,104.35
ANUAL		1,593,225.23	898,583.35	930,272.13	2,942,323.86	2,648,647.01

Nota. Elaboración propia, en base a la información proporcionada por COSAALT R.L.

Tabla 12

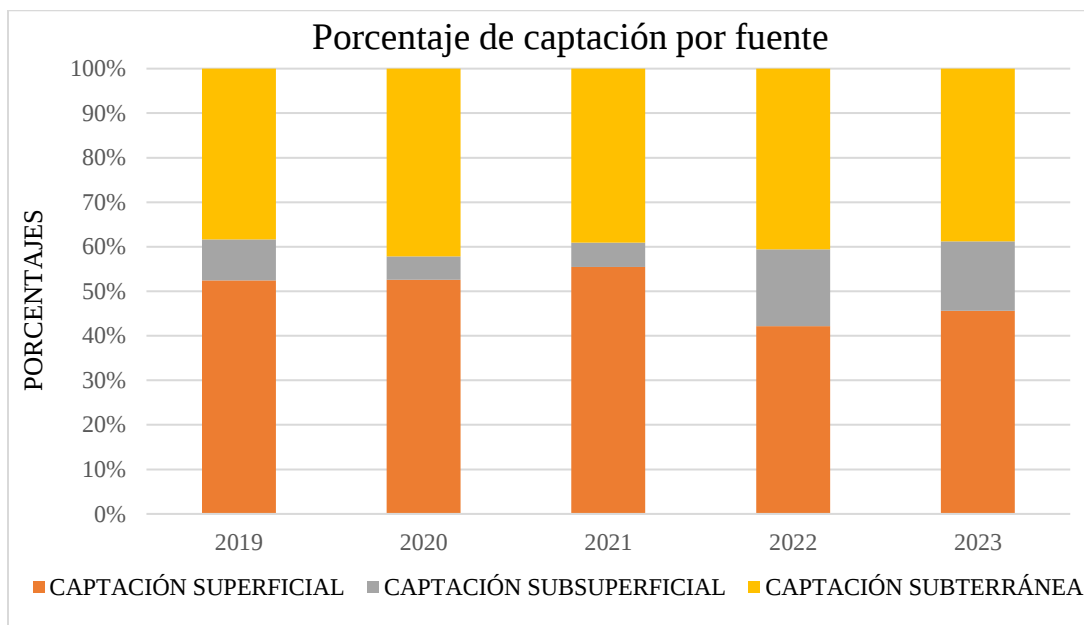
Resumen de los volúmenes de captación por tipo de fuente del periodo 2019 – 2023.

FUENTE	2019	2020	2021	2022	2023
Captación superficial	9,081,578.48	9,030,456.17	9,465,222.47	7,210,339.20	7,753,036.61
Captación subsuperficial	1,593,225.23	898,583.35	930,272.13	2,942,323.86	2,648,647.01
Captación subterránea	6,654,332.45	7,243,809.51	6,674,260.17	6,944,137.86	6,586,513.04
Total m ³	17,329,136.16	17,172,849.04	17,069,754.77	17,096,800.92	16,988,196.66

Nota. Elaboración propia, en base a la información proporcionada por COSAALT R.L.

Figura 16

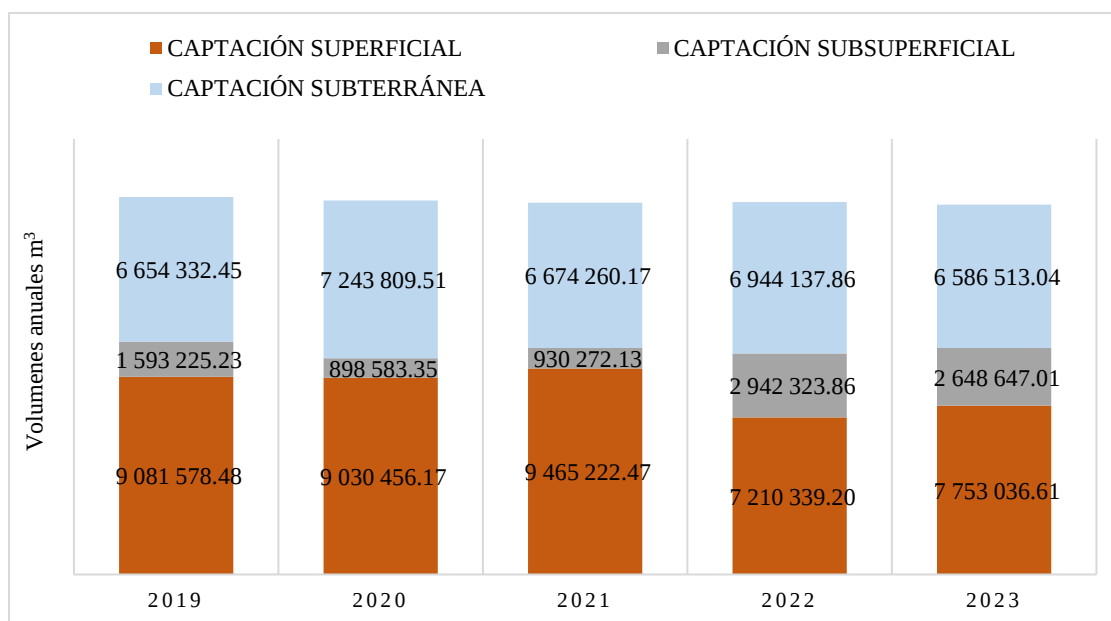
Porcentaje de volúmenes de captación por tipo de fuente.



Nota. Elaboración propia, en base a la información proporcionada por COSAALT R.L.

Figura 17

Volúmenes de captación por tipo de fuente.



Nota. Elaboración propia, en base a la información proporcionada por COSAALT R.L.

A pesar del relativo buen funcionamiento de las obras de captación y conducción desde el río La Vitoria, y que se encuentra funcionando a plena capacidad durante la época de lluvias, las necesidades superan dicha capacidad y esto trasciende en el incremento de los costos de producción de agua a partir de otras fuentes, sea esto en época de estiaje como en época de lluvias. Adicionalmente también se tiene la limitante con la capacidad de tratamiento en la planta Tabladita.

En síntesis, la capacidad para lo cual fue diseñada esta fuente de producción y conducción, ya ha sido superada por la demanda; aunque se tenga potencial en el río durante la época de lluvia. En tal sentido, se debe considerar la evaluación de incrementar la capacidad de conducción mediante la incorporación de otra línea para conducción en época de lluvias.

3.5.4. Indicadores AAPS

La Tabla 13 presenta los indicadores del abastecimiento de agua reportados por COSAALT R.L. a la AAPS. Entre lo más destacado de esta tabla se puede apreciar el incremento del número de conexiones de 33,320 a 44,471 entre los años 2013 y 2022, respectivamente. También se puede que la cobertura se mantuvo arriba de 90% entre los años 2013 y 2022. El volumen de agua explotado de las fuentes subterráneas se en 2013 estuvo alrededor de los 6 millones de metros cúbicos, luego se incrementó cerca a los 7 millones de metros cúbicos hacia 2020, luego bajo para la gestión 2021 cerca a los 6 millones de metros cúbicos y luego se incrementó nuevamente hacia la gestión 2023, llegando a pasar los 8 millones de metros cúbicos. También se observa que el porcentaje de pérdidas fue decreciendo de 56 a 35%, entre las gestiones 2013 a 2021, respectivamente.

Tabla 13*Indicadores de abastecimiento de agua reportados por COSAALT R.L.*

Descripción	Und.	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Población Total (área de servicio autorizado)	Hab.	226,328	226,690	234,292	241,255	248,425	257,427	287,501	298,167	305,537	315,406
Población abastecida	Hab.	212,582	221,870	230,466	239,888	246,702	255,683	264,169	270,701	278,579	284,713
Habitantes por conexión de agua potable (abastecida)	Hab./conex.	6.41	6.41	6.41	6.41	6.41	6.41	6.41	6.41	6.41	6.41
Cobertura de Agua Potable	> 80%	93.93	97.87	98.37	99.43	99.31	99.32	91.88	90.79	91.18	90.27
No de conexiones totales	Conex.	33,320	34,613	35,954	37,424	38,487	39,888	41,212	42,231	43,460	44,417
Consumo	m ³	9,139,116	9,505,194	8,942,136	9,588,610	9,548,672	11,928,295	11,890,992	11,878,771	11,584,668	11,594,459
Dotación	l/hab./día	220.28	194.87	170.18	165	168.11	171.94	161.87	173.8	167.88	170.16
Volumen fuente (s) superficiales	m ³	14,568,300	10,320,953	9,444,937	9,342,195	9,711,233	11,009,152	10,674,804	11,048,805	11,297,986	10,165,474
Volumen fuente (s) subterráneas	m ³	6,388,153	6,396,902	5,891,317	6,016,690	6,435,782	6,806,579	6,654,333	7,243,810	6,674,260	8,575,945
Volumen PTAP	m ³	9,502,799	9,384,186	8,424,410	8,420,839	8,702,107	9,239,786	9,107,549	9,055,782	10,395,495	9,107,552
Capacidad PTAP	m ³ /h	1,152	1,152	1,152	1,152	1,152	1,152	1,152	1,152	1,152	1,152
Volumen Agua	m ³	20,956,453	16,717,855	15,336,254	15,358,885	16,147,015	17,815,731	17,329,137	18,292,615	17,972,246	18,741,419
Porcentaje de pérdidas	%	56.39	43.14	41.69	37.57	40.86	33.05	31.38	35.06	35.54	38.13
Porcentaje de agua superficial	%	69.52	61.74	61.59	60.83	60.14	61.79	61.60	60.40	62.86	54.24
Porcentaje de agua subterránea	%	30.48	38.26	38.41	39.17	39.86	38.21	38.40	39.60	37.14	45.76

Nota. Extraído de (AAPS, 2022) (AAPS, 2021) (AAPS, 2020) (AAPS, 2019) (AAPS, 2018) (AAPS, 2017) (AAPS, 2016) (AAPS, 2015) (AAPS, 2014) (AAPS, 2013)

3.6. Inventario y características de la red de monitoreo de cantidad y calidad actual de COSAALT R.L.

En virtud de la visita realizada a la red de monitoreo de calidad y cantidad de agua se detallan a continuación los puntos de monitoreo con que cuenta la actual red y las características de los equipos fijos y móviles que se utilizan.

3.6.1. Monitoreo de cantidad de agua

Para el control de la cantidad de agua, se tiene instalada una regla metálica ubicada en el canal de hormigón ciclópeo, ubicado aguas debajo de una cámara de desfogue, que permite la regulación del caudal que ingresa de las tres tomas de agua del Rincón de la Vitoria. Este control se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas:

Geográficas: 21°32'27.14"S; 64°50'0.34"O

UTM: 310125.00 m E; 7616875.00 m S; Zona 20 K

Figura 18

Ubicación del punto de monitoreo de cantidad de agua en el rincón de la Vitoria.



Nota. Elaboración propia.

La medición se realiza de manera manual y una vez al día y también cuando se verifica que se presenta un incremento del caudal. La regleta está en centímetros y el operador encargado de la medición comunica vía telefónica la altura del nivel de agua.

El canal tiene una capacidad de transporte máxima de 342 l/s, y tiene una cámara que permite la regulación del mismo, mediante una válvula del tipo mariposa.

Figura 19

Ingresa a la cámara de rebalse y monitoreo de cantidad de agua.



Nota. Elaboración propia.

Figura 20

Válvula utilizada para la regulación del caudal de circulación del canal del Rincón de la Vitoria.



Nota. Elaboración propia.

Figura 21

Regleta de medición en centímetros para el monitoreo de la cantidad de agua captada del Rincón de la Vitoria.



Nota. Elaboración propia.

El canal es rectangular, revestido de hormigón y con una sección de 54 cm de ancho y 90 cm de alto. Se realiza un control del tirante de despacho del canal de la Vitoria y también del canal de ingreso al desarenador de la PTAP de Tabladita.

Figura 22

Llegada del canal del Rincón de la Victoria al desarenador de la PTAP Tabladita.



Nota. Elaboración propia.

De la misma manera se realiza el control por parte del operador, el registro es manual y se realiza el control diario o en caso de que se reciba alguna modificación del despacho por parte del encargado en el Rincón de la Vitoria.

Figura 23

Ingreso del caudal del Rincón de la Vitoria al desarenador previo a la PTAP de Tabladita.



Nota. Elaboración propia.

Figura 24

Desarenador ubicado en el bosquecillo de Alto Senac.



Nota. Elaboración propia.

Figura 25

Medidor del tirante a la llegada a la PTAP de Tabladita y planilla de relación Tirante-Caudal.



Nota. Elaboración propia.

3.6.1.1. Resumen del monitoreo de cantidad de agua.

La actual red de monitoreo de cantidad de agua por parte de COSAALT RL, está compuesta por dos puntos de monitoreo:

- El canal de despacho de agua del Rincón de la Vitoria
- El canal de ingreso al desarenador antes de la PTAP de Tabladita
- Ingreso a la PTAP de Tabladita

El control se realiza una vez al día de manera manual, mediante la medición de regletas con una escala en centímetros, instaladas en los dos puntos del canal rectangular y al ingreso a la PTAP.

Para el caso del aprovechamiento de las aguas subterráneas, en los 53 pozos de observación, se realiza el control manual de las horas de bombeo de cada uno de los pozos en operación.

De manera periódica se realiza un control mediante un medidor de caudal ultrasónico para determinar el caudal de bombeo de las bombas instaladas en los pozos y de manera indirecta se determina el volumen de bombeo mensual.

3.6.2. Resultados del monitoreo de calidad de agua

El monitoreo de calidad de agua en COSAALT, está a cargo del:

- Departamento de control de calidad, cuyo responsable es el Ing. Enrique Ayarde.
- Departamento de producción y tratamiento, a cargo del Ing. Pedro Almazán.

Para el caso del departamento de control de calidad, el monitoreo es realizado de manera trimestral, o semestral en virtud del cronograma que es elaborado por el responsable del departamento.

Las muestras son recolectadas en los diferentes puntos de monitoreo y llevadas al laboratorio de COSAALT.

El detalle del monitoreo de calidad de agua realizados por el departamento de control de calidad se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 14

Detalle del monitoreo de calidad de agua a cargo del departamento de control de calidad.

Nº	Punto de monitoreo	Parámetros	Periodicidad
----	--------------------	------------	--------------

Rincón de la Vitoria			
1	A la altura de la obra de toma directa.	Básicos - NB 512	Cada 3 meses
2	Cárcamo de bombeo Erquis	Básicos – NB 512	Cada 3 meses
3	Cárcamo de bombeo Álamos	Básicos – NB 512	Cada 3 meses
4	Cárcamo de bombeo Las Tipas	Básicos – NB 512	Cada 3 meses
5	Red de distribución. Colegios y mercados (30 muestras)	Básicos – NB 512	Cada 3 meses
6	53 pozos en operación	Básicos– NB 512	Cada 3 meses
7	Agua cruda y agua tratada en la PTAP de Tabladita	Mínimos	Diario

Nota. Elaboración propia, en base a la información proporcionada por COSAALT R.L.

El departamento de producción realiza el monitoreo de calidad de agua en la planta de tratamiento de agua potable de Tabladita, realizando un control según el siguiente detalle:

Tabla 15

Detalle del monitoreo de calidad de agua a cargo del departamento de producción.

Nº	Punto de monitoreo	Parámetros	Periodicidad
1	A la salida de la planta de tratamiento, en el tanque de almacenamiento	PH, conductividad, turbidez, oxígeno disuelto, cloro residual	Cada 3 horas en periodo seco
2	A la salida de la planta de tratamiento, en el tanque de almacenamiento	PH, conductividad, turbidez, oxígeno disuelto, cloro residual	Cada 1 hora en periodo de lluvias

Nota. Elaboración propia, en base a la información proporcionada por COSAALT R.L.

Figura 26

Ingreso de agua a la planta de tratamiento de Tabladita.



Nota. Elaboración propia.

Figura 27

Tanque de almacenamiento de agua tratada de la PTAP.



Nota. Elaboración propia.

3.6.3. Equipos móviles disponibles para el monitoreo

Para el monitoreo de cantidad de agua se cuenta con el siguiente stock de equipos móviles:

Tabla 16

Equipo móvil utilizado para el monitoreo de cantidad de agua.

No	Equipo	Marca	Aplicación
1	Medidor de caudal en tuberías ultrasónico	PCE	Medición del caudal de bombeo en los 4 cárcamos de bombeo y los 53 pozos en operación
2	Molinete con hélice	OTT	Aforo de los caudales superficiales en el Rincón de la Vitoria

Nota. Elaboración propia, en base a la información proporcionada por COSAALT R.L.

Para el monitoreo de la calidad de agua, se utiliza el siguiente equipo móvil:

Tabla 17

Equipo móvil utilizado para el monitoreo de calidad de agua.

No	Equipo	Marca	Aplicación
1	Multiparamétrico	ORION	Medición del pH, conductividad y temperatura
2	Turbidímetro	LaMotte	Medición de la turbidez
3	Comparador de cloro	Hanna	Medición del cloro residual
4	Medidor de pH (2 unidades)	OAKION CAMBO	Medición del pH

Nota. Elaboración propia, en base a la información proporcionada por COSAALT R.L.

Figura 28

Multiparamétrico ORION.



Nota. Elaboración propia.

Figura 29

Turbidímetro Lamotte.



Nota. Elaboración propia

Figura 30

Medidor de pH.



Nota. Elaboración propia.

Figura 31

Comparador HANNA.



Nota. Elaboración propia.

3.7. Gestión de las bases de datos

Todos los registros tanto para la medición de los parámetros de cantidad y calidad de agua se realizan de manera manual.

La base de datos está en hojas Excel donde se tiene el detalle de las mediciones. No se cuenta con un software para el procesamiento y análisis de la información.

La crítica de datos se realiza de manera visual, por el encargado sin la aplicación una metodología estándar estadística o gráfica. El análisis es realizado por medio de tablas y gráficas en Excel.

Figura 32

Planillas para el registro del monitoreo de calidad de agua en la PTAP de Tabladita.

[illegible]

Nota. Elaboración propia.

3.8. Conclusión sobre el estado actual de la red fija

3.8.1. Red de monitoreo de cantidad de agua

El control de cantidad de agua es realizado en 3 puntos:

- En el canal de despacho en el Rincón de la Vitoria
- En el canal de ingreso al desarenador antes de la PTAP
- Al ingreso de la PTAP (antes de la mezcla rápida)

El control es realizado mediante regletas instaladas en una de las paredes del canal y con la ayuda de una planilla de relación tirante-caudal se realiza el monitoreo de la cantidad de agua que circula por la sección.

El operador del Rincón de la Vitoria vía telefónica comunica el tirante de despacho y eso permite que en la PTAP se realice los preparativos para el correspondiente tratamiento.

Se evidencia la necesidad de construir puntos de monitoreo fijo y realizar la calibración de los mismos, para tener el dato de la cantidad de agua con mayor precisión y así mejorar la eficiencia de tratamiento y por ende mayores volúmenes de producción.

3.8.2. Red de monitoreo de calidad de agua

No se cuenta con equipo fijo de calidad de agua instalado. Esto afecta considerablemente a la eficiencia del tratamiento en la PTAP.

En el canal de despacho y por vía telefónica se realiza una descripción de la calidad del agua en función de su turbiedad, o en la mayoría de los casos solo se avisa que se presentó una crecida o llegada del río, para que el personal de la PTAP se prepare para recibir agua con alto contenido de sedimentos.

3.8.3. Conclusiones sobre el estado de la red de monitoreo móvil

Con referencia al equipo de monitoreo móvil, se evidencia que el mismo se encuentra operable pero no en las condiciones óptimas. El multiparamétrico no cuenta con el sensor o electrodo de oxígeno disuelto, por lo que no puede realizar la medición de este parámetro. Casi todo el equipamiento disponible tiene más de 15 años de uso, lo que genera variaciones en las mediciones.

Al contar con poco equipo móvil y por las distancias de aproximadamente 20 km a la fuente principal, y el tamaño de la red de distribución, es bastante difícil realizar un monitoreo adecuado. Es necesario fortalecer la disponibilidad de equipo móvil para mejorar el monitoreo de calidad de agua.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS DE LAS CAMPAÑAS DE MONITOREO DE CALIDAD Y CANTIDAD DE AGUA EN LA ZONA LAS TIPAS

4.1. Fundamentos del monitoreo de aforo y calidad del agua en la zona de Las Tipas

El monitoreo del agua en la zona de Las Tipas tiene como objetivo fundamental determinar los rangos de variación en la cantidad y calidad del recurso hídrico disponible para su aprovechamiento, particularmente para el consumo humano. En esta región, resulta crucial implementar un sistema de monitoreo que permita registrar en tiempo real las fluctuaciones tanto en el caudal de los cuerpos de agua superficiales como en los parámetros clave de la calidad del agua, tales como la turbidez, el pH y la concentración de sólidos disueltos, entre otros. Este sistema no solo garantiza una gestión más eficiente del recurso hídrico, sino que también permite reaccionar de manera oportuna ante cualquier alteración en sus condiciones, asegurando el cumplimiento de los estándares de potabilidad.

4.1.1. *Establecimiento de una línea base*

Las 9 campañas de monitoreo realizadas han permitido obtener datos detallados sobre las condiciones actuales del agua durante el periodo de estudio, bajo diversas condiciones climáticas y operativas. Estos datos constituyen una línea base fundamental para evaluar las fluctuaciones naturales en la calidad y cantidad del agua en la zona. El análisis de esta información es esencial para identificar variaciones significativas y posibles anomalías, las cuales el sistema de monitoreo continuo deberá detectar de manera oportuna.

4.1.2. *Identificación de variaciones temporales y espaciales.*

A través de los datos recolectados durante las campañas, es posible observar cómo varían la calidad y cantidad del agua a lo largo del tiempo, particularmente durante eventos

específicos como la temporada de lluvias. Esta información es vital para establecer umbrales y criterios de alarma en el sistema de monitoreo continuo, anticipando problemas como el aumento de la turbidez, la disminución de caudales o los cambios en parámetros críticos, como el pH y la conductividad.

4.1.3. *Justificación Técnica y Económica*

Los resultados obtenidos de las campañas permiten justificar técnica y económicamente la implementación de un sistema de monitoreo continuo. Los datos demuestran la importancia de disponer de información en tiempo real, lo cual supera las limitaciones de los monitoreos puntuales y tiene un impacto directo en las decisiones de inversión en tecnología y equipos adecuados para garantizar un control más eficiente y preciso del recurso hídrico.

4.1.4. *Evaluación de las Normativas*

Los resultados de las campañas también permiten comparar los parámetros medidos con las normativas nacionales, como la NB 512 para la calidad del agua y la NB 496 para la toma de muestras. Esta evaluación facilita la definición de los límites que el sistema de monitoreo continuo deberá cumplir para garantizar el cumplimiento de las normativas vigentes, o en su caso, realizar los ajustes necesarios para asegurar que el agua monitoreada mantenga los estándares de calidad establecidos.

4.2. *Determinación de los parámetros de calidad del agua*

La manera más sencilla y práctica de estimar la calidad del agua consiste en la definición de índices o relaciones de las medidas de determinados parámetros físicos, químicos o biológicos en la situación real y en otra situación que se considere admisible o deseable y que se encuentra definida por ciertos estándares o criterios. El cálculo de los

límites permite llegar a diferentes clasificaciones de calidad de agua de acuerdo al uso específico al que se le destine.

4.2.1. *Parámetros físicos*

Los parámetros físicos de la calidad del agua son características medibles que describen su estado físico y su aptitud para diversos usos, como el consumo humano, riego o recreación. Estos parámetros no solo proporcionan información sobre las condiciones ambientales del cuerpo de agua, sino que también son indicadores clave de posibles contaminantes o alteraciones en su calidad.

La estimación de los parámetros físicos del agua implica medir características como pH, turbidez, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, oxígeno disuelto. A continuación, se describen los enfoques comunes para estimar estos parámetros:

- Uso de equipos portátiles; permiten una medición rápida en campo.
- Análisis en laboratorio; se realiza mediante la toma de una muestra representativa y los parámetros físicos son medidos en un laboratorio, los resultados presentan una alta precisión.
- Sensores automáticos; mediante el uso de estaciones multiparamétricas que incluyen sensores que permiten el monitoreo continuo y en tiempo real a largo plazo, los resultados son ideales para el uso de investigación o gestión hídrica.
- Métodos indirectos; útiles en áreas remotas o donde no hay acceso directo donde se usan imágenes satelitales en cuerpos grandes de agua y los modelos

matemáticos que relacionan variables ambientales con parámetros físicos del agua.

4.2.2. Parámetros químicos

Los parámetros químicos del agua se refieren a la concentración de sustancias químicas presentes en un cuerpo de agua, que pueden ser de origen natural o resultado de actividades humanas. Entre los componentes naturales destacan los minerales, gases disueltos y compuestos orgánicos derivados de la separación de materia vegetal y animal. Por otro lado, las actividades antropogénicas introducen contaminantes como metales pesados, pesticidas, productos químicos industriales, nutrientes agrícolas (nitratos y fosfatos) y contaminantes orgánicos persistentes (COPs), los cuales representan riesgos significativos tanto para la salud humana como para los ecosistemas acuáticos.

Entre los parámetros claves para el análisis químico del agua se encuentran:

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): Indica la cantidad de oxígeno consumido en la revisión de materia orgánica.
- Demanda Química de Oxígeno (DQO): Mide el oxígeno necesario para oxidar tanto compuestos orgánicos como inorgánicos.
- Nutrientes (nitratos y fosfatos): Relacionados con la eutrofización en cuerpos de agua.
- Metales pesados (plomo, mercurio, cadmio): Tóxicos incluso en concentraciones mínimas.
- Pesticidas y contaminantes orgánicos persistentes (COP): Representan un peligro por su toxicidad y capacidad de bioacumulación.

La medición de parámetros como la DBO5 y la DQO permite evaluar el grado de contaminación orgánica, mientras que la detección de metales pesados, pesticidas y nutrientes identifica riesgos tóxicos y problemas ecológicos específicos. Estas evaluaciones no solo garantizan el cumplimiento de normativas internacionales, sino que también son esenciales para el diseño e implementación de estrategias de gestión sostenible del agua.

Dado que estos análisis requieren un alto grado de sensibilidad, precisión y técnicas avanzadas, es imprescindible realizarlos en laboratorios especializados. Esto asegura la confiabilidad de los resultados, especialmente cuando se trata de agua destinada al consumo humano, donde la calidad química es crucial para la salud y el bienestar.

4.2.3. *Parámetros biológicos*

Los parámetros biológicos hacen referencia a la presencia de microorganismos que pueden representar un riesgo para la salud humana y los ecosistemas. Estos incluyen bacterias, virus, protozoos y otros organismos capaces de transmitir enfermedades como el cólera, la fiebre tifoidea, diversas gastroenteritis y la hepatitis, entre otras. En países en vías de desarrollo, las enfermedades causadas por estos agentes patógenos constituyen una de las principales causas de mortalidad prematura, especialmente en niños, debido a la falta de acceso a agua potable y saneamiento adecuado.

La contaminación biológica del agua ocurre generalmente por la introducción de materia fecal y otros desechos orgánicos provenientes de personas y animales. Este tipo de contaminación es particularmente preocupante porque puede propagarse rápidamente en comunidades vulnerables, exacerbando problemas de salud pública. Por esta razón, uno de los indicadores más utilizados para evaluar la calidad microbiológica del agua es la

concentración de bacterias coliformes, las cuales sirven como marcadores indirectos de contaminación fecal.

Para el análisis microbiológico de agua se recurre a un laboratorio certificado y mediante procesos como; la filtración por membrana, métodos del número más probable (NMP), métodos moleculares. Los resultados de estas pruebas se utilizan para determinar la calidad microbiológica del agua y para identificar cualquier contaminación presente.

4.3. Clasificación y aforo de caudales

El aforo líquido es un procedimiento técnico que consiste en tomar mediciones sobre cauce que permitan calcular el caudal del mismo. En la presente sección se desarrolla una metodología que comprende el inventario de los equipos y materiales utilizados, las características que debe cumplir la sección de aforo, el tipo de aforo, el método para el cálculo del caudal y la logística o estrategia de trabajo empleada. Esto con el fin de estandarizar el proceso, agilizar los aforos y minimizar la incertidumbre que se puede presentar durante la toma de datos.

El agua superficial es aquella que se encuentra sobre la superficie del suelo, mientras que el agua subsuperficial es aquella que se encuentra por debajo de la superficie del terreno. El agua superficial y el agua subterránea están relacionadas, ya que el agua subterránea puede aflorar a la superficie en forma de fuentes y manantiales, mientras que el agua superficial puede infiltrarse y convertirse en agua subterránea.

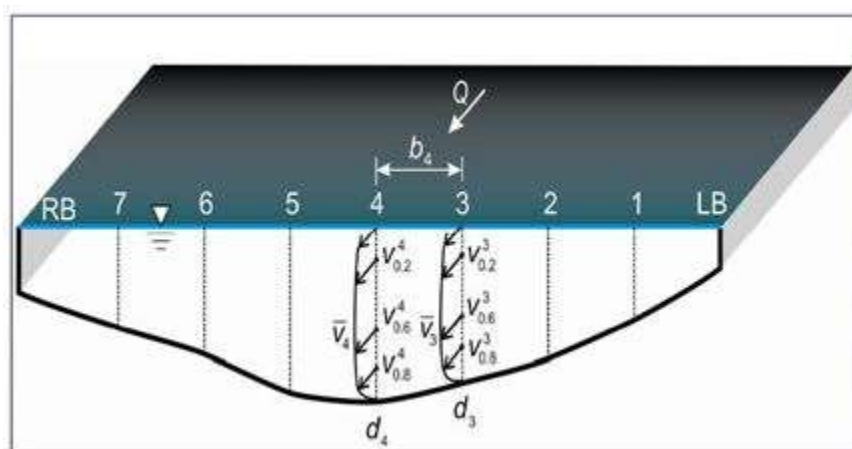
4.3.1. *Determinación del caudal mediante aforo por vadeo del agua superficial*

Este método permite realizar la medición de velocidades y obtener la geometría de la sección. Se emplea para corrientes de profundidad menor a 70 cm, con fondo fijo y resistente. Además, el flujo debe presentar velocidades que permita el ingreso de los técnicos

y de los equipos sin generar riesgos para los mismos. Para este tipo de aforos, es necesario ingresar al cuerpo de agua teniendo un eje de referencia en la abscisa, y una cuerda que marque las verticales, sobre las cuales se realizarán las mediciones. En la Figura 33 se muestra un esquema que presenta la manera en que se realiza este tipo de aforo.

Figura 33

Aforo por vadeo.



Nota. Extraído de <http://eselagua.com/2017/04/30/la-realizacion-de-aforos-un-pilar-basico-de-la-hidrometria/>

4.3.2. Métodos para determinar el caudal subsuperficial

El agua subsuperficial se refiere al agua infiltrada que se encuentra a poca profundidad debido a la percolación. Representa una de las mayores reservas de agua dulce en el planeta después de los glaciares. Este recurso puede emerger en la superficie a través de manantiales o ser extraído mediante pozos. Su monitoreo, tanto en cantidad como en calidad, es fundamental debido a la interacción entre ambos aspectos, lo que requiere análisis físico-químicos y biológicos para comprender su dinámica.

Para determinar el caudal subsuperficial en un río, se emplean diversas técnicas que analizan el intercambio entre aguas superficiales y subsuperficiales. Estas metodologías pueden ser directas o indirectas, dependiendo de los objetivos del estudio y los recursos disponibles.

4.3.2.1. Uso de gradientes hidráulicos

El método de Darcy es una herramienta fundamental en la hidrogeología, utilizada para calcular el caudal de agua a través de medios porosos saturados. Basada en los principios descritos por Henri Darcy en 1856, esta metodología supone un flujo laminar, un medio poroso homogéneo e isótropo, y considera la conductividad hidráulica como un parámetro clave para determinar la capacidad del suelo de transmitir agua. Los pasos son:

- Monitoreo de niveles de agua: Se instalan piezómetros en puntos estratégicos para medir la diferencia de niveles entre el río y el acuífero.
- Determinación de la conductividad hidráulica: Se evalúa mediante pruebas de bombeo o permeámetros in situ.

Cálculo del caudal subsuperficial: Aplicando la ecuación de Darcy:

$$Q = K * A * \frac{\Delta h}{\gamma_0}$$

Dónde:

Q: Caudal subsuperficial (m³/s)

K: Conductividad hidráulica del suelo (m/s)

A: Área de la sección transversal perpendicular al flujo (m²)

Δh : Diferencia de altura piezométrica entre dos puntos (m)

y_o : Distancia entre los puntos de medida (m)

4.3.2.2. Uso de trazadores naturales o artificiales

Este método consiste en seguir el movimiento de sustancias en el agua para estimar la interacción superficial y subsuperficial:

- Trazadores naturales: Se analizan isótopos, temperatura o conductividad eléctrica para detectar diferencias entre el agua superficial y subterránea.
- Trazadores artificiales: Se inyectan compuestos seguros como colorantes o trazadores químicos y se mide su movimiento para calcular la velocidad y dirección del flujo.

4.3.2.3. Balance hídrico local

Consiste en calcular las entradas y salidas de agua en un tramo específico:

- Entradas: Precipitaciones, flujos de entrada de aguas superficiales y subterráneas.
- Salidas: Incluyen evapotranspiración, infiltración y flujos aguas abajo. El caudal subsuperficial se estima como la diferencia entre las entradas y salidas, permitiendo un cálculo indirecto.

4.3.2.4. Modelos matemáticos y numéricos

Se utilizan softwares de simulación como para modelar la interacción entre aguas superficiales y subsuperficiales.

- MODFLOW: Modelo tridimensional para flujo en acuíferos saturados, basado en diferencias finitas.

- HIDRO: Simula el flujo no saturado considerando curvas de retención y movimiento de solutos.
- SWAT: Simula el flujo subsuperficial a escala de cuenca usando balances de agua.
- FEFLOW: Método de elementos finitos para sistemas heterogéneos y anisótropos.

Estos modelos requieren datos topográficos y características geológicas, conductividad hidráulica del suelo, definición de condiciones de frontera (cargas y descargas de agua en el sistema).

4.3.2.5. Análisis geofísico

Técnicas como la resistividad eléctrica o el georradar ayudan a identificar zonas donde ocurre el intercambio subsuperficial. Estas herramientas son útiles para mapear el flujo y la extensión de la interacción río-acuífero de manera indirecta.

En conclusión, cada método tiene ventajas y limitaciones, y la elección depende de la escala del estudio, el presupuesto disponible y la precisión requerida. En muchos casos, la combinación de varias técnicas (como trazadores con modelos numéricos) puede ofrecer resultados más confiables y detallados sobre los caudales subsuperficiales.

4.4. Descripción de las campañas de monitoreo

El desarrollo de las campañas de monitoreo de calidad y cantidad del agua se llevó a cabo con el apoyo de los técnicos del Laboratorio de Hidrosanitaria y Reúso del Agua del Centro de Investigación del Agua (CIAGUA) de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, entre enero y julio de 2024. Durante este periodo, se realizaron 9 aforos de la

cantidad de agua superficial, complementados con el análisis de los parámetros de calidad del agua en la zona de Las Tipas. Todo el proceso fue supervisado y asesorado por el director del CIAGUA, Ph.D. Ing. Moisés Perales Avilés, quien estuvo presente en cada etapa del desarrollo de las campañas.

El punto de aforo se encuentra ubicado en la zona Las Tipas sobre le rio Guadalquivir, provincia Cercado, Municipio Tarija, con las siguientes coordenadas del punto de aforo:

Tabla 18

Coordenadas del punto de medición de calidad y cantidad del agua.

Lugar	Coordenadas UTM	Coordenadas geográficas	Descripción
Las Tipas			150 metros aguas arriba
	Este:	Latitud:	- del sitio de la obra de
	317293.95 E	21.519303°	toma y estación de
	Norte:	Longitud:	- bombeo Las Tipas II
	7619346.02 N	64.763970°	sobre el Río Guadalquivir
			Tarija – Las Tipas

Nota. Elaboración propia.

Para las mediciones, se utilizaron equipos especializados, como el molinete electromagnético OTT MF pro, el perfilador acústico Doppler de corrientes ADCP Riverboat SP y el medidor multiparamétrico HANNA HI 9829. Estos instrumentos permitieron evaluar de manera precisa el estado actual del afluente, siguiendo los protocolos y metodologías recomendadas por las normativas nacionales e internacionales, lo que aseguró la fiabilidad y precisión de los datos obtenidos.

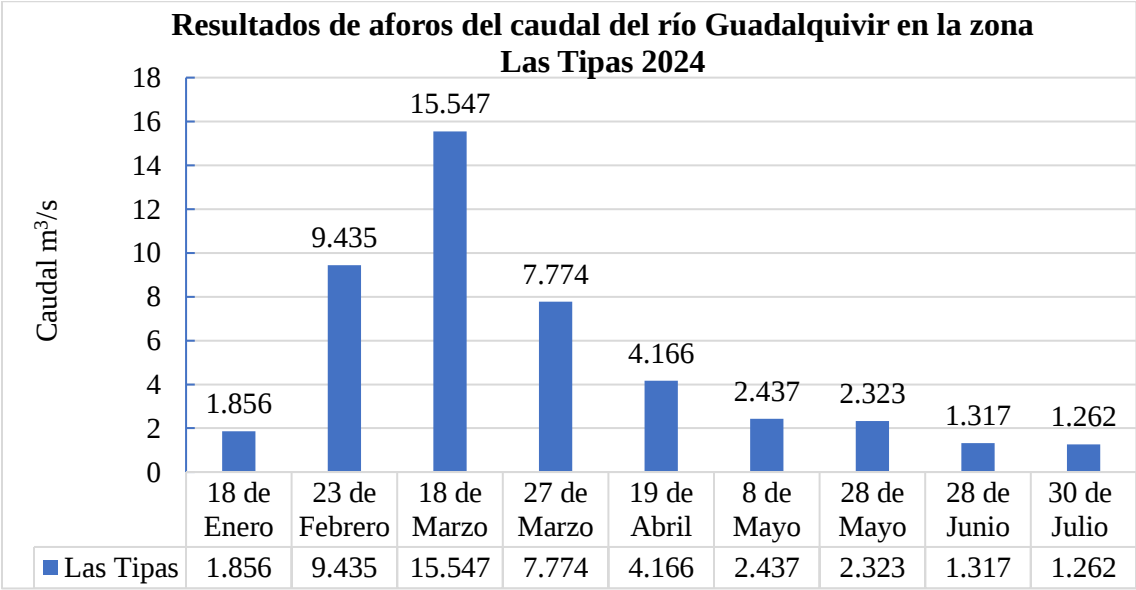
Para la estimación del caudal durante la época de lluvias, se utilizó el perfilador acústico Doppler de corrientes ADCP Riverboat SP, ya que su mayor eficiencia es adecuada para medir caudales elevados. En cambio, durante la temporada en que el río presentó un caudal bajo, se empleó el molinete electromagnético OTT MF pro, debido a su efectividad en condiciones de bajo tirante, lo que lo convierte en la opción más precisa para este tipo de mediciones.

4.5. Resultados de aforo de caudales

El monitoreo del caudal del río Guadalquivir en la zona de Las Tipas se llevó a cabo a lo largo de 9 campañas realizadas entre los meses de enero y julio de 2024. Los resultados obtenidos muestran una variación significativa en el caudal a lo largo de este periodo, lo que refleja las condiciones climáticas y los cambios estacionales como se puede observar en la Figura 33.

Figura 34

Resultados del monitoreo de las campañas de aforo.



Nota. Elaboración propia.

Estos resultados muestran la clara influencia de las precipitaciones en el caudal del río, con un pico máximo durante los meses de mayor precipitación y una disminución sostenida hacia la temporada seca. Este análisis es fundamental para la gestión del recurso hídrico, ya que permite anticipar los periodos de mayor y menor disponibilidad de agua, lo que es clave para la toma de decisiones en la planificación del uso del agua en la región.

4.6. Resultados del monitoreo de la calidad del agua y comparación con la NB 512

Durante las 9 campañas de monitoreo de la calidad del agua realizadas en la zona de Las Tipas, se midieron diversos parámetros físico-químicos claves, como la temperatura, el pH, la conductividad, la turbidez, los sólidos totales disueltos y el oxígeno disuelto. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada fecha de monitoreo y su comparación con los límites establecidos por la Norma Boliviana NB 512.

Tabla 19

Resultados de monitoreo de calidad del agua y comparación con la NB 512.

Resultados del monitoreo de calidad del agua en zona Las Tipas											
Campaña		1er	2da	3era	4ta	5ta	6ta	7ma	8va	9na	Límites
Parámetros	Unidad	18 de enero	23 de febrero	18 de marzo	27 de marzo	19 de abril	8 de mayo	28 de mayo	28 de junio	30 de julio	según NB 512
Temperatura	°C	23.03	23.03	22.3	23	17.6	20.2	17	19.51	18.1	-
pH		5.88	6.59	6.6	8.59	8.23	8.28	8.13	10.47	7.95	6.5 - 9
Conductividad	uS/cm	151.9	108	76.34	77.9	108.6	62.19	74.25	198	168	1,500
Turbiedad	UNT	25.4	220	86.1	11.8	6.9	1.5	2.4	3	1.83	5
Sólidos totales disueltos	mg/l	107	-	-	-	49	35	71	54	68	1,000
Oxígeno disuelto	mg/l	7.83	4	6.09	5.28	7.8	-	6.21	-	7.64	-

Nota. Elaboración propia.

Los resultados del monitoreo de la calidad del agua en la zona de Las Tipas muestran que, si bien la mayoría de los parámetros cumplen con los límites establecidos por la NB 512, algunos valores de pH y turbidez superaron los rangos permitidos en determinadas fechas. Estos episodios pueden estar asociados con eventos específicos, como lluvias intensas o actividades humanas en la cuenca, y deben ser tomados en cuenta para la gestión y tratamiento del recurso hídrico.

4.6.1. *Análisis de las tendencias en la calidad del agua durante las campañas*

El monitoreo de la calidad del agua en la zona de Las Tipas, realizado durante las 9 campañas entre enero y julio de 2024, muestra variaciones significativas relacionadas con las estaciones del año y las precipitaciones.

- 1) **Temperatura:** La temperatura del agua varió entre 17 °C y 23.03 °C, manteniéndose relativamente estable durante las primeras campañas, con un descenso notable en los meses de abril, mayo, y junio. Esta disminución coincide con la temporada de estiaje, cuando las temperaturas ambientales tienden a ser más bajas. Sin embargo, la variación observada no tiene un impacto significativo sobre los estándares de potabilidad, ya que la NB 512 no establece límites para la temperatura del agua.
- 2) **pH:** El pH varió entre 5.88 y 10.47, superando el límite permitido por la NB 512 (6.5-9) en enero y junio. Esto indica fluctuaciones estacionales que podrían afectar la potabilidad del agua, especialmente durante la temporada seca.
- 3) **Conductividad:** La conductividad mostró fluctuaciones a lo largo del año, con un valor máximo de 198 uS/cm en junio y un mínimo de 62.19 uS/cm

en mayo. No obstante, los valores se mantuvieron consistentemente por debajo del límite establecido por la NB 512 de 1500 uS/cm, indicando que el agua tiene baja concentración de sales disueltas. Estas fluctuaciones parecen estar vinculadas a las variaciones en el caudal, donde los niveles más altos de conductividad se registran en los meses de menor flujo de agua, lo que sugiere una mayor concentración de minerales debido a la reducción del volumen hídrico.

- 4) **Turbidez:** La turbidez presentó variaciones drásticas entre las campañas. El valor más alto se registró el 23 de febrero con 220 UNT, significativamente por encima del límite de 5 UNT estipulado por la NB 512. Este pico coincide con la temporada de lluvias, lo que sugiere que las escorrentías superficiales contribuyeron a una mayor presencia de partículas suspendidas en el agua. A medida que avanzaron los meses, la turbidez disminuyó progresivamente, alcanzando su nivel más bajo de 1.5 UNT en mayo. Esta tendencia refleja una mejora en la calidad visual del agua durante la temporada seca, cuando las precipitaciones son menores y hay menos arrastre de sedimentos.
- 5) **Sólidos Totales Disueltos (STD):** Los sólidos totales disueltos (STD) presentaron valores que variaron entre 35 mg/l y 107 mg/l, manteniéndose consistentemente por debajo del límite de 1000 mg/l de la NB 512. No se observa una tendencia clara en este parámetro, pero los valores más altos de STD se detectaron durante las campañas iniciales, lo que puede estar relacionado con el mayor caudal durante la temporada de lluvias, cuando el agua tiende a arrastrar más material disuelto.

- 6) **Oxígeno Disuelto:** El oxígeno disuelto fluctuó entre 4 mg/l y 7.83 mg/l, siendo más bajo en los meses de mayor turbidez, lo que sugiere que la carga de sedimentos afectó la capacidad de oxigenación del agua.

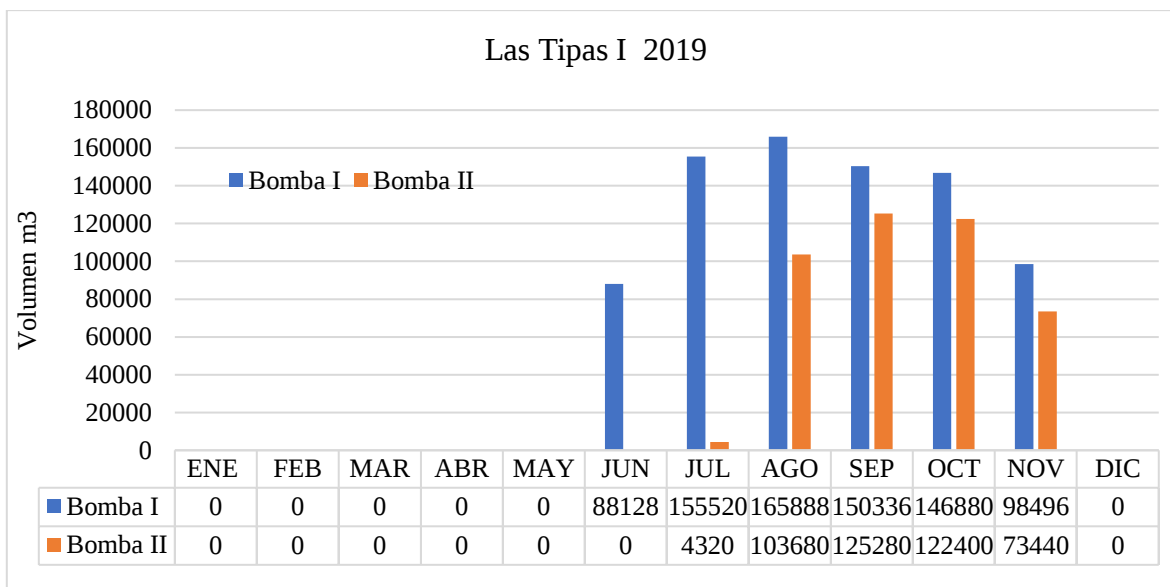
En conclusión, las variaciones en la calidad del agua están marcadamente influenciadas por las estaciones. La temporada de lluvias elevó la turbidez y afectó parámetros como el pH y el oxígeno disuelto, mientras que en el estiaje se observó una mejoría en la mayoría de los parámetros, aunque con un aumento del pH. Estos resultados subrayan la necesidad de monitoreo continuo para gestionar eficazmente el recurso hídrico y garantizar su potabilidad.

4.7. Comparación de los resultados obtenidos con datos históricos de la zona

Al comparar los resultados de las 9 campañas de monitoreo del caudal y calidad del agua en 2024 con los volúmenes históricos de agua bombeada en la zona de Las Tipas entre 2019 y 2023, se observan patrones consistentes que reflejan la relación entre la disponibilidad del recurso hídrico y su gestión a lo largo de los años.

Figura 35

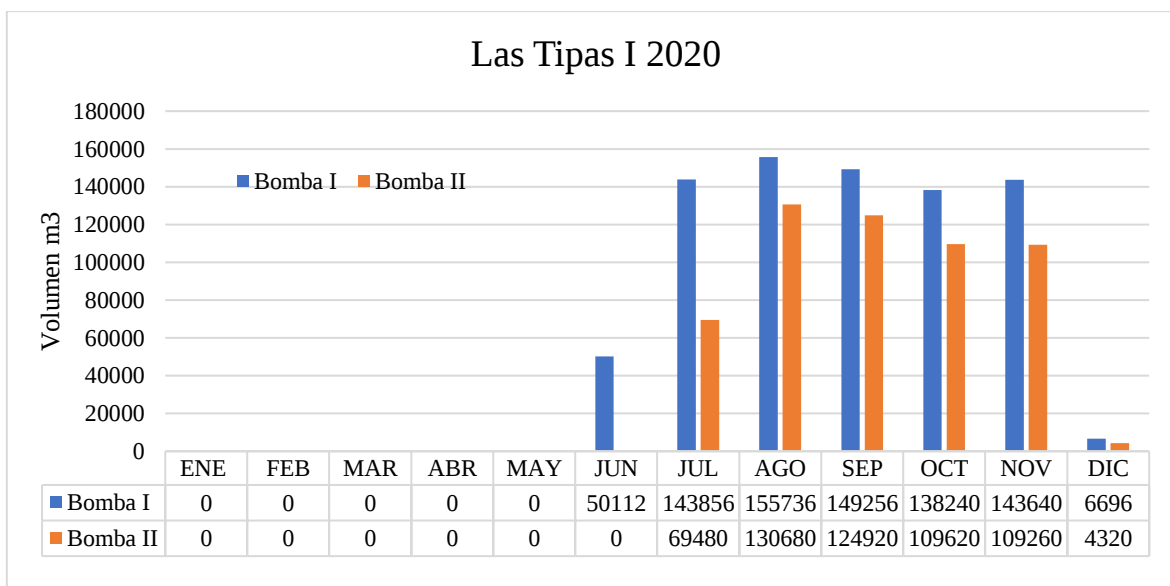
Reporte del volumen mensual extraído por COSAALT R.L. el año 2019.



Nota. Elaboración propia en base a los reportes de COSAALT R.L. a la AAPS.

Figura 36

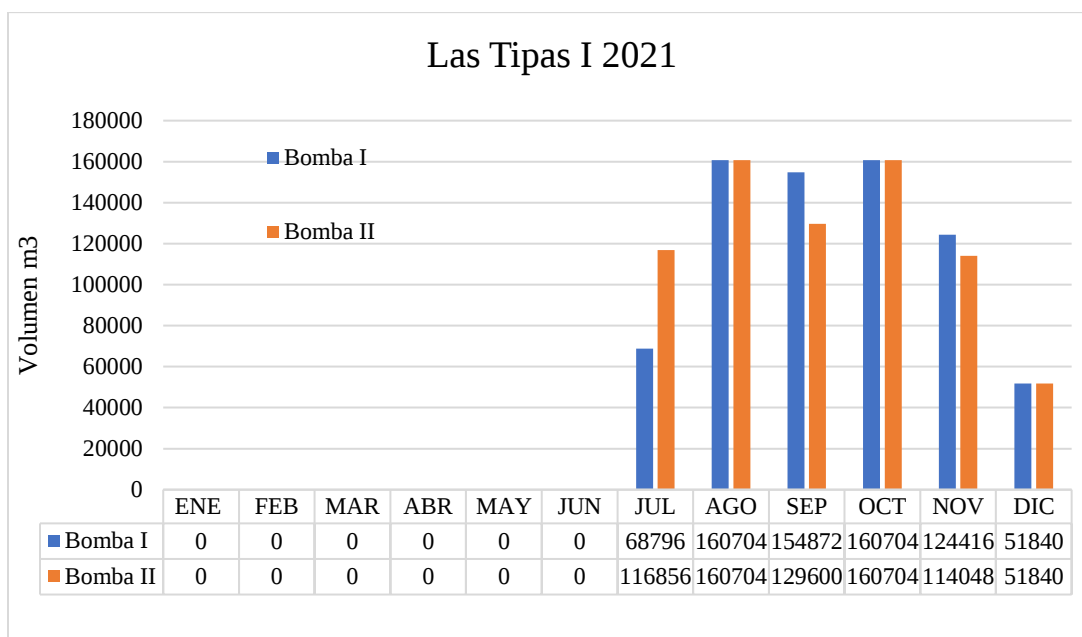
Reporte del volumen mensual extraído por COSAALT R.L. el año 2020.



Nota. Elaboración propia en base a los reportes de COSAALT R.L. a la AAPS.

Figura 37

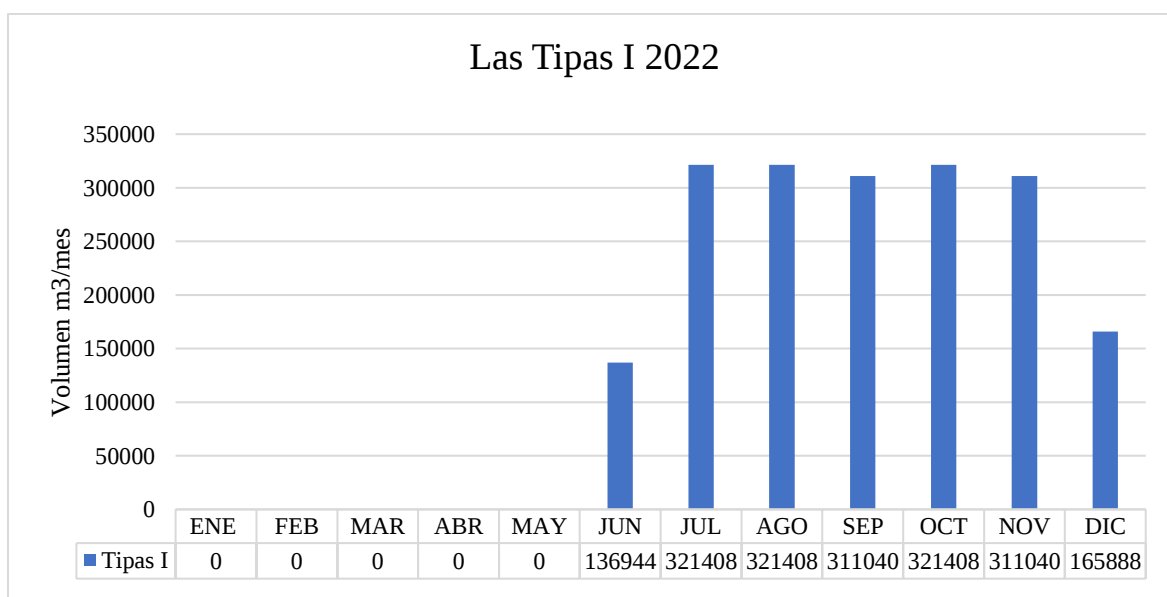
Reporte del volumen mensual extraído por COSAALT R.L. el año 2021.



Nota. Elaboración propia en base a los reportes de COSAALT R.L. a la AAPS.

Figura 38

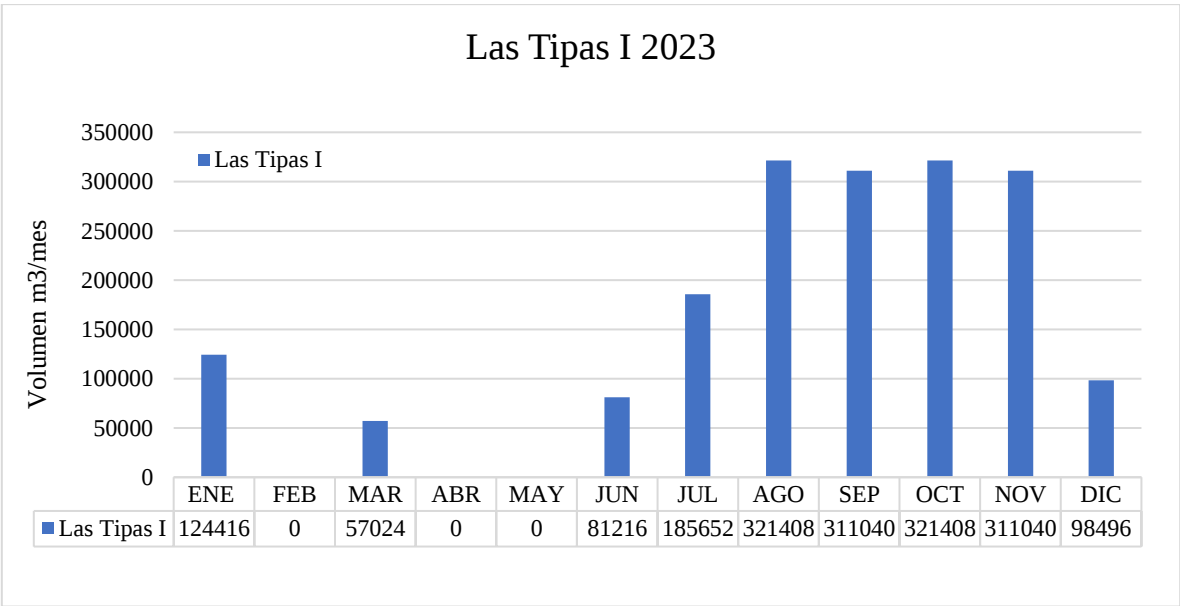
Reporte del volumen mensual extraído por COSAALT R.L. el año 2022.



Nota. Elaboración propia en base a los reportes de COSAALT R.L. a la AAPS.

Figura 39

Reporte del volumen mensual extraído por COSAALT R.L. el año 2023.



Nota. Elaboración propia en base a los reportes de COSAALT R.L. a la AAPS.

Los datos históricos muestran que los mayores volúmenes de agua bombeada en Las Tipas se concentran entre los meses de junio y noviembre. Por ejemplo, en 2022, el volumen bombeado alcanzó los 321,408 m³ tanto en agosto como en octubre. Estos meses coinciden con una estabilidad en el caudal y en la calidad del agua, según los resultados obtenidos en el monitoreo de 2024. Durante las campañas realizadas en junio y julio de 2024, se registraron caudales de 1.317 m³/s y 1.262 m³/s respectivamente, lo que coincide con los meses de mayor demanda de bombeo, según los datos históricos.

La comparación también revela que los meses de enero y febrero, con menores volúmenes de agua bombeada históricamente (por ejemplo 0 m³ en ambos meses en 2021), coinciden con las épocas de menores caudales registrados en 2024. En enero de 2024, el caudal fue de 1.856 m³/s, uno de los más bajos del año, lo cual confirma que las

precipitaciones escasas y la menor disponibilidad de agua en esa temporada influyen en los volúmenes bombeados.

Esta relación entre el caudal del río y los volúmenes históricos de bombeo sugiere que la gestión del agua en la zona de Las Tipas ha seguido patrones estacionales consistentes, ajustando el bombeo a la disponibilidad del recurso hídrico. Sin embargo, es importante destacar que en los meses de lluvias (como febrero y marzo), a pesar de los mayores caudales registrados (hasta 15.547 m³/s en marzo), los volúmenes bombeados históricamente no aumentan significativamente, esto debido a que el agua que se extrae de la obra de toma del Rincón de La Vitoria cubre la demanda de la población durante los periodos de mayor precipitación.

CAPÍTULO V: PROPUESTA DE MONITOREO DE CALIDAD Y CANTIDAD DE AGUA PARA LA ZONA DE LAS TIPAS

5.1. Equipamiento necesario para el monitoreo continuo de la calidad del agua

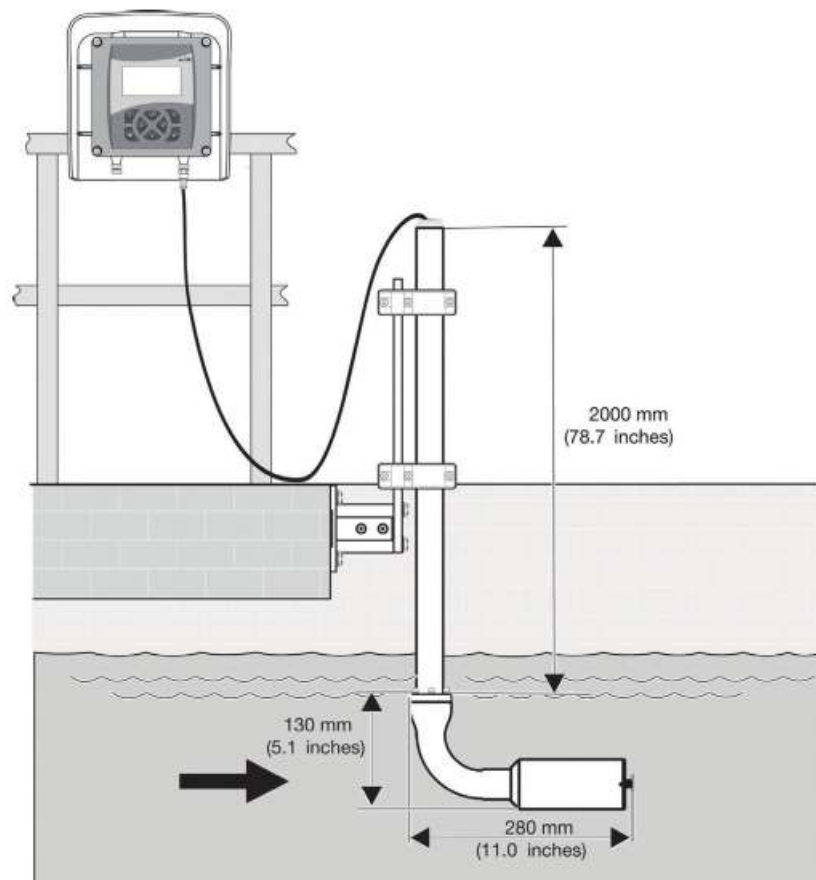
Para garantizar un monitoreo efectivo y en tiempo real de la calidad del agua en la zona de Las Tipas, es necesario implementar un conjunto de equipos especializados que permitan medir los principales parámetros físico-químicos exigidos por la NB 512. Los dispositivos, instrumentos y herramientas que se requieren para realizar un seguimiento constante y preciso de los parámetros que determinan la calidad del agua del cuerpo acuático incluye:

- a) Sensores y sondas:** Dispositivos diseñados para medir parámetros como pH, oxígeno disuelto, conductividad, temperatura, turbidez, sólidos totales disueltos. Estos sensores deben ser instalados de forma fija para realizar mediciones in situ o remotas.
- b) Estaciones de monitoreo:** La estructura debe permitir la agrupación de varios sensores, con capacidad de transmitir los datos recolectados en tiempo real a una plataforma central, permitiendo el análisis y la supervisión de la calidad del agua de manera continua.
- c) Sistemas de transmisión de datos:** Tecnología como GPRS, Wi-Fi o satelital que permitan enviar la información desde los sensores al centro de control o base de datos para su análisis en tiempo real.
- d) Fuentes de alimentación:** Paneles solares, baterías o conexiones a la red eléctrica que garanticen el funcionamiento ininterrumpido del sistema de monitoreo.

- e) **Software de supervisión y análisis:** Herramientas digitales que reciben, almacenan y procesan los datos obtenidos por los sensores, proporcionando alertas y reportes sobre la calidad del agua.

Figura 40

Diagrama del equipamiento para el monitoreo continuo de la calidad del agua.



Nota. Extraído del manual de <https://manuals.plus/hach/doc023-turbidity-and-suspended-solids-builtin-probe-manual>

5.1.1. Importancia del equipamiento y sensores en el monitoreo del agua

El equipamiento y los sensores son esenciales en el monitoreo continuo de la calidad del agua porque permiten la detección temprana de contaminantes, cambios en parámetros como pH, temperatura o turbidez, y garantizan el cumplimiento de los estándares de

seguridad. Además, estos sistemas permiten una respuesta rápida ante problemas de contaminación, mejorando la gestión de los recursos hídricos y protegiendo la salud pública y los ecosistemas. Su automatización reduce el margen de error humano y asegura un control más eficiente y preciso a lo largo del tiempo.

5.1.1.1. Importancia de los datos precisos y confiables.

La importancia de contar con datos precisos y confiables en el monitoreo continuo de la calidad del agua es fundamental por varias razones:

- a) Toma de decisiones informada:** Los datos precisos y confiables permiten a los gestores del agua y a las autoridades ambientales tomar decisiones basadas en información sólida. Esto incluye la implementación de medidas correctivas o preventivas para evitar la contaminación o restaurar la calidad del agua.
- b) Detección temprana de problemas:** Un sistema de monitoreo continuo y preciso puede identificar rápidamente cambios en la calidad del agua, lo que permite actuar de manera inmediata para mitigar problemas como la presencia de contaminantes, cambios en la temperatura o niveles de oxígeno disuelto.
- c) Protección de la salud pública:** El acceso a agua de calidad es vital para la salud humana. Datos confiables aseguran que las fuentes de agua para consumo humano, agricultura y recreación cumplan con los estándares de calidad establecidos, reduciendo el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua.
- d) Cumplimiento de normativas:** Cumplir con las regulaciones ambientales como la Ley 1333 (Ley del medio ambiente), la NB 512 y NB 496, exigen el

cumplimiento de ciertos parámetros de calidad del agua. Los datos precisos son necesarios para demostrar que los cuerpos de agua cumplen con las normativas y para evitar sanciones legales.

e) Gestión de recursos hídricos: En áreas donde los recursos hídricos son limitados, como la zona Las Tipas, un monitoreo preciso y confiable es esencial para gestionar eficientemente el uso del agua. Esto ayuda a evitar la sobreexplotación de los acuíferos y a garantizar la disponibilidad de agua en el futuro.

f) Modelación y predicciones: Los datos confiables permiten la creación de modelos predictivos que ayudan a anticipar eventos como sequías o inundaciones, así como el impacto de actividades humanas o cambios climáticos sobre la calidad del agua.

En el contexto de un sistema de monitoreo en la zona de Las Tipas, garantizar la precisión y confiabilidad de los datos es clave para proteger tanto los ecosistemas acuáticos como la salud de la población que dependen de este recurso.

5.1.1.2. Eficiencia operativa.

La eficiencia operativa del equipamiento para el monitoreo continuo de la calidad del agua es crucial porque optimiza el uso de recursos como energía y productos químicos, lo que reduce los costos operativos y el impacto ambiental. Equipos eficientes requieren menos mantenimiento y tienen una vida útil más prolongada, asegurando la recolección constante y confiable de datos, esenciales para la toma de decisiones.

Además, un equipo eficiente puede detectar con rapidez variaciones en la calidad del agua, permitiendo una respuesta inmediata a problemas. Esto es esencial para que el equipamiento de monitoreo funcione de manera autónoma y eficiente por periodos prolongados, con la mínima supervisión o mantenimiento. La eficiencia también reduce la necesidad de reemplazos frecuentes, lo que disminuye costos a largo plazo y garantiza la sostenibilidad del sistema de monitoreo.

5.1.2. Estación de monitoreo

La estación de monitoreo remoto permitirá determinar diariamente los parámetros asociados a la calidad de la fuente de agua con un funcionamiento autónomo con alimentados por energía eléctrica para su funcionamiento, los resultados podrán ser enviados a una base de datos para un monitoreo en tiempo de tal manera que se puede contar con la información de forma rápida e interactiva de todos los parámetros. Los parámetros capaces de monitorear son pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad, turbiedad y sólidos disueltos totales.

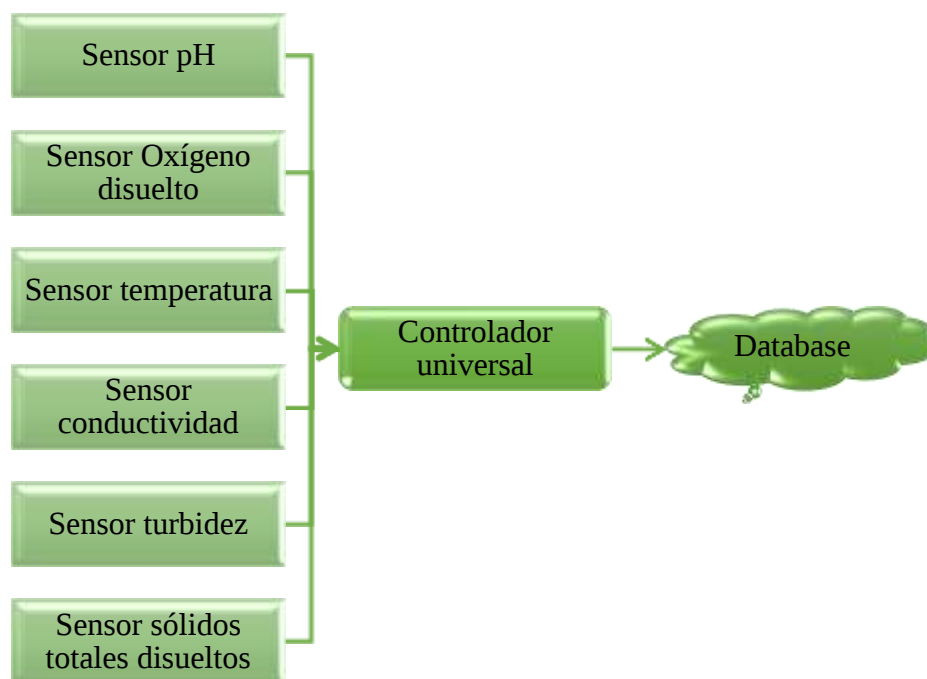
La estación de monitoreo debe contar con los siguientes elementos:

- a) Sistema de soporte de sensores, alojamiento de equipo y seguridad:** Se refiere a la infraestructura civil, ya sea de concreto, metalmecánica o una combinación de ambas, que hace posible la instalación física de la estación en el lugar, asegurando la estabilidad necesaria y el soporte adecuado para los diferentes tipos de sensores. Esto garantiza que los sensores operen en condiciones óptimas para medir correctamente los valores máximos y mínimos. Además, proporciona un espacio seguro para los equipos, protegiéndolos tanto de factores naturales como de posibles actos vandálicos.

- b) Sistema de alimentación de energía:** Se trata del conjunto que puede estar compuesto por un panel solar o conexión a la red de energía eléctrica. Este sistema debe estar protegido por un mecanismo de seguridad eléctrica que prevenga daños por picos de voltaje, sobre corrientes y otros posibles problemas eléctricos.
- c) Sistema de lectura y almacenamiento autónomo de datos:** Se refiere al grupo de sensores de calidad de agua y nivel, junto con los controladores que forman parte de la estación. Estos están interconectados mediante protocolos de comunicación estándar y son instalados en la estructura civil según las características específicas de cada ubicación. Esto asegura que se cumplan todos los requisitos necesarios para que las lecturas de los sensores no sufran interferencias, obstrucciones u otros factores que puedan afectar la precisión de los datos recopilados.
- d) Sistema de transmisión de datos:** corresponde al conjunto de dispositivos que permiten enviar la información recolectada por los diferentes sensores a través de una conexión satelital, redes móviles, por radio frecuencia, conexión inalámbrica, etc.

Figura 41

Esquema gráfico de la estación de monitoreo continuo de la calidad del agua.



Nota. Elaboración propia.

5.1.3. Sensores de parámetros Físico-Químicos

La calidad del agua se determina a través de una serie de parámetros físico-químicos, los cuales pueden verse alterados tanto por factores naturales como por actividades humanas, como las industriales, agrícolas o domésticas. Debido a esto, es fundamental analizar estos parámetros en todo tipo de aguas, independientemente de su origen.

Para realizar estas mediciones, algunos parámetros pueden evaluarse directamente en el sitio, a través de lo que se conoce como medición in situ. En este contexto, el uso de sensores de monitoreo ha ganado popularidad por su facilidad de uso, precisión y eficiencia en términos de costos. Estos dispositivos permiten medir de forma continua o periódica parámetros físico-químicos del agua, como temperatura, pH, turbidez, conductividad

eléctrica, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos y la presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Figura 42

Sensores para el monitoreo continuo de los parámetros Físico-Químicos.



Nota. Extraído de <https://enertekglobal.com/producto/aqualabo/>

Los sensores proporcionan información en tiempo real, lo que facilita la detección de anomalías y permite tomar decisiones preventivas o correctivas para mitigar impactos negativos en el medio ambiente y la salud humana. Así, el monitoreo constante mediante estos dispositivos es esencial para garantizar que la calidad del agua cumpla con los estándares de seguridad y protección tanto para los ecosistemas como para las personas.

Están diseñados para operar de manera autónoma, los sensores de monitoreo continuo capturan datos de forma ininterrumpida. Estos dispositivos están conectados a un

controlador encargado de transmitir de datos que envían la información recopilada a plataformas de supervisión. De esta manera, permiten el seguimiento constante de los parámetros clave sin necesidad de intervención manual.

5.2. Equipamiento necesario para el monitoreo continuo de la cantidad de agua

Para el monitoreo es necesario fijar una ubicación donde se tenga el mínimo de interferencia, esto con el fin de evitar lecturas incorrectas por las interferencias que se puedan dar durante la operación del sensor. Para seleccionar el tipo del sensor se debe definir el tipo de medición que se requiere realizar, medición directa o medición indirecta como se verá más adelante.

El equipamiento que se requiere es un soporte para el sensor, contar con energía eléctrica, definir la ubicación del controlador del sensor de cantidad de agua, un sensor, cable que permita la conexión entre el sensor y el controlador.

5.2.1. Sensores de nivel

Los sensores de nivel son ampliamente utilizados en procesos industriales para el tratamiento del agua potable, permitiendo controlar el flujo, el nivel y garantizar la seguridad de un proceso. Para analizar los sensores de nivel es necesario conocer dos conceptos básicos, el primero es la diferencia entre una medición puntual vs una medición continua.

- Una medición puntual se refiere a una medición instantánea del nivel en un momento específico. Esto significa que se toma una medición en un instante determinado, sin considerar como puede estar variando el nivel con el tiempo.

- Una medición continua implica la medición del nivel de forma constante a lo largo del tiempo. Los sensores de nivel que realizan mediciones continuas proporcionan información en tiempo real de como varia el nivel de líquido en un tanque.

El segundo punto importante que debemos analizar es la diferencia de las mediciones directas vs mediciones indirectas

- Un sensor de medición directa mide directamente la variable física de interés. Estos sensores toman la medición directamente del objeto o sustancia, el sensor necesita estar en contacto con lo que se está midiendo por lo cual no necesita realizar ningún cálculo o interpretación adicional.
- Un sensor de medición indirecta utiliza un método diferente para medir la variable de interés. Estos sensores miden un variable relacionada con la variable de interés y utilizan una formula o algoritmo para convertir esa variable en la variable de interés.

5.3. Comparación de sensores disponibles en el mercado

El monitoreo continuo de la calidad y cantidad de agua es fundamental para garantizar la gestión adecuada de los recursos hídricos en diversas aplicaciones, como el control ambiental, la gestión de recursos naturales y el abastecimiento de agua potable. En este contexto, la selección de los sensores adecuados es clave para obtener datos precisos y confiables que permitan una toma de decisiones.

A continuación, se presenta una comparación detallada de los sensores disponibles en el mercado nacional, tomando en cuenta parámetros técnicos, facilidad de instalación,

costos y características adicionales. La selección de los sensores analizados se basa en su capacidad para medir tanto parámetros de calidad, así como la cantidad del agua, en términos de caudal y nivel. Esta comparación busca facilitar la elección del equipo más adecuados según la necesidad específica del sistema de monitoreo.

Los principales aspectos a considerar en esta comparación incluyen el rango de medición, precisión, frecuencia de muestreo, durabilidad en condiciones adversas, así como los costos asociados tanto a la adquisición como al mantenimiento del sensor. También se valora la compatibilidad de los sensores con el sistema de monitoreo remoto y plataformas de Internet de las Cosas (IoT), que permitan un seguimiento eficiente y en tiempo real de los parámetros críticos del cuerpo de agua.

Tabla 20

Comparación de sensores de calidad del agua disponibles en el mercado nacional.

Sensor	Parámetro	HANNA	HACH
pH	modelo	HI 1016-3810	DPS1
	Rango	0.00 a 12.00 pH	-2.0 a 14.00 pH
	Precisión	±0.01 pH a 25°C	±0.02 pH
	temperatura	-5.0 a 80.0°C	-5 a 70°C
	Costo	5000.00 Bs	31325.00 Bs
	Mantenimiento	Calibración una vez por semana	Calibración una vez por semana
	Garantía	1 año	1 año
Oxígeno disuelto	modelo	HI 7640-5810	9020000-C1D2

		0.00 a 50.00 mg/l	
		(ppm)	0 a 20.00 mg/l (ppm)
	Rango	concentración 0.0 a 500.0% de saturación	concentración, 0 a 200% saturación
	Precisión	0.01 mg/l	0.01 mg/l, 0.1% de saturación
	temperatura	-5.0 hasta 50.0°C	0.0 a 50.0 °C
	Costo	21900.00 Bs	55475.00 Bs
	Mantenimiento	Una vez al año	Una vez al año
	Garantía	1 año	3 años
	modelo	HI 7630-4810	CDC40130
		Conduct: 0 a 999.9	
	Rango	mS/cm	1 - 2000 µS/cm
		TDS: 0 a 400.0 g/l	
Conductividad	Precisión	0.01 pH a 25°C	0.01 µS/cm a 200 mS/cm
	temperatura	0.0 a 100.0°C	-10 a 110°C
	Costo	8700.00 bs	19950.00 Bs
	Mantenimiento	Una vez al año	Una vez al año
	Garantía	1 año	2 años
		Turbimax	
	modelo	CUS51D (marca: Endress+Hauser)	LXV423.99.00200
Turbidez		0 - 4000 FNU	
	Rango	Contenido de sólidos de 0 a 5 g/l	Contenido de TSS: 0.001 - 500 g/l

			Turbidez: 0.001 - 4000 FNU
Controlador	Precisión	±0.1 FNU	±0.01 FNU
	temperatura	-20 a 50 °C	0.0 a 40.0 °C
	Costo	71862.00 Bs	55475.00 Bs
	Mantenimiento	una vez al mes	1 h/mes
	Garantía	1 año	1 año
	modelo	HI 520-0320	LXV402.99.11002 LXV400.99.5U582
	Sensores	2	6
	Interfaz	Inglés, español	Inglés, español
	Conexión		telefónico, GPS (modem GSM) y conexión LAN (puerto de servicio)
	Salida	Analógica	Analógica
	Almacenamiento	Hasta 8600 registros	tarjeta memoria
	Pantalla	LCD	LCD, Touch
	temperatura	-20 a 50°C	-20 a 55°C
	Costo	16500.00 Bs	176050.00 Bs
	Garantía	2 años	1 año

Nota. Elaboración propia en base a las cotizaciones y especificaciones técnicas de los sensores.

Tabla 21*Comparación de sensores de cantidad de agua.*

Sensor	Parámetro	VEGA	Endreess+Hauser
Nivel de agua para tanque	modelo	VEGAPLUS C11	FMU40-1RB2A2
	Distancia máxima	8 m	5 m
	Precisión	± 4 mm	± 2 mm
	Principio de medida	Ultrasonido	Ultrasonido
	Temperatura de funcionamiento	-40 a 60 °C	-40 a 80 °C
	Costo	17696.00 Bs	13842.00 Bs
	Mantenimiento	una vez al año	Cada 6 meses
Controlador	Garantía	1 año	2 año
	modelo	VEGAMET 841	Prosonic FMU90
	Sensores	1	2
	Idioma	Inglés, español	Inglés, español
	Pantalla	LCD	LCD
	Costo	16500.00 Bs	34605.00 Bs
	Garantía	2 años	1 año

Nota. Elaboración propia en base a las cotizaciones y especificaciones técnicas de los sensores.

5.3.1. Análisis de proveedores y marcas

Las marcas, HANNA Instruments y HACH, son reconocidas a nivel global por la fabricación de equipos de monitoreo de la calidad del agua, ofreciendo soluciones confiables para mediciones en campo y laboratorio. A continuación, se analiza su presencia y disponibilidad en el mercado nacional.

5.3.1.1. Proveedor HANNA Instruments

Tiene presencia local a través de distribuidores oficiales en Bolivia, facilitando el acceso a sus productos de manera rápida. Entre los distribuidores más importantes se encuentran empresas de tecnología ambiental y laboratorios locales que ofrecen equipos y asesoría técnica. A continuación, se presenta un análisis de la marca.

- **Controladores de procesos universal de dos canales:** El modelo HI 520-0320, que permite controlar dos sondas a la vez que pueden ser de: pH, conductividad, sólidos disueltos totales y oxígeno disuelto, es uno de los más modernos utilizados en el monitoreo de calidad de agua. Es fácil de instalar y ofrece buena precisión para uso en campo.
- **Sensores:** HANNA también ofrece sensores específicos como el HI 1016-3810 (pH), HI 7640-5810 (oxígeno disuelto), HI 7630-4810 (conductividad y TDS) con alta precisión, todos estos sensores ya cuentan con la incorporación de un sensor de monitoreo de la temperatura.
- **Precios:** Los productos HANNA tienen un rango de precios competitivo en comparación con otras marcas internacionales, con sensores que tienen un costo entre 5000 y 21000 Bs dependiendo de las características. HANNA aún no cuenta con sensores que permitan el monitoreo de turbidez.

- **Soporte técnico y garantías:** HANNA proporciona soporte local a través de sus distribuidores oficiales, quienes también manejan el servicio de garantía. La mayoría de sus equipos vienen con una garantía de 1 a 2 años. Además, ofrecen cursos de capacitación sobre el uso de sus equipos.
- **Facilidad de integración:** Los equipos HANNA son compatibles con software de gestión de datos y son ideales para usuarios que buscan soluciones sencillas pero robustas para trabajos de campo.

5.3.1.2. Proveedor HACH

Disponibilidad: HACH tiene una fuerte presencia en Bolivia a través de distribuidores locales en las ciudades del eje troncal del país. Además, cuenta con varios distribuidores que pueden suministrar productos en un tiempo relativamente corto. Los productos HACH se caracterizan por:

- **Módulos controladores:** El SC1000 es un controlador multiparámetro ampliamente utilizado, que permite controlar 6 sensores a la misma vez como ser la temperatura, oxígeno disuelto, conductividad, pH, sólidos totales disueltos y otros parámetros con precisión de laboratorio.
- **Sensor de turbiedad:** Sonda de inmersión Solitax hs-line sc para medida de turbidez (LXV423.99.00200) es un turbidímetro con alta precisión, utilizado en proyectos de monitoreo ambiental. Es reconocido por su facilidad de uso y fiabilidad. La sonda cuenta con su propio controlado y es compatible con Claros, el innovador Water Intelligence System de HACH, que le permite

conectar y gestionar instrumentos, datos y procesos sin interrupciones, en cualquier lugar y en cualquier momento.

- **Precios:** Los equipos HACH suelen tener precios más elevados que otras marcas debido a su precisión y durabilidad. Un sensor puede costar entre 31,000 y 67,000 Bs, mientras que sensores y controladores específicos como para los de turbidez están en el rango de 55,000 Bs a 60,000 Bs.
- **Soporte técnico y garantías:** HACH ofrece soporte técnico local y regional, con distribuidores que proveen servicio postventa y mantenimiento. La marca garantiza sus equipos por 2 años, con posibilidad de extensión. También ofrece asistencia técnica remota y local.
- **Facilidad de integración:** Los sensores HACH están diseñados para integrarse fácilmente con sistemas de monitoreo a distancia, siendo compatibles con plataformas de gestión de datos en tiempo real. Son ideales para proyectos que requieren monitoreo continuo y análisis avanzados de datos.

Tabla 22

Comparación de características de los sensores.

Criterio	HANNA Instruments	HACH	VEGA	Endreess+Hauser
Disponibilidad	Fácil acceso a través de distribuidores locales	Distribución establecida en Bolivia y región	Distribución establecida en Bolivia y región	Distribución establecida en Bolivia y región

Rango de precios	Más económico (5,000 y 21,000 Bs)	Precios más altos (31,000 y 177,000 Bs)	Precios más altos (16,000 y 20,000 Bs)	Precios más altos (13,000 y 35,000 Bs)
Calidad de los equipos	Buena precisión, ideal para campo	Alta precisión, ideal para laboratorio y campo	Alta precisión, ideal para laboratorio y campo	Buena precisión
Soporte técnico	Nacional, con asistencia rápida y cursos	Soporte técnico avanzado y postventa integral	Nacional, con asistencia rápida y cursos	Nacional, con asistencia rápida y cursos
Garantía	1-2 años	2 años, con posibilidad de extensión	2 años	1 años

Nota. Elaboración propia en base a un análisis de sus características técnicas de los equipos.

5.4. Criterios para la selección del equipamiento adecuado

Para la selección del equipamiento para el monitoreo del flujo y la calidad del agua en la zona de Las Tipas debe basarse en un análisis exhaustivo de los requisitos técnicos, costos, beneficios y la capacidad de adaptación a futuros desarrollos del proyecto. Estos criterios aseguran que los equipos seleccionados no solo cumplen con los estándares necesarios para la recolección precisa de datos, sino que también se alinean con las condiciones operativas del entorno y permiten la expansión y actualización a lo largo del tiempo. Para la selección de los equipos se tomó en cuenta los requisitos técnicos y operativos, costo y beneficio, adaptabilidad a un futuro crecimiento.

5.4.1. Requisitos técnicos y operativos

Cumplir con los requisitos técnicos y operativos son esenciales para garantizar que el equipamiento seleccionado cumpla con las demandas del entorno y las variables a medir. En términos técnicos, se consideran aspectos como la precisión, rango de medición, sensibilidad, durabilidad y capacidad de calibración de los sensores. Estos factores aseguran que los datos obtenidos sean confiables y se ajusten a los parámetros establecidos en los objetivos del estudio.

En cuanto a los requisitos operativos, se evaluó la facilidad de uso, la portabilidad y la autonomía del equipo. En un entorno de campo como Las Tipas, es crucial que los sensores sean fáciles de instalar y operar, y que requieran un mantenimiento mínimo para asegurar su funcionamiento continuo. Además, los equipos deben ser resistentes a las condiciones climáticas adversas y permitir la gestión eficiente de los datos mediante sistemas de transmisión en tiempo real o almacenamiento interno. La compatibilidad con plataformas de análisis de datos y la disponibilidad de soporte técnico local también son factores clave.

5.4.2. Costos y beneficios

El análisis de costos y beneficios es un criterio fundamental para la selección del equipamiento. Los costos iniciales de adquisición, instalación y calibración de los sensores se evaluarán buscando siempre una relación costo-beneficio óptima. Los equipos que permiten la automatización del monitoreo del agua a largo plazo pueden representar una inversión más alta en un inicio, pero generan ahorros a futuro al reducir la necesidad de personal para operar el equipo y disminuir los costos de mantenimiento.

Por otro lado, tomaremos en cuenta que los beneficios no solo incluyen la precisión y confiabilidad de los datos recolectados, sino también la durabilidad del equipo, su capacidad de operar en condiciones adversas, y su contribución a la continuidad del

monitoreo en el tiempo. De igual manera no menos importante consideraremos también los costos operativos, como la calibración periódica y el consumo energético, y compararlos con las ventajas a largo plazo que estos equipos proporcionan en términos de resultados más precisos y procesos más eficientes.

5.4.3. Adaptabilidad y futuro crecimiento

El equipamiento seleccionado deberá ser flexible y adaptable para permitir la incorporación de nuevas tecnologías y la expansión del sistema de monitoreo en el futuro. En este sentido, es fundamental que los sensores sean compatibles con plataformas escalables de recolección y análisis de datos, lo que facilitará la integración de nuevos equipos o la ampliación del área de monitoreo a otras zonas del río.

La adaptabilidad del equipo se refiere a su capacidad para mantenerse actualizado frente a los avances tecnológicos, ya sea mediante la integración de nuevos módulos de medición o la actualización de software para mejorar su funcionalidad. Asimismo, se debe contemplar la posibilidad de crecimiento en el monitoreo, lo que implica prever la adquisición de sensores adicionales o más avanzados conforme se desarrollen las necesidades del proyecto. De esta manera, la inversión inicial en equipamiento se maximizará al permitir su uso continuado y adaptable a largo plazo.

5.5. Propuesta de monitoreo de calidad y cantidad de agua para la zona Las Tipas

Esta propuesta se basa en la instalación de diversos equipos de parámetros fisicoquímicos que permitan monitoreo en línea de la zona de Las Tipas. El objetivo de la propuesta es presentar una alternativa a COSAALT R.L. para la implementación de un sistema de medición continua que permita obtener datos precisos sobre la calidad y cantidad

de agua, con el objetivo de facilitar la operación de la PTAP de Tabladita y permita una evaluación continua del estado del recurso hídrico.

Para este fin, se ha diseñado un plan de adquisición de equipos especializados que garantizarán la recolección de información en tiempo real y su análisis eficiente. La propuesta incluye tanto equipos para la medición de parámetros de calidad del agua, como dispositivos para el monitoreo del volumen del recurso disponible. A continuación, se detallan los equipos sugeridos, el presupuesto estimado y las especificaciones técnicas requeridas para la correcta implementación del sistema.

5.5.1. Equipos de calidad seleccionados

Para el monitoreo de la calidad del agua en Las Tipas, se ha seleccionado un conjunto de equipos multiparámetro que permitirán medir variables clave como el pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, temperatura, sólidos totales disueltos y turbidez. Estos parámetros son fundamentales para evaluar el estado químico y físico del agua, asegurando que se mantenga dentro de los rangos aceptables para su consumo y conservación ambiental.

Los equipos recomendados son:

- Módulo de pantalla controladora universal multiparámetro SC1000 HACH, se pueden conectar hasta 32 sensores, cuenta con una pantalla táctil a color. El módulo de visualización es de fácil traslado y se puede armar y desarmar de una manera muy práctica, el módulo de visualización SC1000 está disponible con GSM/GPRS, conectar a dispositivos LAN o una red de área amplia WAN.

- Módulo de sonda SC1000 HACH, con capacidad de conectar 6 sensores para crea una red SC1000, el controlador tiene una adaptabilidad según a las necesidades permitiendo agregar o cambiar sondas sin tener que cambiar el controlador. Tiene la ventaja de funcionar con un solo módulo de visualización, cuenta con un software totalmente actualizable garantizado que el equipo no quede obsoleto en un corto plazo.
- Sondas de pH, oxígeno disuelto, conductividad, temperatura, sólidos totales disuelto de HACH, son de un cuerpo robusto y cables reforzados que protegen a la sonda para realizar mediciones en las condiciones más exigentes. No requieren de un mantenimiento constante con una gran exactitud y una calibración menos frecuente lo que se traduce en menor costo y demanda mínima de personal para su operación.
- Sensor de turbiedad HACH permite realizar mediciones precisas e independiente del color de solidos suspendidos y turbidez, un indicador crítico de la presencia de sedimentos y partículas en suspensión.

Los equipos fueron seleccionados por su precisión, durabilidad y facilidad de uso en campo, siendo ideales para las condiciones climáticas y geográficas de la zona de Las Tipas. Además, son compatibles con sistemas de almacenamiento de datos que permiten la transmisión en tiempo real, facilitando la toma de decisiones informadas.

5.5.2. Equipos de cantidad seleccionados

El monitoreo de la cantidad de agua disponible en la zona se centrará en la medición del caudal y la variación del nivel del agua en la estación de bombeo, lo que permitirá

determinar la disponibilidad hídrica y gestionar de manera sostenible el recurso. Los equipos propuestos para este propósito incluyen:

- Un sensor VEGAPULS C11, el cual es un sensor de radar compacto diseñado para medir niveles de líquidos y sólidos a granel, utilizando tecnología de radar sin contacto que garantiza mediciones precisas y confiables en condiciones ambientales adversas, como polvo, vapor y temperaturas extremas. Con un rango de medición de hasta 8 metros, es ideal para aplicaciones en tanques pequeños y medianos. Su diseño compacto permite una instalación fácil y su salida de señal de 4-20 mA facilita la integración en sistemas de control existentes, convirtiéndolo en una opción económica y eficiente para diversas industrias como el tratamiento de aguas, agricultura y gestión de productos químicos.
- Un controlador VEGAMET 841 de proceso multifuncional de VEGA, diseñado para el monitoreo y control de nivel y caudal en aplicaciones industriales. Procesa señales analógicas de sensores, muestra las mediciones en una pantalla LCD y permite la gestión avanzada de procesos como el control automático de bombas y válvulas, y la configuración de alarmas. Con interfaces de comunicación como RS232 y RS485, es fácil de integrar en sistemas SCADA o PLC. Su robustez (IP65) lo hace ideal para entornos industriales exigentes, y su configuración amigable permite una rápida puesta en marcha, destacándose por su confiabilidad, versatilidad y adaptabilidad en diversas aplicaciones.

Estos equipos proporcionarán datos esenciales para la modelación del comportamiento hidrológico de la zona, contribuyendo a la gestión de recursos y la planificación de preventivas en caso de medidas de escasez o exceso de agua.

5.5.3. Presupuesto

El presente presupuesto tiene como objetivo detallar los costos asociados a la adquisición del equipamiento necesario para el monitoreo de la calidad y cantidad de agua en la zona de Las Tipas. La correcta selección de estos equipos es fundamental para garantizar la precisión de los datos recolectados, lo que permitirá un análisis exhaustivo del estado hídrico de la región. A continuación, se presenta un desglose de los equipos seleccionados, sus características y los costos estimados, basados en proveedores nacionales y referencias de mercado actualizadas.

Tabla 23

Presupuesto de los sensores.

Artículo	Descripción del equipo	Cantidad	Costo unitario (Bs)	Costo total (Bs)
Sensor HACH de pH	DPS1	1	31,325.00	31,325.00
Sensor HACH de oxígeno disuelto	9020000	1	55,475.00	55,475.00
Sensor HACH de conductividad	CDC40130	1	19,950.00	19,950.00
Sensor HACH de turbidez y TSS	LXV423.99.00200	1	66,675.00	66,675.00

Módulo de pantalla controlador HACH SC1000	LXV402.99.11002	1	82,075.00	82,075.00
Módulo de sonda HACH SC1000	LXV400.99.5U582	1	93,975.00	93,975.00
Sensor de nivel de agua para tanque VEGA	VEGAPULS C11	1	17,696.00	17,696.00
controlador de sensor de nivel VEGA	VEGAMET 841	1	16,500.00	16,500.00
			Total	383,671.00

Nota. Elaboración propia.

Este presupuesto incluye sensores multiparámetro y caudalímetros que aseguran un monitoreo integral. Además, se contempla la capacitación del personal encargado de la operación de los equipos.

5.5.4. Especificaciones técnicas

Para el monitoreo continuo de los parámetros de calidad y cantidad del agua en la zona de Las Tipas, se han seleccionado sensores avanzados que cumplen con los requisitos establecidos en las normativas bolivianas NB 512 y NB 496. A continuación, se describen las especificaciones técnicas de los sensores propuestos:

Tabla 24

Especificaciones técnicas de los equipos.

Sensor	Parámetro	Sensor HACH
pH	modelo	DPS1
	Rango	-2.0 a 14.00 pH

Oxígeno disuelto	Precisión	±0.02 pH
	temperatura	-5 a 70°C
	Mantenimiento	Calibración una vez por mes
	Garantía	1 año
	modelo	9020000-C1D2
	Rango	0 a 20.00 mg/l (ppm) concentración, 0 a 200% saturación
	Precisión	0.01 mg/l, 0.1% de saturación
	temperatura	0.0 a 50.0 °C
	Mantenimiento	Una vez al año
	Garantía	3 años
Conductividad	modelo	CDC40130
	Rango	1 - 2000 µS/cm
	Precisión	0.01 µS/cm a 200 mS/cm
	temperatura	-10 a 110°C
	Mantenimiento	Una vez al año
	Garantía	2 años
Turbidez	modelo	LXV423.99.00200
	Rango	Contenido de TSS: 0.001 - 500 g/l Turbidez: 0.001 - 4000 FNU

Controlador	Precisión	±0.01 FNU
	temperatura	0.0 a 40.0 °C
	Mantenimiento	1 h/mes
	Garantía	1 año
	modelos	LXV402.99.11002 LXV400.99.5U582
	Sensores	6
	Interfaz	Inglés, español
	Conexión	telefónico, GPRS (modem GSM) y conexión LAN (puerto de servicio)
	Salida	Analógica
	Almacenamiento	tarjeta memoria
	Pantalla	LCD, Touch
	temperatura	-20 a 55°C
sensor de nivel de agua para tanque	Garantía	1 año
	modelo	Vegapuls C11
	Distancia máxima	8 m
	Precisión	± 4 mm
	Principio de medida	Ultrasonido
	Temperatura de funcionamiento	-40 a 60 °C

	Mantenimiento	una vez al año
	Garantía	1 año
	modelo	VEGAMET 841
	Sensores	1
Controlador	Idioma	Inglés, español
	Pantalla	LCD
	Garantía	2 años

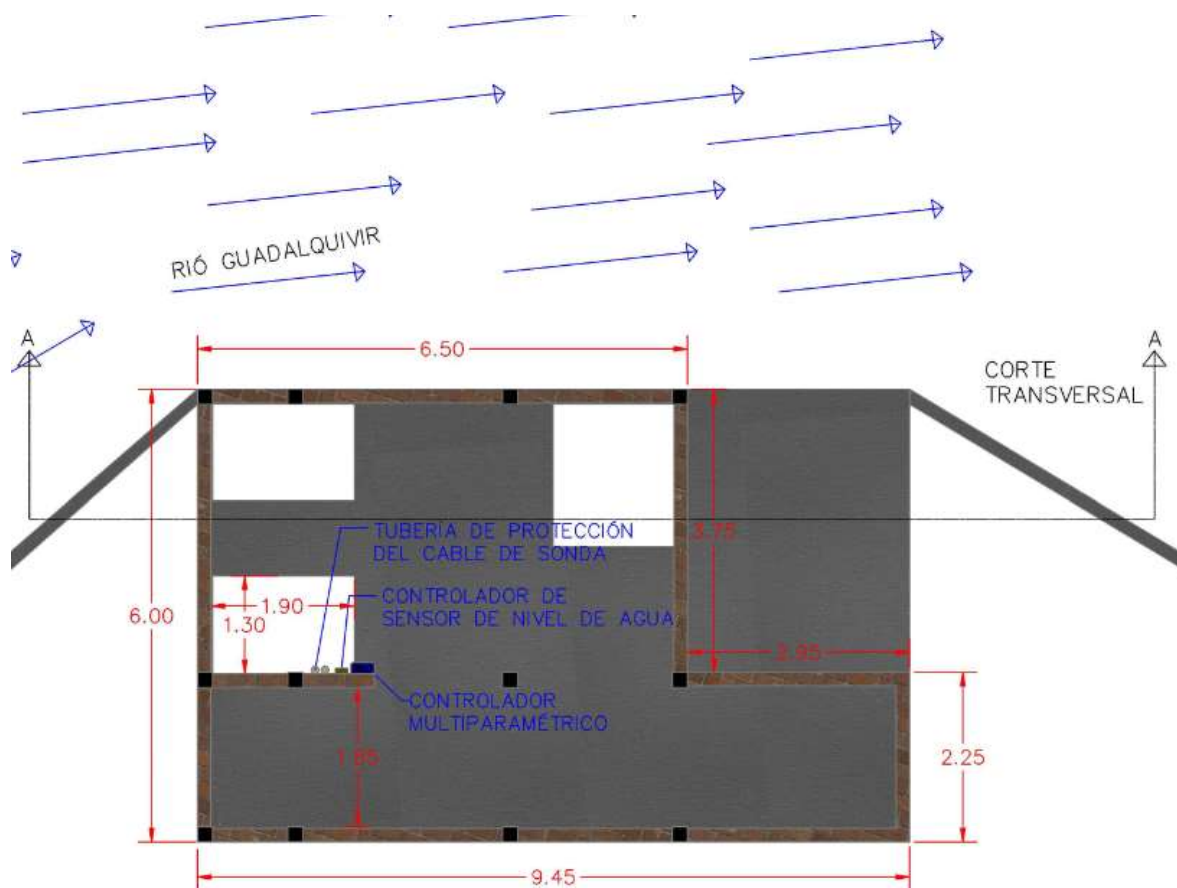
Nota. Elaboración propia.

5.5.5. Esquema de la instalación de sensores

Para garantizar un monitoreo continuo y preciso de la calidad y cantidad del agua en el área de estudio, se ha desarrollado un diseño esquemático que detalla la disposición, conexiones, y configuración técnica de los sensores seleccionados. Este diseño considera las características específicas del sitio, los parámetros a medir, y los requisitos técnicos de los equipos propuestos.

Figura 43

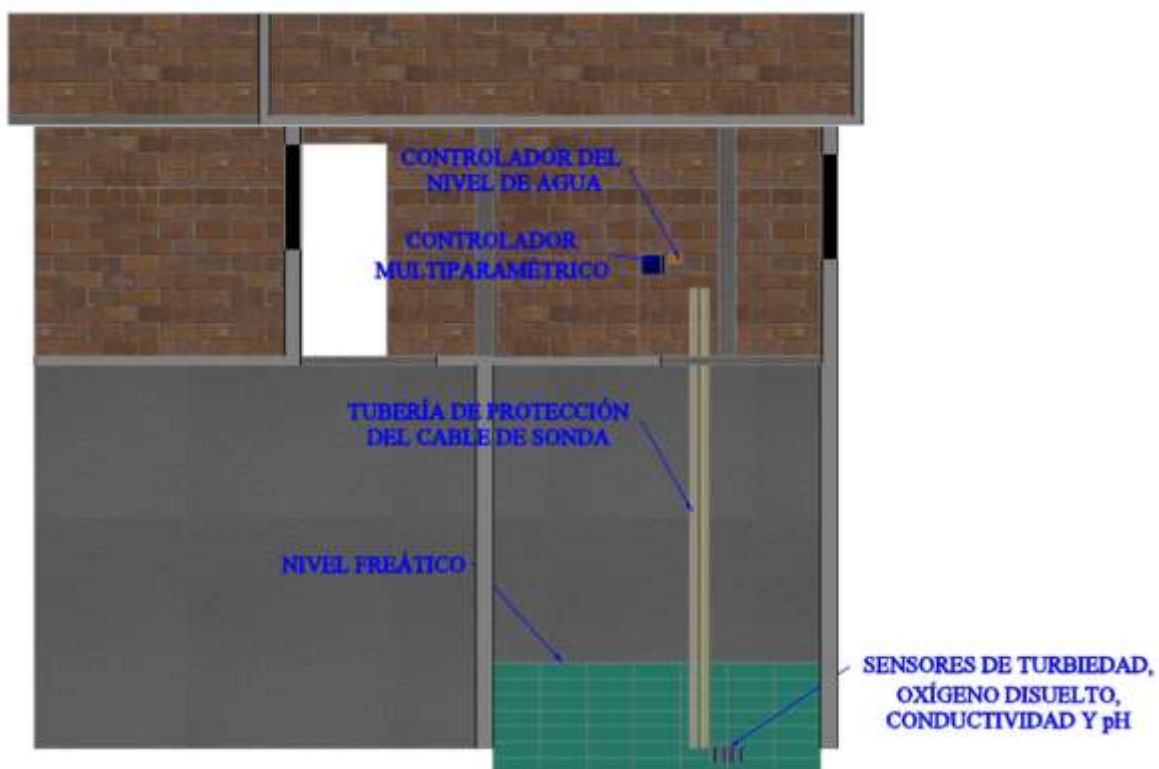
Esquema de la instalación de los sensores en la caseta de bombeo de Las Tipas I vista en planta.



Nota. Elaboración propia.

Figura 44

Esquema de la instalación de los sensores en la caseta de bombeo de Las Tipas I vista corte A-A.



Nota. Elaboración propia.

Figura 45

Caseta de bombeo de Las Tipas I.



Nota. Elaboración propia.

5.5.6. Costos de mantenimiento de los equipos

El mantenimiento de los equipos de monitoreo es un aspecto clave para garantizar la precisión y continuidad de las mediciones. En este análisis, se consideraron los costos de mantenimiento de los equipos HACH y Vega propuestos para medir parámetros de calidad y cantidad de agua en Las Tipas. A continuación, se presenta el costo estimado de mantenimiento de los equipos.

Tabla 25*Costos de mantenimientos de los equipos.*

Artículo	Mantenimiento	Requerimiento	Costo (Bs)	Costo total por año (Bs)
Sensor HACH - pH (DPS1)	Calibración una vez por mes	1 frasco de solución buffer: 100 Bs c/u (4 soluciones por año por tipo). Servicio técnico ocasional: 500 Bs por calibración trimestral.		2000
Oxígeno disuelto (9020000-C1D2)	Una vez al año.	Reemplazo de membranas y solución electrolítica.	Membranas: 300 Bs por unidad (2 anuales). Solución: 200 Bs. Servicio técnico: 800 Bs.	1600
Conductividad (CDC40130)	Una vez al año.	Calibración con solución estándar de conductividad.	Solución de calibración: 150 Bs (por lote). Servicio técnico: 500 Bs.	650
Turbidez (LXV423.99.0 0200)	1 hora/mes para limpieza y revisión.	Limpieza de lentes, solución estándar de calibración.	Solución estándar: 150 Bs/trimestre. Servicio técnico (anual): 1,000 Bs.	1800
Controlador HACH	Verificación y actualización de		Servicio técnico (anual): 1,000 Bs.	1000

(LXV402.99.1 1002)	software, revisión de conexión y salida analógica.		
Sensor de nivel de agua (VEGAPLUS C11)	Revisión una vez al año.	Limpieza y revisión: 700 Bs.	700
Controlador VEGA (VEGAMET 841)	Verificación anual del sistema.	Servicio técnico: 500 Bs.	500
Total			8250

Nota. Elaboración propia.

Este presupuesto incluye servicios técnicos especializados y reposición de consumibles, asegurando que los equipos operen dentro de los estándares de precisión establecidos por las normativas. Este cálculo refleja la importancia de la inversión en mantenimiento para garantizar la eficiencia del sistema de monitoreo continuo propuesto.

5.6. Análisis y almacenamiento de los resultados

En esta sección haremos mención a los resultados generados como datos, tanto en el campo en los laboratorios de análisis, como también en los colectados en tiempo real mediante el equipamiento instalado. Tenemos que tener en cuenta la calidad de los datos generados y el origen de los mismos para poder evidenciar cualquier error en su cadena de generación.

En cuanto a los resultados colectados in situ, se encuentran los datos de los parámetros fisicoquímicos recolectados por la sonda multiparamétrica, los cuales se encontrarán dentro de la memoria interna del equipo. A su vez, tendremos las planillas de campo con la misma información para poder chequear que sea correcta en ambos soportes de información.

También tendremos, como información relevada en campo, a los datos de las IFDs (Imágenes fotográficas digitales) que estarán presentes en las memorias utilizadas.

Por otro lado, tendremos los informes de los análisis realizados por los laboratorios. Estos informes se generan en soporte digital y también en una copia impresa con la firma de los responsables técnicos de las mediciones realizadas. Ambos sets de datos son de importancia para la base de datos del monitoreo.

5.6.1. *Informatización de la información*

En este paso debemos tener mucho cuidado con no pasar por alto ninguna información y que el set de datos que estemos informatizando sea compatible con todos los códigos internos de toma de muestra. Debemos volcar toda la información con los mismos códigos, siguiendo los estándares establecidos en la logística previa de muestreo donde cada sitio del plan de monitoreo tiene un código con la información respectiva del evento de muestreo.

La información generada en campo debe ser bajada de los soportes originales (sonda y cámara fotográfica digital) a una computadora y adosada a una planilla general con mayor información donde sean legibles todos los elementos del código de cada muestra (fecha, lugar, características, etc).

El mismo procedimiento es aplicable a la información digital que nos será provista por el laboratorio prestador de los servicios de análisis. De esta forma consolidamos una base de datos estandarizada para el análisis del monitoreo de calidad de aguas. Las planillas deben ser de tipo Microsoft Excel o similar, para poder realizar los análisis estadísticos y concluir así con datos fiables, expresados en valores promedio con sus respectivos desvíos estándares, para sitio de muestreo.

5.6.2. *Análisis y crítica de datos medidos de calidad de agua*

El análisis de los datos de calidad del agua permite interpretar los resultados de las mediciones y evaluar su conformidad con los estándares establecidos. Para esto, es esencial revisar los parámetros medidos, verificar la calidad de los datos y compararlos con los límites recomendados por la normativa nacional (NB 512) y la Organización Mundial de la Salud (OMS). Para ello, se presenta a continuación un enfoque comparativo y de tendencias, utilizando gráficos para visualizar variaciones de la calidad del agua en el tiempo, donde se presenta como una alternativa para el análisis y crítica de resultados, siguiendo los siguientes pasos:

5.6.2.1. Recolección de datos.

Los sensores medirán la calidad del agua de manera continua, proporcionando datos en intervalos regulares (por ejemplo, cada 15 minutos o cada hora). Esto permitirá obtener un historial detallado de las variaciones en la calidad del agua en distintos puntos críticos de la cuenca. La información se almacenará en un sistema centralizado, accesible para análisis inmediatos y a largo plazo.

5.6.2.2. Verificación de la calidad de los datos.

Para asegurar que los datos sean precisos, los sensores requerirán calibración y mantenimiento según especificaciones del fabricante para evitar degradación en la medición. Los datos serán validados comparándolos con muestras manuales ocasionales tomadas en sitio, asegurando la congruencia y confiabilidad de las lecturas automáticas. Los valores atípicos o inconsistentes serán revisados y, si es necesario, se recalibrarán los sensores para corregir posibles desviaciones.

5.6.2.3. Análisis comparativo.

El análisis comparativo se enfocará en comparar los datos medidos por los sensores automáticos con los estándares nacionales e internacionales, como la normativa boliviana NB 512 y los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Este análisis identificará cuándo los parámetros de calidad del agua, como el pH o la turbidez, exceden los valores permitidos, lo que indicará la necesidad de intervención o tratamiento inmediato.

5.6.2.4. Análisis de tendencias.

Con los datos en tiempo real, se podrá realizar un análisis de tendencias más detallado, observando cómo los parámetros de calidad del agua varían a lo largo del tiempo. Se podrán identificar patrones estacionales, como el aumento de turbidez durante las lluvias o la disminución del oxígeno disuelto en épocas de calor. Estas tendencias ayudarán a predecir posibles riesgos de contaminación o deterioro de la calidad del agua en función de las condiciones climáticas y de uso.

5.6.2.5. Interpretación de resultados.

La interpretación de los resultados permitirá una comprensión más profunda de la evolución de la calidad del agua, facilitando la toma de decisiones inmediatas ante desviaciones peligrosas. Si se detecta un aumento en la turbidez o una caída en los niveles de oxígeno disuelto, se podrán implementar medidas correctivas rápidas, como el ajuste de sistemas de tratamiento o la restricción de usos del agua hasta que se recupere su calidad adecuada. Esta información será crucial para garantizar la potabilidad y el uso seguro del agua.

5.6.2.6. Crítica del proceso de monitoreo.

Aunque los sensores automáticos mejorarán el monitoreo, existen desafíos, como la necesidad de calibración y mantenimiento frecuentes para asegurar la precisión a largo plazo. Además, los sensores podrían estar sujetos a condiciones extremas (suciedad, sedimentación, etc.), lo que afectaría la calidad de las mediciones. Por lo tanto, será necesario establecer protocolos claros para el mantenimiento de los sensores y la revisión constante de los datos para asegurar que reflejen correctamente la calidad del agua en todo momento.

5.6.3. *Análisis y crítica de datos medidos de cantidad de agua*

El proceso de monitoreo continuo permitirá obtener datos en tiempo real sobre la cantidad de agua disponible en diferentes puntos de la cuenca. Estos sensores proporcionarán una lectura precisa y constante de los caudales, lo que mejorará considerablemente la capacidad de análisis y respuesta ante fluctuaciones hídricas.

5.6.3.1. Recolección de datos.

Los datos serán recolectados de forma automática, registrando el caudal de agua en intervalos regulares (por ejemplo, cada hora), lo que permitirá observar cambios instantáneos y patrones diarios. La ventaja de estos sensores es que eliminarán la necesidad de depender exclusivamente de mediciones manuales, mejorando así la cobertura y continuidad del monitoreo. La información será almacenada en una base de datos central, accesible para análisis periódicos o en situaciones de emergencia.

5.6.3.2. Verificación de la calidad de los datos.

Para garantizar la calidad de los datos, se deberán implementar protocolos de calibración y mantenimiento regulares de los sensores. Esto incluirá revisiones periódicas del equipo y la validación de los datos obtenidos, comparándolos con mediciones manuales esporádicas para asegurar que los sensores sigan funcionando correctamente. Cualquier dato anómalo detectado será evaluado y, si es necesario, se corregirá mediante ajustes en el equipo o mediante la toma de nuevas mediciones en el sitio.

5.6.3.3. Análisis comparativo.

Con la medición continua de caudales, se podrá realizar un análisis comparativo más exhaustivo. Los datos medidos por los sensores se compararán tanto con los valores históricos de la cuenca como con los registros previos obtenidos antes de la implementación de los sensores. Este análisis permitirá identificar posibles cambios en el patrón de flujo de agua a lo largo del tiempo, como la reducción de caudales en periodos secos o los incrementos anormales debido a lluvias intensas. Además, se podrá evaluar la capacidad del sistema de captación para cumplir con las demandas de la población durante diferentes estaciones.

5.6.3.4. Análisis de tendencias.

El monitoreo continuo permitirá realizar un análisis detallado de las tendencias de caudal en tiempo real y a largo plazo. A través de gráficos y modelos predictivos, será posible observar las fluctuaciones diarias, estacionales e interanuales de los caudales, lo que facilitará la identificación de posibles riesgos, como sequías prolongadas o fenómenos extremos de inundación. Esta información será crucial para anticipar situaciones críticas y diseñar planes de gestión más robustos, ajustados a las dinámicas hídricas de la cuenca.

5.6.3.5. Interpretación de resultados.

El análisis de los resultados permitirá una mejor comprensión de las variaciones en la cantidad de agua disponible a lo largo del año. Los datos en tiempo real facilitarán la toma de decisiones rápidas en respuesta a eventos extremos, como la implementación de restricciones de uso de agua en momentos de escasez o la activación de sistemas de almacenamiento en tiempos de abundancia. Además, la recopilación continua de datos permitirá evaluar la eficacia de las estrategias implementadas para mejorar la sostenibilidad del recurso hídrico, como la recarga artificial de acuíferos o la construcción de nuevas infraestructuras de retención.

5.6.3.6. Crítica del proceso de monitoreo.

Aunque los sensores de caudal mejorarán significativamente el monitoreo, también existen limitaciones que deben considerarse. Los sensores requieren mantenimiento regular para asegurar su precisión, y su instalación inicial puede ser costosa. Asimismo, es crucial que los datos sean analizados de manera constante para evitar la acumulación de información sin procesar. Se deben establecer protocolos claros para la interpretación y la acción basada en los datos, asegurando que cualquier desviación de los caudales previstos se aborde de

manera oportuna. Además, será importante contar con un sistema de respaldo en caso de fallas tecnológicas en los sensores.

5.7. Generación de reportes

La implementación de sensores automáticos para el monitoreo continuo del caudal y la calidad del agua en la cuenca de Las Tipas permitirá la generación de informes periódicos y precisos. Estos informes servirán como herramientas para la toma de decisiones, facilitando el análisis detallado de los datos recolectados y proporcionando una visión clara sobre el estado de los recursos hídricos.

5.7.1. *Proceso de generación de reportes*

El sistema de generación de informes se basará en la recolección automatizada de datos, los cuales serán registrados en intervalos regulares (diarios, semanales o mensuales) dependiendo del tipo de monitoreo. Estos datos incluyen parámetros relacionados con el caudal, tales como el volumen de agua disponible a lo largo del tiempo en este punto de la cuenca, así como los principales indicadores de calidad del agua (pH, oxígeno disuelto, temperatura, conductividad, turbidez y sólidos totales disueltos).

Los informes se generarán automáticamente a través de un software de análisis de datos, que procesará la información recolectada por los sensores. Cada informe incluye:

- Resumen de los datos recolectados: Presentación de los valores promedio, máximos y mínimos para cada parámetro monitoreado, con gráficos y tablas que visualizan las fluctuaciones en el tiempo.

- **Análisis comparativo:** Comparación de los datos actuales con los estándares normativos (como la NB 512 para calidad del agua) y con valores históricos para identificar tendencias o anomalías.
- **Identificación de problemas críticos:** El reporte destacará cualquier reducción significativa en los parámetros monitoreados, como una reducción crítica en los caudales o un aumento en la turbidez, que podría afectar el suministro de agua.
- **Recomendaciones de gestión:** En función de los resultados, se incluirán sugerencias para mejorar la gestión de los recursos hídricos, como ajustes en los sistemas de almacenamiento, tratamiento de agua o medidas preventivas para afrontar periodos de sequía.

5.7.2. Frecuencia y distribución de los reportes

Los informes serán generados trimestralmente, aunque se podrán realizar informes mensuales durante épocas críticas, como la temporada seca o tras eventos de lluvias intensas. Los informes serán accesibles a las autoridades locales encargadas de la gestión del agua, así como a los responsables del tratamiento y distribución del recurso, para asegurar que las decisiones se tomen con base en datos precisos y actualizados.

Además, los informes podrán ser compartidos con la comunidad local a través de plataformas en línea, para aumentar la transparencia y fomentar la participación ciudadana en la gestión sostenible del agua. En caso de situaciones críticas, como una sequía severa, se generarán informes de emergencia para coordinar acciones rápidas de mitigación.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

El presente trabajo de tesis se enfocó en diseñar una propuesta de monitoreo en tiempo real de la calidad y cantidad de agua en la zona de Las Tipas, abordando un problema crítico para la gestión de los recursos hídricos. A lo largo del desarrollo del proyecto, se lograron importantes avances hacia la optimización del sistema de monitoreo y la mejora en la eficiencia operativa de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de Tabladita. A continuación, se destacan como las principales conclusiones:

- Respecto al problema planteado se identificó que la falta de un sistema de monitoreo continuo en la zona de Las Tipas genera dificultades en la gestión del recurso hídrico, especialmente durante la temporada de lluvias cuando el caudal aumenta considerablemente y durante la temporada seca, cuando disminuye de manera crítica. La falta de información precisa y en tiempo real afecta la eficiencia de la planta de tratamiento, complicando la dosificación del coagulante y la respuesta ante variaciones en la calidad del agua.
- El implementar un sistema de monitoreo en tiempo real se basa en anticipar y gestionar de manera proactiva las variaciones en los parámetros de calidad y cantidad del agua. Este objetivo fue abordado mediante la propuesta de instalación de sensores automáticos que proporcionarán datos en tiempo real, permitiendo a los operadores de la planta tomar decisiones informadas y garantizar la calidad del agua suministrada a la población.

- En relación a los resultados obtenidos durante las nueve campañas de aforo y análisis de la calidad del agua realizadas, junto con la evaluación del equipamiento disponible, permitieron identificar los parámetros críticos a monitorear y establecer los rangos de variabilidad aceptables según la normativa NB 512. La propuesta de implementación de los sensores de medición automática demostraron ser una solución técnica y económicamente viable para mejorar la eficiencia operativa de la PTAP y la gestión del recurso hídrico en la zona de Las Tipas.
- El impacto que tendrá la propuesta con la implementación de este sistema de monitoreo no solo optimizará los procesos de tratamiento del agua en la PTAP, sino que también permitirá a COSAALT R.L. contar con información precisa para la planificación a largo plazo y la respuesta rápida ante emergencias hídricas. La capacidad de obtener datos en tiempo real reducirá la dependencia de métodos manuales y empíricos, incrementando la confiabilidad de las operaciones en la planta.

6.2. Recomendaciones

En base al objetivo general y los objetivos específicos planteados, se tiene las siguientes recomendaciones para asegurar el éxito de la implementación de un sistema de monitoreo continuo de la calidad y cantidad de agua en la zona de Las Tipas:

- Para el monitoreo continuo con sensores automáticos es esencial garantizar la instalación adecuada de los sensores automáticos en la estación de monitoreo estratégicamente ubicada en la obra de toma de Las Tipas. Se recomienda que los sensores seleccionados permitan una medición precisa

de parámetros clave como el caudal, pH, turbidez, conductividad y oxígeno disuelto, cumpliendo con la normativa NB 512.

- Se deben realizar la calibración y mantenimiento según lo especificado por el fabricante de los equipos para asegurar la precisión de los datos recolectados, se deben establecer protocolos periódicos de calibración y mantenimiento de los equipos instalados. Esto incluye revisiones de técnicas para prevenir fallas en los sensores y garantizar la calidad de las mediciones a lo largo del tiempo.
- En la automatización de la recolección y análisis de datos se debe implementar un software especializado que permita procesar los datos en tiempo real, facilitando la generación de informes automáticos con análisis comparativos y tendencias. Este sistema debe incluir alarmas que notifiquen a los operadores cuando los parámetros medidos excedan los límites aceptables establecidos por la normativa.
- Para poder realizar una buena optimización en el proceso de tratamiento de agua en la PTAP Tabladita se deben utilizar los datos recolectados para ajustar en tiempo real la dosificación de químicos en el proceso de tratamiento de agua, optimizando la eficiencia operativa de la planta. Se sugiere implementar un sistema de control que permita realizar ajustes automáticos según las variaciones en la calidad del agua.
- Considerar la expansión futura del sistema de monitoreo continuo a otras áreas críticas de la cuenca, especialmente en zonas donde los afluentes puedan influir en la calidad del agua captada. De este modo, se asegurará

una cobertura integral del recurso hídrico y se podrán anticipar riesgos asociados a la contaminación o disminución del caudal.

- Asegurar la capacitación continua del personal encargado de operar y mantener el sistema de monitoreo. Es importante que los operadores comprendan el manejo de los sensores y software, así como los procedimientos para interpretar los datos y actuar en consecuencia.

Realizar revisiones periódicas del sistema de monitoreo, buscando posibles actualizaciones que mejoren su precisión, durabilidad y adaptabilidad. Este enfoque garantizará que el sistema siga siendo eficiente y sostenible a largo plazo.