



Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Grado en Ingeniería Industrial

# Diseño y propuesta de mejora de un sistema de potabilización de agua en una comunidad rural en Paraguay

Autor: Blanca Rodríguez Martínez

Director: María del Mar Cledera Castro, Katia Hueso Kortekaas

MADRID | Julio 2025



# Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en el diseño y propuesta de mejora de un sistema de potabilización de agua en la comunidad rural de Bahía Negra, en el norte del Chaco paraguayo. Esta región se caracteriza por su aislamiento geográfico, su compleja situación socioeconómica y su elevada vulnerabilidad ambiental, factores que dificultan el acceso a recursos básicos como el agua potable. El suministro actual procede del río Paraguay y llega a los hogares sin tratamiento previo, lo que expone a la población a riesgos sanitarios derivados de la presencia de contaminantes físicos, químicos y microbiológicos. La planta de potabilización construida en el municipio se encuentra fuera de servicio desde 2023, debido a fallos eléctricos, falta de mantenimiento, ausencia de personal cualificado y limitaciones económicas del propio ayuntamiento.



Figura 1: Planta potabilizadora Bahía Negra estado actual

*Fuente: Creación propia*

Ante esta realidad, el proyecto combina un enfoque técnico, social y económico. En primer lugar, se llevó a cabo un análisis previo sobre experiencias de bajo coste en potabilización en comunidades rurales, identificando aquellas tecnologías sencillas, sostenibles y de fácil mantenimiento que podrían adaptarse al contexto del Chaco paraguayo. Posteriormente, durante la estancia en terreno, se desarrolló un trabajo de campo que incluyó la inspección detallada de la planta de tratamiento, la recopilación de medidas de cada componente, la evaluación de su funcionamiento y la identificación

de los principales fallos estructurales y operativos. Asimismo, se procedió a la toma de muestras de agua en distintos puntos, cuyo análisis se realizó en base a la normativa paraguaya de calidad del agua para consumo humano y, de forma comparativa, con la legislación española. Los resultados confirmaron la necesidad de restaurar el sistema de tratamiento, al detectarse incumplimientos en parámetros fundamentales como turbidez, coliformes y sólidos disueltos.

El diagnóstico técnico se completó con el estudio de elementos críticos como el filtro de arena, que presentaba un alto grado de colmatación y pérdida de eficiencia; la red de distribución, que muestra deficiencias tanto en su trazado como en su mantenimiento; y el sistema eléctrico de la planta, que resulta insuficiente e inestable para garantizar un servicio continuo. Este análisis permitió no solo identificar los fallos, sino también proponer soluciones realistas y adaptadas a las posibilidades locales. Entre ellas, destacan la mejora de los sistemas de filtración, la optimización del mantenimiento preventivo y la introducción de medidas de gestión comunitaria.

Como parte del trabajo, se elaboraron planos técnicos que recogen tanto el estado actual de la planta como las modificaciones necesarias para su reactivación. Dichos planos constituyen una herramienta clave para comprender la situación y guiar futuras intervenciones.

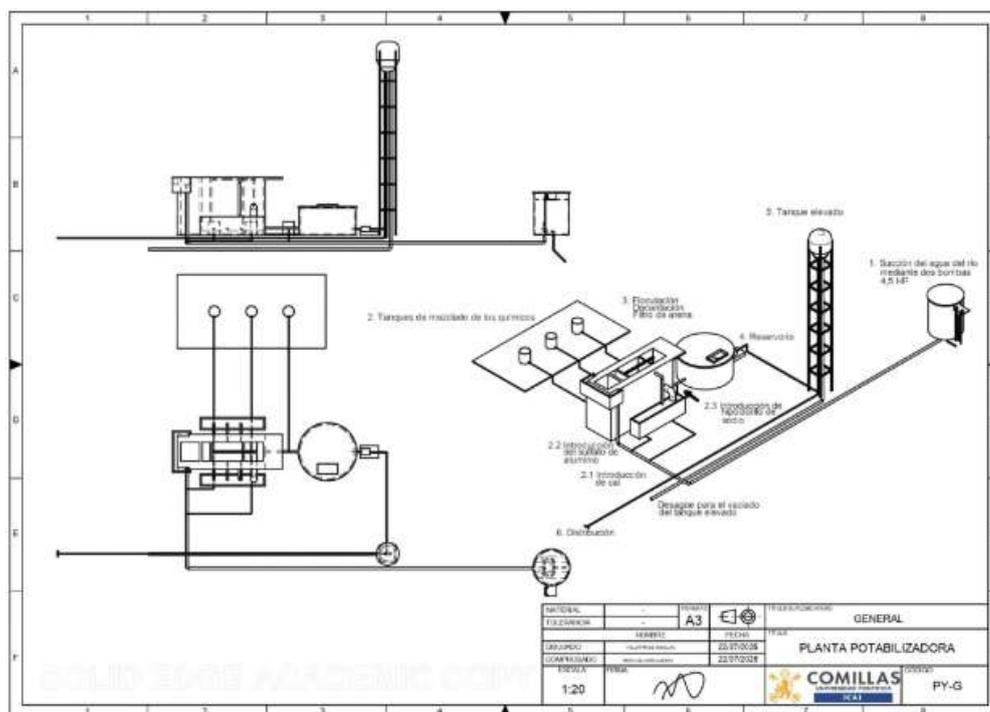


Figura 2: Vista general de la planta con alzado, planta y miniatura 3D con explicación  
Fuente: Creación propia

Además, se incorporó un análisis económico basado en el presupuesto realizado de la mano de la empresa *Ecosistema del Agua*, el cual contempla una inversión total de 130.700 USD, distribuida en 88.000 USD para la reactivación de la planta y 42.700 USD para la operación y mantenimiento durante el primer año. Este estudio, aunque referencial y pendiente de validación mediante una inspección técnica en terreno, ofrece una aproximación realista de los recursos necesarios y confirma la viabilidad económica del proyecto, así como su potencial de sostenibilidad a medio y largo plazo.

Ítem	Descripción	Precio (USD)
1	Visita técnica inicial e informe diagnóstico (inspección mecánica, eléctrica y de proceso).	3.000
2	Reparación y adecuación de la planta de tratamiento (electromecánico, dosificación, filtración, tableros, instrumentación y pruebas en frío).	82.000
3	Puesta en marcha, pruebas de desempeño y capacitación operativa.	3.000
<b>Subtotal Fase A – Reactivación</b>		<b>88.000</b>

Ítem	Descripción	Precio (USD)
4	Mantenimiento anual (visitas trimestrales): checklist mecánico/eléctrico, calibración de dosificación, limpieza de filtros, ajuste de parámetros y reporte técnico.	17.700
5	Insumos de operación anual: coagulante ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), hipoclorito de sodio, reposición de medios filtrantes, kits de sellos/empaques y consumibles.	25.000
<b>Subtotal Fase B – O&amp;M Año 1</b>		<b>42.700</b>

Todo el trabajo se ha desarrollado en estrecha colaboración con instituciones locales y empresas del sector, que aportaron información, apoyo técnico y validación de los planteamientos. No obstante, debe señalarse que se trata de un simulacro académico, cuyo objetivo no es ejecutar directamente la construcción o reparación de la planta, sino ofrecer un estudio integral que sirva de base para futuras intervenciones reales.

En definitiva, este proyecto integra el análisis del contexto social y ambiental de Bahía Negra, la evaluación técnica de las infraestructuras hídricas, el análisis normativo y de laboratorio de las muestras de agua, el diseño de planos de mejora, el estudio económico y la colaboración con agentes externos. El resultado es una propuesta completa, sostenible y realista, que responde a los retos de acceso al agua potable en comunidades

rurales aisladas y contribuye a la reflexión sobre cómo la ingeniería puede ponerse al servicio de las necesidades más básicas de la sociedad.

**Palabras Clave:** *Bahía Negra, Paraguay, Agua potable, Bajo coste, Normativa, Diagnóstico técnico y Análisis económico*

# Abstract

This Final Degree Project focuses on the design and improvement proposal of a water treatment system in the rural community of Bahía Negra, located in the northern Paraguayan Chaco. This region is characterized by geographical isolation, a complex socioeconomic situation, and high environmental vulnerability, all of which hinder access to basic resources such as safe drinking water. The current supply comes directly from the Paraguay River and reaches households without prior treatment, exposing the population to sanitary risks from physical, chemical, and microbiological contaminants. The local water treatment plant, built to address this issue, has been out of service since 2023 due to electrical failures, lack of maintenance, insufficient qualified personnel, and the municipality's limited financial capacity.



Figura 3: Bahía Negra Water Treatment Plant  
*Source: Own elaboration*

In response to this situation, the project combines a technical, social, and economic approach. First, a preliminary study of low-cost water treatment experiences in rural communities was carried out, identifying simple, sustainable, and easy-to-maintain technologies that could be adapted to the context of the Paraguayan Chaco. Subsequently, during the fieldwork stage, a detailed inspection of the treatment plant was conducted, including the measurement of each component, assessment of its operation, and identification of its main structural and operational failures. Water samples were

also collected at different points and analyzed against Paraguayan water quality regulations, with a comparative evaluation using Spanish legislation. The results confirmed the need to restore the treatment system, as fundamental parameters such as turbidity, coliforms, and dissolved solids were found to be non-compliant.

The technical diagnosis was completed with the evaluation of key elements such as the sand filter, which showed high clogging and reduced efficiency; the distribution network, which presented deficiencies in both layout and maintenance; and the plant's electrical system, which proved unstable and insufficient to ensure continuous service. This analysis made it possible not only to identify failures but also to propose realistic solutions adapted to local possibilities, including improvements in filtration systems, preventive maintenance, and community-based management.

As part of the project, technical drawings were developed to capture both the current state of the plant and the modifications required for its reactivation. These drawings serve as a key tool to understand the situation and to guide future interventions.

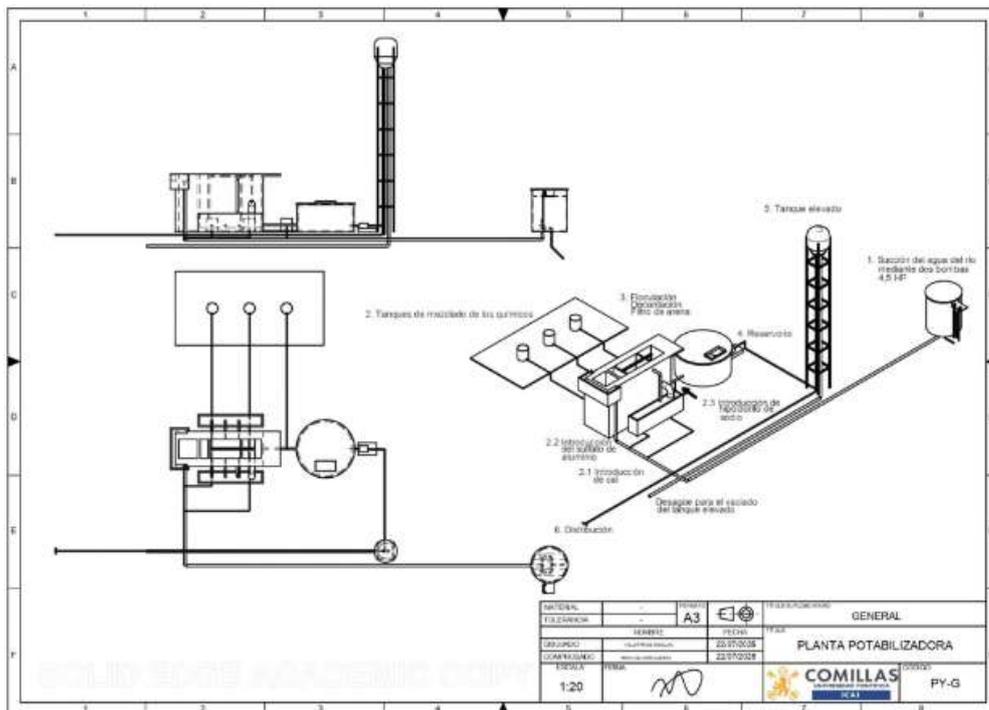


Figura 4: General view of the plant with elevation, floor plan, and 3D thumbnail with explanation

Source: Own elaboration

In addition, an economic analysis was carried out based on the budget prepared in collaboration with the company *Ecosistema del Agua*, which contemplates a total

investment of USD 130,700, distributed as USD 88,000 for the reactivation of the plant and USD 42,700 for operation and maintenance during the first year. Although this study is referential and subject to validation through an on-site technical inspection, it provides a realistic approximation of the required resources and confirms both the economic feasibility of the project and its potential for medium- and long-term sustainability.

Item	Description	Price (USD)
1	Initial technical visit and diagnostic report (mechanical, electrical, and process inspection).	3,000
2	Repair and refurbishment of the treatment plant (electromechanical, dosing, filtration, control panels, instrumentation, and cold tests).	82,000
3	Commissioning, performance testing, and operational training.	3,000
<b>Subtotal Phase A – Reactivation</b>		<b>88,000</b>

Item	Description	Price (USD)
4	Annual maintenance (quarterly visits): mechanical/electrical checklist, dosing calibration, filter cleaning, parameter adjustments, and technical report.	17,700
5	Annual operating supplies: coagulant ( $Al_2(SO_4)_3$ ), sodium hypochlorite, replacement of filter media, seal/gasket kits, and consumables.	25,000
<b>Subtotal Phase B – O&amp;M Year 1</b>		<b>42,700</b>

The entire project was developed in close collaboration with local institutions and sector-related companies, which provided valuable information, technical support, and validation of the proposed solutions. It should be noted, however, that this is an academic simulation, aimed not at directly executing the repair or construction of the plant, but at offering a comprehensive study to serve as a foundation for future real-world interventions.

Ultimately, this project integrates the social and environmental context of Bahía Negra, the technical assessment of water infrastructure, the regulatory and laboratory analysis of water samples, the design of improvement plans, the economic evaluation, and collaboration with external stakeholders. The result is a comprehensive, sustainable, and realistic proposal that addresses the challenges of access to safe drinking water in isolated rural communities and highlights how engineering can be applied in service of society's most basic needs.

**Keywords:** *Bahía Negra, Paraguay,; Drinking water,; Low cost,; Regulations,; Technical assessment and Economic analysis*

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación del proyecto . . . . .	1
1.2. Alcance y objetivos del proyecto . . . . .	2
1.3. Metodología del trabajo . . . . .	3
<b>2. Contexto geográfico, social y ambiental</b>	<b>5</b>
2.1. Localización y características geográficas de la zona . . . . .	5
2.2. Clima y estacionalidad . . . . .	9
2.3. Problemática medioambiental . . . . .	9
2.4. Situación socioeconómica de la población beneficiaria . . . . .	11
<b>3. Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible</b>	<b>14</b>
3.1. Objetivo 3: Salud y Bienestar . . . . .	14
3.2. Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento . . . . .	14
3.3. Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante . . . . .	14
3.4. Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles . . . . .	15
3.5. Objetivo 12: Producción y consumo responsables . . . . .	15
3.6. Objetivo 13: Acción por el clima . . . . .	15
<b>4. El ciclo del agua</b>	<b>16</b>
4.1. El ciclo de agua en Bahía Negra . . . . .	17
<b>5. Parámetros de control del agua</b>	<b>19</b>
5.1. Propiedades Físicas del agua . . . . .	19
5.1.1. Temperatura . . . . .	19
5.1.2. Color . . . . .	19
5.1.3. Olor y sabor . . . . .	20
5.1.4. Turbidez . . . . .	20
5.2. Propiedades Químicas del agua . . . . .	20
5.2.1. Conductividad . . . . .	20
5.2.2. pH . . . . .	20

5.2.3.	Oxígeno disuelto . . . . .	20
5.2.4.	Sólidos disueltos totales (TDS) . . . . .	21
5.2.5.	Dureza . . . . .	21
5.3.	Propiedades microbiológicas del agua . . . . .	21
5.3.1.	Bacterias . . . . .	21
5.3.2.	Virus . . . . .	23
5.4.	Normativa vigente de la calidad de agua para consumo humano en Pa- raguay . . . . .	23
5.5.	Comparativa con la normativa vigente de la calidad de agua para con- sumo humano en España . . . . .	27
<b>6.</b>	<b>Procesos de tratamiento del agua</b>	<b>31</b>
6.1.	E.T.A.P. . . . .	31
6.1.1.	Pretratamiento . . . . .	31
6.1.2.	Tratamiento estándar . . . . .	35
6.1.3.	Desinfección . . . . .	37
6.2.	E.T.A.P. de Bahía Negra . . . . .	39
6.3.	Sostenibilidad . . . . .	40
6.4.	Otros sistemas de potabilización . . . . .	42
6.4.1.	Sistema de potabilización de PCI . . . . .	42
6.4.2.	Sistemas de potabilización en las viviendas y el hospital . . . . .	44
<b>7.</b>	<b>Acceso actual al agua en Bahía Negra</b>	<b>46</b>
7.1.	Fuente de agua: el río Paraguay . . . . .	46
7.2.	Estructura actual del sistema de distribución . . . . .	47
7.2.1.	Planos de la planta de tratamiento . . . . .	54
7.3.	Métodos actuales de potabilización en el poblado . . . . .	58
<b>8.</b>	<b>Diagnóstico técnico</b>	<b>60</b>
8.1.	Análisis de las muestras de agua de Bahía Negra . . . . .	60
8.2.	Problemática actual observada en el campo de trabajo . . . . .	66
8.2.1.	Eléctrico . . . . .	66
8.2.2.	Caracterización del estado del filtro de arena . . . . .	67
8.2.3.	Mantenimiento . . . . .	70
8.2.4.	Gestión y operación . . . . .	72
<b>9.</b>	<b>Soluciones propuestas para restaurar la planta de tratamiento</b>	<b>73</b>
<b>10.</b>	<b>Estudio económico</b>	<b>75</b>
10.1.	Alcance general . . . . .	75

10.2. Desglose económico . . . . .	76
10.2.1. Supuestos y exclusiones . . . . .	77
10.2.2. Entregables . . . . .	77
10.2.3. Condiciones comerciales . . . . .	78
<b>11.Divulgación</b>	<b>79</b>
11.1. Educación a población infantil y juvenil . . . . .	79
11.2. Concienciación de la población adulta . . . . .	80
11.3. Formación técnica . . . . .	81
<b>12.Conclusiones y Trabajos Futuros</b>	<b>82</b>
12.1. Conclusiones . . . . .	82
12.2. Futuros Proyectos . . . . .	84
12.2.1. Estudio sobre la instalación de fuentes de energía renovables . .	84
12.2.2. Estudio del tratamiento de los residuos en Bahía Negra . . . . .	84
12.2.3. Proyección de una planta depuradora . . . . .	85
12.2.4. Educación y sensibilización ambiental comunitaria . . . . .	85

# Índice de figuras

1.	Planta potabilizadora Bahía Negra estado actual . . . . .	III
2.	Vista general de la planta con alzado, planta y miniatura 3D con explicación . . . . .	IV
3.	Bahía Negra Water Treatment Plant . . . . .	VII
4.	General view of the plant with elevation, floor plan, and 3D thumbnail with explanation . . . . .	VIII
1.1.	Mapa geográfico de Bahía Negra, Paraguay . . . . .	2
2.1.	Rutas de acceso intransitables en épocas de lluvia <i>Fuente: Creación propia</i>	6
2.2.	Visión más próxima del terreno <i>Fuente: Creación propia</i> . . . . .	6
2.3.	Avioneta de la Fuerza Aérea Paraguaya en la pista de tierra de Bahía Negra . . . . .	7
2.4.	Vista panorámica del río Paragua . . . . .	8
2.5.	Comparación de precipitaciones entre el periodo 1991-2020 y el año 2022 de Bahía Negra . . . . .	9
2.6.	Temperaturas del año 2022 en Bahía Negra, Paraguay . . . . .	10
2.7.	Mapa geográfico de Bahía Negra, Paraguay . . . . .	11
4.1.	El ciclo del agua . . . . .	16
4.2.	El ciclo del agua en Bahía Negra . . . . .	18
5.1.	Tabla de bacterias presentes en el agua . . . . .	22
5.2.	Valores mínimos y máximos de los requisitos químicos de a normativa paraguaya . . . . .	24
5.3.	Requisitos microbiológicos de la norma paraguaya. . . . .	25
5.4.	Requisitos organolépticos de la norma española . . . . .	27
5.5.	Parámetros indicadores de calidad de la norma española . . . . .	27
5.6.	Requisitos químicos de la norma española . . . . .	28
5.7.	Requisitos microbiológicos de la norma española . . . . .	29
6.1.	Etapas del proceso de potabilización del agua . . . . .	31

6.2.	Funcionamiento desbaste del pretratamiento del agua . . . . .	32
6.3.	Funcionamiento del tamizado rotativo . . . . .	33
6.4.	Funcionamiento del tamizado estático . . . . .	33
6.5.	Aireador de surtidor . . . . .	34
6.6.	Aireador de cascada . . . . .	35
6.7.	Aireador de bandejas múltiples . . . . .	35
6.8.	Coagulación, floculación y decantación del tratamiento estándar del agua	36
6.9.	Sistema de filtración por gravedad . . . . .	37
6.10.	Esquema del funcionamiento ideal de la planta . . . . .	39
6.11.	Estado actual del basurero comunal de Bahía Negra . . . . .	42
6.12.	Sistema de filtrado doble empleado en el hospita . . . . .	45
7.1.	Turbidez del río Paraguay tras el paso de un barco . . . . .	47
7.2.	Eichhornia crassipes presentes en el río Paraguay . . . . .	48
7.3.	Flor de acuapié presente en el río Paraguay . . . . .	48
7.4.	Captación de agua del río Paraguay . . . . .	49
7.5.	Motores y bombas de captación] <i>Fuente: Creación propia</i> . . . . .	49
7.6.	Estructura para las bomba <i>Fuente: Creación propia</i> . . . . .	49
7.7.	Mezcladoras con sus respectivos motores . . . . .	50
7.8.	Adición de la mezcla de sulfato de aluminio] <i>Fuente: Creación propia</i> .	50
7.9.	Adición de la mezcla del hipoclorito de sodio <i>Fuente: Creación propia</i> .	50
7.10.	Floculación] <i>Fuente: Creación propia</i> . . . . .	51
7.11.	Sedimentación <i>Fuente: Creación propia</i> . . . . .	51
7.12.	Lamelas de la decantación] <i>Fuente: Creación propia</i> . . . . .	52
7.13.	Tanques de vaciado <i>Fuente: Creación propia</i> . . . . .	52
7.14.	Filtro de arena] <i>Fuente: Creación propia</i> . . . . .	52
7.15.	Estructura de floculación, decantación y filtrado de arena <i>Fuente: Creación propia</i> . . . . .	52
7.16.	Reservorio] <i>Fuente: Creación propia</i> . . . . .	53
7.17.	Tanque elevado <i>Fuente: Creación propia</i> . . . . .	53
7.18.	Mapa de distribución de agua en Bahía Negra . . . . .	53
7.19.	Modelo 3D de la planta de tratamiento . . . . .	55
7.20.	Vista general de la planta con alzado, planta y miniatura 3D con explicación . . . . .	55
7.21.	Plano explicativo del filtro de arena con alzado y planta . . . . .	56
7.22.	Plano descriptivo de la planta con acotaciones . . . . .	56
7.23.	Plano acotado del reservorio . . . . .	57
7.24.	Plano del tanque elevado a 23 metros y la estructura que aloja los motores de succión . . . . .	58

8.1. Transformador en desuso . . . . .	68
8.2. Transformador del hospital . . . . .	68
8.3. Arena limpia del filtro . . . . .	69
8.4. Arena tamizada . . . . .	69
8.5. Piedras . . . . .	69
8.6. Motor sin tornillos debido a la corrosión de los mismos . . . . .	71
8.7. Motores y otros materiales quemados . . . . .	71
8.8. Estado actual del cableado de los motores . . . . .	71
11.1. Actividades en la escuela . . . . .	80
11.2. Actividades en la escuela . . . . .	80
12.1. Concienciación sobre el tratamiento de los residuos en Bahía Negra . . .	86
12.2. Explicación de la separación de los residuos para su posterior reciclaje .	87
12.3. Mapa conceptual sobre el tiempo de descomposición de distintos desechos	88
12.4. Funcionamiento de la planta de potabilización de Bahía Negra . . . . .	89

# Índice de tablas

8.1. Tabla de resultados análisis fisiológico agua del río antes de la distribución . . . . .	61
8.2. Tabla comparativa con la norma paraguaya de resultados análisis fisiológico agua del río antes de la distribución . . . . .	61
8.3. Tabla de resultados análisis microbiológicos agua del río antes de la distribución . . . . .	61
8.4. Tabla comparativa con la norma paraguaya de resultados análisis microbiológicos agua del río antes de la distribución . . . . .	62
8.5. Tabla de resultados análisis fisiológico agua del tanque (Agua cruda) .	63
8.6. Tabla comparativa con la norma paraguaya de resultados análisis fisiológico agua del tanque (Agua cruda) . . . . .	63
8.7. Tabla de resultados análisis microbiológicos de agua del tanque (agua cruda) . . . . .	63
8.8. Tabla comparativa con la norma paraguaya de resultados análisis microbiológicos de agua del tanque (agua cruda) . . . . .	63
8.9. Tabla de resultados análisis fisiológico agua del tanque (Agua cruda) .	65
8.10. Tabla comparativa con la norma paraguaya de resultados análisis fisiológico agua del tanque (Agua cruda) . . . . .	65
8.11. Tabla de resultados análisis microbiológicos de agua del tanque (agua cruda) . . . . .	65
8.12. Tabla comparativa con la norma paraguaya de resultados análisis microbiológicos de agua del tanque (agua cruda) . . . . .	65
8.13. Tabla de resultados análisis fisiológico agua del tanque (Agua cruda) .	68

# Agradecimientos

A nivel personal, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que han hecho posible esta experiencia, tanto en el plano académico como humano.

En primer lugar, agradezco a la Universidad Pontificia Comillas y a Comillas Solidaria por brindarme la oportunidad de participar en un proyecto de cooperación internacional en el que he podido aplicar los conocimientos adquiridos durante mi formación al servicio de una comunidad que lo necesita. En especial, mi agradecimiento a las profesoras Katia Hueso y Mar Cledera, por su implicación, su guía constante y su compromiso con que el trabajo tuviera un verdadero impacto. Su acompañamiento cercano ha sido fundamental en cada fase del proceso.

Asimismo, mi más sincero reconocimiento a la Asociación ECO Pantanal Bahía Negra. Gracias a Saúl, Gi y Ara, no solo hemos accedido a valiosa información de la comunidad, sino que también hemos podido integrarnos plenamente en su día a día. Su labor por la conservación del Chaco Paraguayo es admirable y constituye un verdadero ejemplo de compromiso y transformación social. En especial, gracias a Saúl, por su cercanía, paciencia y disposición constante para ayudar a entender la realidad de Bahía Negra con una mirada profunda y respetuosa.

También quiero dedicar unas palabras a mis compañeros de equipo: Blanca Méndez, Claudia Muñoz, Rodrigo López de Uralde y Olivier Denis. Esta experiencia ha sido verdaderamente inolvidable, y sin ellos no habría sido la misma. Su compañerismo, apoyo y entusiasmo han sido fundamentales no solo para el desarrollo del proyecto, sino también para mi propio crecimiento personal. He aprendido muchísimo de cada uno de ellos, dentro y fuera del ámbito técnico, y me siento muy afortunado de haber compartido este camino a su lado.

Finalmente, agradezco con todo mi respeto y afecto a la comunidad de Bahía Negra. Su generosidad, cercanía y disposición para colaborar nos han permitido comprender a fondo la problemática local, participar en actividades comunitarias y proponer so-

luciones de forma conjunta. Su hospitalidad ha superado cualquier expectativa, y me llevo una experiencia humana profundamente enriquecedora.

Aguyje Jajohechapeve (“Muchas gracias, hasta pronto” en Guaraní)



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación del proyecto

El acceso al agua potable constituye un derecho humano esencial y una condición imprescindible para garantizar la salud y el bienestar de la población. No obstante, en muchas regiones del mundo, especialmente en entornos rurales de países en desarrollo, este derecho no está garantizado. Es el caso de una comunidad situada en las inmediaciones del río Paraguay en el norte del Chaco paraguayo, en Bahía Negra, donde el agua consumida por la población procede directamente del río, sin tratamiento previo y sin control sistemático de su calidad.

Diversos estudios han evidenciado la presencia de coliformes fecales en el agua, debido al vertido directo de residuos por parte de residencias e instituciones públicas. Además, la planta de potabilización construida con anterioridad en la comunidad lleva sin funcionar desde 2023, como consecuencia de varios factores entre los que se encuentran la inestabilidad de la red eléctrica, la incapacidad del municipio de asumir los gastos que la planta generaba y la falta de personal cualificado. A ello se suman fenómenos climáticos extremos, como lluvias intensas, inundaciones y sequías, que afectan directamente a la disponibilidad y calidad del recurso hídrico.

Ante esta situación, el presente proyecto surge con el objetivo de analizar la problemática actual y diseñar una solución técnica de potabilización adaptada a las condiciones reales de la comunidad. La propuesta busca ser sostenible, de bajo coste, fácil mantenimiento y con participación de la población local.

Además de su dimensión técnica y social, este proyecto se desarrolla en el marco de una experiencia de voluntariado en el terreno, lo que permite una aproximación directa, contextualizada y comprometida con la realidad de la comunidad beneficiaria.



Figura 1.1: Mapa geográfico de Bahía Negra, Paraguay  
*Fuente: Presentación Fundación y WWF*

Participar en esta iniciativa supone también una oportunidad para aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo del grado, al tiempo que se contribuye de manera concreta a mejorar las condiciones de vida de otras personas. Este tipo de proyectos no solo permiten crecer como profesional, enfrentando retos técnicos y humanos complejos, sino también como persona, al fomentar una actitud de servicio, escucha activa y trabajo colaborativo con poblaciones vulnerables.

## 1.2. Alcance y objetivos del proyecto

Durante la estancia en terreno se llevará a cabo un diagnóstico técnico, sanitario y social del sistema actual de abastecimiento de agua, con el objetivo de comprender sus deficiencias, identificar sus potencialidades y proponer una solución adaptada a la realidad de la comunidad. Este análisis incluirá la evaluación de la calidad del agua actualmente consumida, prestando especial atención a los riesgos sanitarios asociados al uso de agua no tratada. También se analizarán las causas que han llevado al abandono de la planta de potabilización existente, tanto desde el punto de vista técnico como organizativo. La propuesta estará centrada en el tratamiento del agua mediante proce-

sos de filtración y eliminación de contaminantes microbiológicos, utilizando tecnologías apropiadas, de bajo coste y viables desde el punto de vista operativo. Se estudiarán distintas alternativas tecnológicas adecuadas para entornos rurales y tropicales, priorizando aquellas que puedan ser implementadas y mantenidas con recursos locales, evitando soluciones dependientes de energía o infraestructura compleja. A partir del diagnóstico realizado, se procederá al diseño de un sistema técnico viable, incluyendo su dimensionamiento, los materiales necesarios y una estimación económica realista que permita su ejecución.

Otro de los ejes fundamentales del proyecto será también la formación comunitaria que permita garantizar el mantenimiento del sistema en el tiempo. En este sentido, se valorará la creación de actividades con funciones educativas, divulgativas y lúdicas, orientadas tanto a la comunidad como a visitantes externos, relacionadas con la gestión del agua, la salud ambiental y la participación ciudadana. A través de visitas guiadas, talleres, recursos gráficos y didácticos, se pretende fomentar la conciencia sobre el valor del agua y, al mismo tiempo, generar ingresos que puedan destinarse al funcionamiento y sostenimiento del sistema de potabilización.

Además, se valorará el impacto potencial del proyecto en términos sanitarios, sociales y ambientales, de forma que la propuesta final no solo contribuya a mejorar la calidad del agua, sino que fortalezca la autonomía local y promueva un modelo de gestión sostenible que no dependa de intervenciones externas permanentes.

### 1.3. Metodología del trabajo

El desarrollo del proyecto se estructura en tres fases principales: análisis previo, trabajo de campo y propuesta técnica.

#### **Fase 1: Análisis previo y revisión documental**

Se realizará una revisión bibliográfica sobre sistemas de potabilización en contextos rurales, así como sobre normativas nacionales e internacionales aplicables a la calidad del agua. Se estudiarán tecnologías convencionales y alternativas, con especial atención a aquellas que han sido implementadas con éxito en comunidades con condiciones similares.

#### **Fase 2: Trabajo de campo en Paraguay**

Durante la estancia de voluntariado, se llevará a cabo un análisis técnico y social de la situación local. Se inspeccionará el estado de las infraestructuras hídricas, se realizarán entrevistas con miembros de la comunidad y se tomarán muestras de agua

para su análisis. Esta fase permitirá conocer de forma directa las necesidades, recursos y limitaciones del entorno y se implementará la solución que, después del estudio, mejore el sistema de potabilización. Se incluirá el diseño del proceso de tratamiento, selección de materiales, cálculo de costes y recomendaciones para su implementación y mantenimiento.

### **Fase 3: Evaluación de impacto**

Una vez finalizado el trabajo de campo, se realizará una evaluación del impacto previsto sobre la salud de la población y la sostenibilidad del sistema propuesto.

## Capítulo 2

# Contexto geográfico, social y ambiental

El aislamiento que sufren los territorios del norte de Paraguay responde a una compleja interacción de factores históricos, geográficos, socioeconómicos y políticos. Se trata de una región mayoritariamente rural, donde persisten altos niveles de desigualdad respecto a las zonas urbanas del país. Esta brecha se manifiesta tanto en la distribución de las ayudas económicas como en el acceso a oportunidades de desarrollo. En comunidades como la de Bahía Negra, la renta per cápita puede llegar a ser inferior a 60 dólares mensuales en ciertos sectores de la población, lo que evidencia una situación de precariedad económica. Además, una parte considerable de los habitantes presenta menores niveles de cobertura sanitaria y educativa, lo que agrava las condiciones de vulnerabilidad y limita el bienestar de las comunidades locales.

### 2.1. Localización y características geográficas de la zona

Bahía Negra se encuentra en el extremo norte del departamento de Alto Paraguay, dentro de la región del Chaco paraguayo, sobre la margen derecha del río Paraguay y en la confluencia con el río Cabaçal. El distrito, situado a una altitud aproximada de 75 metros y a más de 130 kilómetros de Fuerte Olimpo, capital departamental, abarca una superficie superior a los 35.000 km<sup>2</sup>, lo que lo convierte en uno de los más extensos del país. No obstante, presenta una población muy reducida y una densidad demográfica extremadamente baja, una característica común en toda la región chaqueña.

El departamento de Alto Paraguay, formado por Puerto Casado, Fuerte Olimpo, Carmelo Peralta y Bahía Negra, ocupa una franja al norte de la Región Occidental, limitado por Bolivia y Brasil. Su territorio presenta un paisaje característico del Chaco

paraguayo, compuesto por extensas zonas llanas, boscosas y de difícil acceso, en las que se alternan áreas abiertas con árboles de maderas duras como el quebracho y el palo santo.

La ubicación geográfica de Bahía Negra le confiere un papel estratégico en términos hidrográficos, al formar parte del principal corredor fluvial del país. No obstante, esta misma localización conlleva importantes desafíos logísticos. El aislamiento territorial es una constante: las rutas de acceso terrestre, con una extensión cercana a los 1000 kilómetros desde Asunción, no están pavimentadas y resultan intransitables durante buena parte del año debido a las lluvias o crecidas del río.



Figura 2.1: Rutas de acceso intransitables en épocas de lluvia  
*Fuente: Creación propia*



Figura 2.2: Visión más próxima del terreno  
*Fuente: Creación propia*

En este contexto, el transporte aéreo mediante avionetas de la Fuerza Aérea Paraguaya se convierte con frecuencia en la única vía de acceso estable, con una frecuencia de viajes que oscila entre una o dos veces semanales. Sin embargo, esta alternativa también está sujeta a las condiciones climáticas, ya que la pista de aterrizaje es de tierra y puede volverse inutilizable con precipitaciones mínimas.

Bahía Negra cuenta además con un puerto fluvial, que ofrece una opción adicional de transporte. El trayecto desde Concepción, que en avioneta dura aproximadamente una hora, requiere alrededor de tres días y medio por vía fluvial, debido a la baja



Figura 2.3: Avioneta de la Fuerza Aérea Paraguaya en la pista de tierra de Bahía Negra

*Fuente: Creación propia*

velocidad de navegación, que no supera los 12 km/h.

Este contexto de aislamiento, sumado a las condiciones ambientales de la zona, hace imprescindible el desarrollo de soluciones autosuficientes y sostenibles, especialmente en áreas prioritarias como el acceso al agua potable. Asimismo, la presencia de comunidades indígenas y de áreas naturales protegidas en el territorio introduce una dimensión sociocultural y ecológica clave a tener en cuenta en el diseño e implementación de cualquier intervención.

Desde el punto de vista geomorfológico, el terreno de Bahía Negra forma parte de una extensa llanura aluvial. La zona está atravesada por un sistema fluvial meandrante, recorriendo el cauce del río curvas amplias que generan una dinámica constante de erosión y deposición de sedimentos que dan pie a la formación de diversas geoformas deposicionales. Se han identificado las barras en pontal, que se forman en el interior de los meandros donde la corriente es más lenta; las barras centrales, acumulaciones de sedimentos que dividen el flujo del río en distintos brazos; los diques marginales, que se crean de manera natural en los bordes del cauce por el arrastre de sedimentos durante las crecidas; y las barras submersas, que permanecen bajo el nivel del agua y modifican localmente el perfil hidráulico del río.



Figura 2.4: Vista panorámica del río Paragua

*Fuente: Creación propia*

Este tipo de relieve tiene implicaciones directas en la captación y tratamiento del agua. Las zonas donde se acumulan sedimentos finos presentan mayores niveles de turbidez y requieren soluciones de filtración más eficaces, mientras que las zonas con mayor velocidad de flujo pueden ser útiles para la captación si se desea evitar la acumulación de sólidos.

La caracterización de los sedimentos del lecho fluvial es esencial para cualquier intervención técnica relacionada con el agua, y en el caso de Bahía Negra se ha realizado mediante los métodos de peneiramento y pipetagem. El primero se utiliza para determinar la proporción de partículas de mayor tamaño, como gravas y arenas, haciendo pasar el sedimento seco por una serie de tamices ordenados por tamaños decrecientes. Esto permite conocer con precisión la distribución de partículas gruesas en una muestra dada. Por su parte, el método de pipetagem es necesario para analizar la fracción más fina del sedimento, limos y arcillas, que no se puede separar mediante tamices. En este caso, el material se mezcla con agua y se deja en reposo, tomando muestras a distintas profundidades y tiempos con una pipeta y calculando la velocidad a la que sedimentan las partículas. Este análisis, además de aportar datos geotécnicos útiles, es crucial para dimensionar sistemas de filtrado, ya que influye en la selección de materiales filtrantes y en el diseño de los procesos de pretratamiento.

Se han registrado profundidades promedio que oscilan entre los 23 centímetros, velocidades del flujo que van desde los 0,32 a más de 0,53 metros por segundo, y caudales que pueden ir desde 1,54 m<sup>3</sup>/s hasta alcanzar los 9 m<sup>3</sup>/s en puntos de drenaje

intenso.

## 2.2. Clima y estacionalidad

La región experimenta fuertes contrastes estacionales, lo que tiene un impacto directo en la disponibilidad hídrica. En términos de precipitación, el periodo normal entre 1991 y 2020 muestra un promedio de 830 mm anuales. Sin embargo, en el año 2022 solo se registraron 411 mm, lo que indica una marcada disminución. Esta baja pluviosidad, sumada a la alta evapotranspiración y a la acción de los vientos secos del norte, contribuye a un ambiente árido y desafiante para el mantenimiento de recursos hídricos estables. En los años de sequía, esta situación se agrava, propiciando incendios forestales cuyas cenizas pueden comprometer la calidad del agua. Los niveles del río

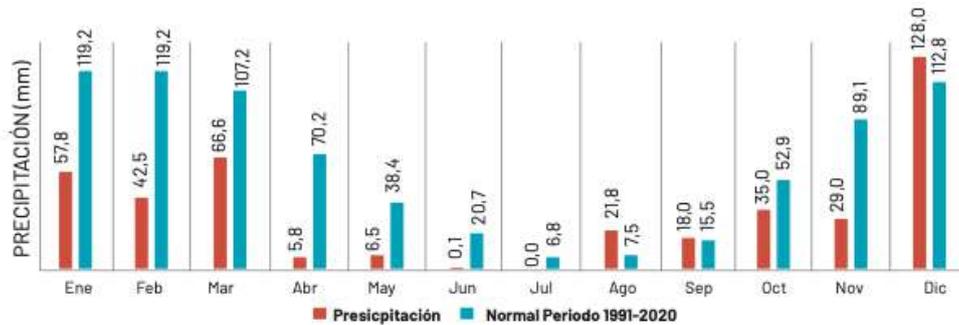


Figura 2.5: Comparación de precipitaciones entre el periodo 1991-2020 y el año 2022 de Bahía Negra

Fuente: DINAC, 2023

Paraguay suelen ser bajos entre noviembre y marzo, coincidiendo con la temporada de menor precipitación.

Bahía Negra forma parte de una de las zonas más calurosas de Paraguay. Según datos de la Dirección de Meteorología e Hidrología (2022), se registraron 131 días con temperaturas entre los 35 y 40°C, y 45 días superaron los 40°C, concentrándose principalmente en los meses de verano. En contraste, entre mayo y agosto no se alcanzaron estas temperaturas extremas.

## 2.3. Problemática medioambiental

Bahía Negra, al igual que muchas otras zonas del Chaco paraguayo, enfrenta una elevada vulnerabilidad frente a los efectos del cambio y la variabilidad climática. Esta

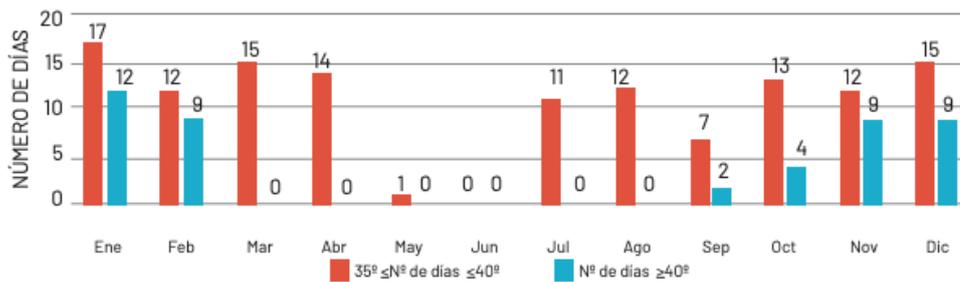


Figura 2.6: Temperaturas del año 2022 en Bahía Negra, Paraguay  
Fuente: DINAC, 2023

situación se expresa en fenómenos extremos cada vez más frecuentes, como olas de calor prolongadas, lluvias intensas y sequías severas, que afectan tanto a la estabilidad de los ecosistemas como a las condiciones de vida de la población local.

La biodiversidad del distrito depende estrechamente del equilibrio hídrico estacional. El territorio alberga zonas de gran valor ecológico como el Pantanal, áreas de bosques xerofíticos y sabanas con especies adaptadas a condiciones climáticas extremas. Sin embargo, la alteración de los patrones de lluvia y temperatura amenaza los ciclos reproductivos y alimentarios de muchas especies, y compromete la continuidad de prácticas tradicionales como la pesca o la recolección.

El comportamiento irregular de los ríos endorreicos, característico de la región, representa otro desafío. Estos cursos fluviales, que solo llevan agua durante la temporada de lluvias, pueden permanecer secos durante meses y luego desbordarse rápidamente en eventos de precipitación intensa. Este comportamiento impredecible complica el acceso constante y seguro al agua. Además, provoca una degradación progresiva de los suelos: por un lado, la escorrentía, el agua de lluvia que corre por la superficie cuando el suelo no la absorbe, arrastra la capa fértil en las zonas llanas; y por otro, en áreas con médanos, el viento levanta y dispersa las partículas del suelo seco, generando erosión eólica y dejando el terreno aún más empobrecido y vulnerable.

Esta degradación ambiental se ve intensificada por la fragilidad natural del ecosistema, la presión sobre los recursos y la falta de infraestructura para enfrentar eventos climáticos extremos. Frente a ello, Paraguay ha asumido compromisos internacionales como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el Acuerdo de París. A nivel local, el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES) ha impulsado la elaboración de planes de adaptación municipalizados. En el caso de Bahía Negra, se ha desarrollado un Plan Local de Acción Climática y Gestión de Riesgos que busca fortalecer la resiliencia comunitaria a través de la identificación

de amenazas, la mejora de capacidades locales y la promoción de soluciones sostenibles adaptadas al contexto rural y aislado del distrito.

## 2.4. Situación socioeconómica de la población beneficiaria

Bahía Negra enfrenta importantes retos sociales y estructurales. La población, de aproximadamente 2.500 habitantes, se caracteriza por ser mayoritariamente joven: el 30 % tiene menos de 14 años y el 60 % menos de 64, lo que refleja la necesidad de oportunidades educativas y laborales que eviten la migración y favorezcan el arraigo local. Muchas familias viven en viviendas básicas que suelen ser de una planta a ras de suelo, o en caso de las que están a orillas del río, elevadas a unos 3 metros del suelo por pilares de madera. Las paredes suelen ser de madera o ladrillo y los techos siempre son de chapa de aluminio. La comunidad cuenta con un hospital con servicios de urgencias y respiratorio; aunque no dispone de farmacia local, el hospital tiene medicamentos necesarios para el día a día de los pacientes, aunque en caso de complicaciones médicas, se traslada a los pacientes al hospital más cercano en Concepción. La educación se limita a niveles iniciales (4-6 años) y básicos (6-18 años), sin oferta de formación técnica. Para acceder a formaciones superiores, la única alternativa es cursar estudios en ciudades más grandes como Asunción o Concepción.

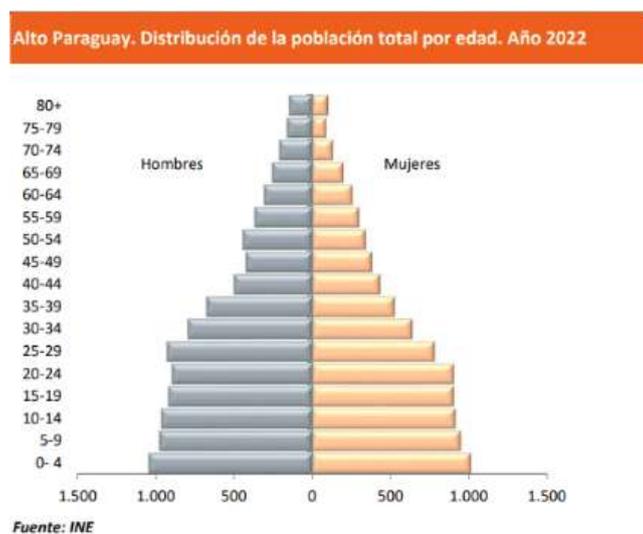


Figura 2.7: Mapa geográfico de Bahía Negra, Paraguay  
Fuente: *Presentación Fundación y WWF*

En materia de servicios básicos, el acceso a agua potable sigue siendo limitado.

Aunque la mayoría tiene conexión a una red, esta solo provee agua cruda sin tratamiento, lo que incide en problemas de salud como enfermedades gastrointestinales y parasitarias, comunes especialmente en época de lluvias por la mayor turbidez del agua. La cobertura de energía eléctrica existe, pero depende de un generador a gasoil, y las vías de comunicación son precarias. La mayoría de los hogares tienen ingresos informales y una parte importante de la población complementa su sustento con trabajos esporádicos o artesanías, siendo frecuente el trabajo de las mujeres y niños en tareas remuneradas fuera del hogar.

Por otro lado, Bahía Negra también cuenta con la proximidad de Comunidades Indígenas, siendo la más cercana Puerto Diana, situándose a pocos kilómetros del centro de la comunidad. Existe una relación de convivencia entre los dos pueblos, ya que los indígenas acuden a Bahía Negra para servicios de salud, educación (desde el noveno grado) y comercio. A pesar de la convivencia, también existen diferencias entre ellos, sobre todo en sus culturas, que a veces pueden entrar en conflicto. Sus formas de ver la vida y sus tradiciones pueden provocar malentendidos, por lo que existen agentes sociales que se encargan de garantizar que los niños estén escolarizados y vacunados mediante becas que se dan cuando se cumplen ciertos requisitos, como comprobar que se cuide la convivencia entre las comunidades.

La economía del distrito de Bahía Negra se basa en actividades de baja escala, mayoritariamente ligadas a la explotación directa de los recursos naturales disponibles. El tejido productivo formal es muy limitado: en 2010 apenas se registraban 21 unidades económicas activas en todo el distrito, empleando a 44 personas, con una ligera mayoría de mujeres en el sector. El comercio representa la actividad predominante dentro del pequeño ecosistema empresarial local, seguido por algunos servicios básicos. Este nivel de actividad refleja la escasa generación de empleo y la falta de alternativas productivas diversificadas.

Las formas de sustento varían notablemente entre pobladores indígenas y no indígenas. Mientras que estos últimos suelen dedicarse a la ganadería extensiva, la pesca o el pequeño comercio, los primeros mantienen prácticas más tradicionales, como la caza, la recolección de productos naturales como miel, el cultivo de huertas familiares y la elaboración de artesanía, que a menudo se comercializa de manera informal.

A nivel departamental, la ganadería representa una de las principales actividades económicas, con una presencia significativa de grandes establecimientos. En zonas como Agua Dulce, próximas al distrito, operan asociaciones que concentran miles de cabezas de ganado y hectáreas destinadas al cultivo de soja, trigo o sorgo. Sin embargo, estos

emprendimientos suelen tener escaso vínculo con la economía cotidiana de la comunidad de Bahía Negra, que queda al margen de los beneficios generados. Por el contrario, es precisamente esta comunidad una de las que suele concentrar los efectos negativos derivados de dichas actividades, como la contaminación del suelo y del agua, la pérdida de biodiversidad y el deterioro ambiental asociado al avance de la frontera ganadera.

Por otro lado, el potencial turístico del distrito, gracias a su biodiversidad, los humedales y espacios protegidos como el Parque Nacional Río Negro, se presenta como una oportunidad aún poco desarrollada. Aunque la zona atrae cierto interés por parte de investigadores y visitantes interesados en la naturaleza, la falta de infraestructuras adecuadas y la dificultad de acceso suponen obstáculos importantes para que esta actividad se consolide como motor económico local.

De acuerdo con WWF-Paraguay, la región enfrenta además retos críticos como la vulnerabilidad social y la limitada capacidad de las comunidades para fortalecer su economía local de forma sostenible. Esto evidencia la necesidad de impulsar proyectos de desarrollo comunitario que diversifiquen las fuentes de ingreso y mejoren la calidad de vida en un territorio con grandes recursos, pero escasos medios para transformarlos en bienestar para su gente.

# Capítulo 3

## Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible

### 3.1. Objetivo 3: Salud y Bienestar

El proyecto aborda una necesidad básica de la comunidad al contribuir directamente a la reducción de enfermedades derivadas del consumo de agua sin tratar. Al garantizar que las familias tengan acceso a agua más segura para beber y preparar alimentos, se mejora la salud general y se previenen afecciones frecuentes como diarreas e infecciones, impactando de forma positiva en la calidad de vida y el bienestar de la población.

### 3.2. Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento

El proyecto impulsa el acceso equitativo a agua de mejor calidad mediante la rehabilitación de la planta de potabilización y la optimización de los procesos de captación, filtrado y distribución. Esto permite reducir la dependencia de fuentes de agua sin tratamiento y fortalece la gestión local del recurso, sentando bases para mejorar las condiciones de saneamiento básico y promover un uso más seguro y eficiente del agua en la comunidad.

### 3.3. Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante

El proyecto se apoya en una fuente de electricidad renovable, ya que la energía que abastece a la planta provendría de la presa hidroeléctrica de Itaipú, cuya generación es 100 % limpia por su origen hidráulico. Además, contempla la posibilidad de incorporar sistemas de generación complementaria, como la instalación de paneles solares u otras alternativas sostenibles, para garantizar un suministro más estable y accesible que

reduzca la dependencia de combustibles fósiles.

### **3.4. Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles**

El proyecto refuerza la sostenibilidad de Bahía Negra al mejorar un servicio básico esencial como el acceso a agua apta para consumo, fortaleciendo la infraestructura local y promoviendo prácticas comunitarias que favorecen la gestión responsable de los recursos. Además, se prevé la implementación de soluciones de tratamiento de residuos en la zona, contribuyendo a que la comunidad pueda asentarse de forma más segura y limpia, generando condiciones que ayudan a evitar migraciones forzadas y manteniendo la cohesión social.

### **3.5. Objetivo 12: Producción y consumo responsables**

El proyecto fomenta prácticas de consumo y producción más responsables al optimizar el tratamiento del agua para reducir pérdidas y contaminación, y promover un uso consciente de un recurso vital en la zona. Además, impulsa la adopción de soluciones técnicas y materiales adecuados que prolongan la vida útil de la infraestructura, minimizando residuos y la necesidad de reemplazos constantes. Con ello se contribuye a instalar hábitos de uso eficiente y gestión responsable de los recursos disponibles dentro de la comunidad.

### **3.6. Objetivo 13: Acción por el clima**

El proyecto contribuye a fortalecer la resiliencia de la comunidad frente a los efectos del cambio climático al asegurar un acceso más estable y seguro al agua potable, recurso cada vez más vulnerable en zonas expuestas a sequías o inundaciones. Además, al contemplar fuentes de energía renovable como la solar, se reduce la dependencia de combustibles fósiles, lo que ayuda a disminuir emisiones locales y a promover prácticas más sostenibles de adaptación y mitigación.

# Capítulo 4

## El ciclo del agua

El agua constituye un recurso esencial para la vida en la Tierra y un elemento clave en el equilibrio de los ecosistemas. Desde tiempos remotos se ha considerado como una sustancia fundamental, y hoy se sabe que es el compuesto químico más abundante y con mayor impacto en la organización de la naturaleza y en las actividades humanas.

La estabilidad de este recurso se debe a un proceso natural conocido como ciclo hidrológico o ciclo del agua, que, a lo largo de millones de años, ha permitido que el agua se renueve de forma continua. Se trata de un mecanismo dinámico en el que el agua circula por la atmósfera, la superficie y el subsuelo, alternando entre sus tres estados: sólido, líquido y gaseoso. La energía solar impulsa este movimiento al provocar la evaporación desde mares, ríos y lagos, así como la transpiración de la vegetación, generando vapor de agua que más tarde se condensa y retorna a la superficie en forma de precipitaciones.

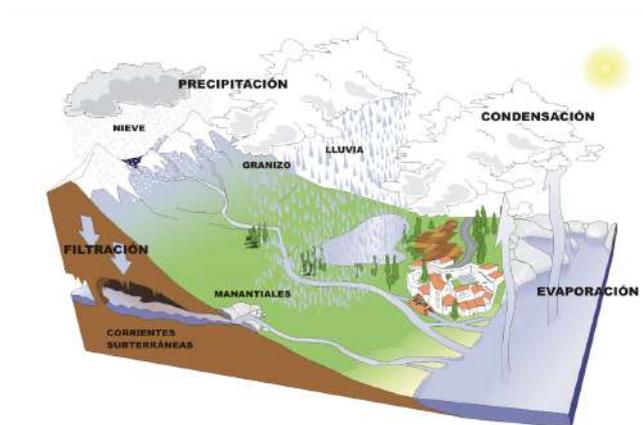


Figura 4.1: El ciclo del agua

*Fuente: Banco de imágenes y sonidos (INTEF)*

En términos globales, se estima que la Tierra dispone de unos 1.400 millones de

km<sup>3</sup> de agua. Sin embargo, la mayor parte, alrededor del 97,5 %, corresponde a agua salada contenida en mares y océanos. El agua dulce representa únicamente el 2,5 % del total y, dentro de esta fracción, gran parte se encuentra almacenada en glaciares o en capas de hielo, por lo que solo una proporción muy limitada está disponible en ríos, lagos y acuíferos. Esta cantidad, aunque reducida, es la que sustenta la vida terrestre y constituye la base para el abastecimiento humano.

El agua dulce que puede ser utilizada procede principalmente de dos orígenes: por un lado, la escorrentía superficial generada por las precipitaciones que alimentan cursos de agua y humedales; y, por otro, la escorrentía subterránea, resultado de la infiltración que recarga los acuíferos. Ambos recursos se emplean en la captación para el consumo humano, aunque presentan características distintas. En el caso de las aguas subterráneas, suelen encontrarse con una mayor concentración de sales disueltas y un contenido reducido de oxígeno disuelto, lo que condiciona los tratamientos necesarios para su potabilización.

## 4.1. El ciclo de agua en Bahía Negra

En el caso de Bahía Negra, el ciclo del agua adquiere características particulares debido a la forma en que se organiza el abastecimiento y la disposición de los residuos hídricos. El agua destinada al consumo se capta directamente del río Paraguay y se distribuye a las viviendas del municipio.

Una vez utilizada en los hogares, el agua residual sigue dos posibles trayectorias. En algunos casos, se vierte a pozos absorbentes o letrinas tradicionales. Este sistema permite que el agua percole a través del suelo, lo que genera una filtración parcial de contaminantes físicos y biológicos antes de reincorporarse al subsuelo y, de manera más lenta, al propio río. Sin embargo, este tipo de estructuras carecen de impermeabilización y control sanitario, por lo que los procesos de infiltración no garantizan una eliminación completa de microorganismos ni de compuestos químicos, representando un riesgo para los acuíferos y la calidad ambiental.

La segunda vía de evacuación es el vertido directo sobre la superficie del terreno, sin pasar por sistemas de tratamiento o retención. Este vertido favorece que el agua residual escurra hacia zonas más bajas del pueblo, alcanzando con rapidez el cauce fluvial. Dado que la planta de captación se ubica en la parte inferior de la localidad, el río recibe aportes contaminados aguas arriba del punto de toma. Este fenómeno aumenta la probabilidad de que se produzca un ciclo de retroalimentación negativa: el agua captada para abastecimiento puede contener contaminantes vertidos previamente por

la propia población, lo que compromete la calidad del recurso y exige un tratamiento posterior más riguroso.

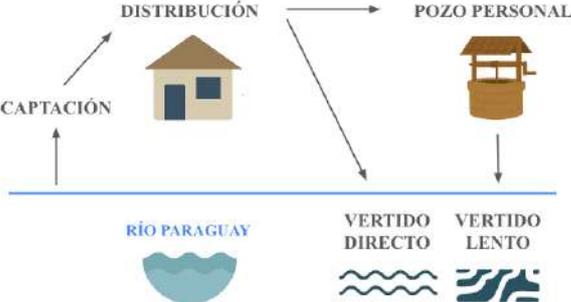


Figura 4.2: El ciclo del agua en Bahía Negra  
*Fuente: creación propia*

# Capítulo 5

## Parámetros de control del agua

Este apartado introduce los principales parámetros que deben monitorearse para garantizar la calidad del agua, así como los tratamientos necesarios para corregirlos y mantenerlos dentro de los valores aceptables. El agua, especialmente en estado líquido como ocurre con las aguas subterráneas, está formada por agregados moleculares  $H_2O$  que le confieren una notable reactividad química. Esta característica hace del agua un excelente disolvente, y al mismo tiempo, la vuelve vulnerable a alteraciones en sus propiedades físicas y químicas.

### 5.1. Propiedades Físicas del agua

#### 5.1.1. Temperatura

La temperatura del agua depende de su origen. En aguas superficiales está influida por la radiación solar, mientras que en aguas subterráneas depende del tipo de terreno. Afecta la solubilidad de gases y sales, y por tanto influye directamente en el pH, la conductividad y en la actividad biológica del agua. Temperaturas altas pueden favorecer el crecimiento microbiano y aumentar la turbidez, mientras que temperaturas bajas dificultan procesos como la coagulación y la decantación, posteriormente explicados.

#### 5.1.2. Color

El color puede deberse a materia orgánica en descomposición o a sales disueltas, especialmente en aguas subterráneas. Aunque no siempre representa un riesgo sanitario, un color elevado suele indicar una mayor carga contaminante y puede interferir con la eficacia de los desinfectantes.

### 5.1.3. Olor y sabor

Estos parámetros pueden originarse por compuestos naturales, como el ácido sulfhídrico en ambientes anaerobios, o por sales minerales como hierro, manganeso o cloruros. También microorganismos como bacterias, hongos o algas pueden generar compuestos que afectan al olor y sabor.

### 5.1.4. Turbidez

Provocada por partículas en suspensión (arcillas, limos, materia orgánica, microorganismos), la turbidez es un indicador importante de contaminación. Aguas con alta turbidez suelen requerir un tratamiento más intensivo, ya que esta condición puede proteger a los patógenos de la acción de los desinfectantes.

## 5.2. Propiedades Químicas del agua

### 5.2.1. Conductividad

Relacionada con la concentración de sales disueltas, la conductividad varía según el terreno que atraviesa el agua. Es un buen indicador de la mineralización y sirve como parámetro de referencia para detectar posibles contaminaciones inorgánicas.

### 5.2.2. pH

El pH indica el grado de acidez o alcalinidad del agua, determinado por la concentración de iones hidrógeno. En aguas superficiales suele situarse entre 6,5 y 8,5, mientras que en aguas subterráneas tiende a ser más bajo debido a la composición del terreno.

Valores extremos de pH pueden afectar tanto la salud como las infraestructuras. Un pH bajo favorece procesos de corrosión en la red de distribución, pudiendo liberar metales como hierro o cobre, mientras que un pH alto puede alterar el sabor del agua y reducir la eficacia de la desinfección con cloro.

Mantener el pH dentro del rango recomendado es esencial para garantizar la potabilidad del agua y la eficiencia de los procesos de tratamiento.

### 5.2.3. Oxígeno disuelto

Es un parámetro fundamental para la vida acuática y la estabilidad del agua. En aguas superficiales se renueva constantemente, pero en aguas subterráneas, suele estar

presente en niveles muy bajos. Su ausencia suele estar asociada a una mayor presencia de hierro y manganeso.

#### **5.2.4. Sólidos disueltos totales (TDS)**

Incluyen minerales, sales y materia orgánica en solución. Aunque no suponen necesariamente un riesgo sanitario, niveles elevados pueden afectar al sabor, aumentar la dureza y señalar la presencia de contaminantes.

#### **5.2.5. Dureza**

Se refiere al contenido de calcio y magnesio disueltos en el agua. La dureza depende del tipo de terreno que atraviesa el agua. Aguas calizas suelen ser más duras, mientras que aquellas provenientes de terrenos graníticos tienden a ser blandas. Aunque no es peligrosa, una dureza elevada puede generar incrustaciones y afectar el rendimiento de equipos domésticos e industriales.

### **5.3. Propiedades microbiológicas del agua**

La calidad microbiológica del agua se ve afectada por la presencia de microorganismos, algunos de los cuales pueden ser patógenos y representar un riesgo para la salud humana. Su presencia está directamente relacionada con la posible transmisión de enfermedades de origen hídrico.

#### **5.3.1. Bacterias**

Las bacterias son microorganismos unicelulares que pueden desarrollarse en distintos tipos de agua, dependiendo de factores como la temperatura, la materia orgánica disponible, la turbidez o la salinidad. Según su mecanismo de crecimiento pueden ser heteroótrofas, si usan fuentes de carbono orgánico, o autótrofas, si usan dióxido de carbono. Si usan oxígeno son aerobias, mientras que, de lo contrario, son anaerobias.

Entre las especies más preocupantes por su potencial patógeno destacan *Salmonella*, *Escherichia coli*, *Legionella* o *Helicobacter pylori*, así como bacterias oportunistas. *Salmonella* y *E. coli* están relacionadas con infecciones gastrointestinales que provocan síntomas como diarrea, fiebre o vómitos. *Legionella*, por su parte, puede originar infecciones respiratorias graves, como la legionelosis, especialmente en personas con el sistema inmunitario debilitado. *Helicobacter pylori* es una bacteria que puede sobrevivir en el estómago humano y está asociada a la aparición de gastritis, úlceras e incluso ciertos tipos de cáncer gástrico. Además de estas especies, también se iden-

tifican bacterias oportunistas, que aunque normalmente no afectan a personas sanas, pueden provocar infecciones en individuos con defensas bajas, como niños, ancianos o personas con enfermedades crónicas.

En el control de calidad del agua, se utiliza el grupo de los coliformes como indicador de contaminación fecal. Este grupo incluye, entre otros, *E. coli*, *Klebsiella* o *Enterobacter*.

<b>Bacterias de forma simple (eubacterias)</b>		
<b>Cocos</b>		
Grampositivos	Aerobios Anaerobios	<i>Micrococcus</i> <i>Sarcina</i>
Grampositivos	Aerobios	<i>Paracoccus, Lampropedia</i>
<b>Bacilos sin espora</b>		
Gramnegativos Heterótrofos	Aerobios	<i>Pseudomonas, Zooglea, Azotobacter, Methylomonas, Alcaligenes, Photobacterium</i>
Quimioautótrofos	Anaerobios Aerobios	<i>Fusobacterium</i> <i>Nitrobacter, Thiobacillus</i>
<b>Bacilos con espora</b>		
Grampositivos	Aerobios Anaerobios	<i>Bacillus, Clostridium</i> <i>Desulmofaculatum</i>
<b>Células curvas o espirales</b>		
Gramnegativas	Aerobias Anaerobias	<i>Vibrio, Bdellovibrio</i> <i>Spirillum, Desulfovibrio</i>
<b>Bacterias de forma compleja</b>		
<b>Bacterias fototróficas</b>		
Bacterias púrpura Chromatiáceas	Aerobias	<i>Choromatium, Thiocustis, Thispirillum, Thiocapsa, Thidioctyibm Thiopedia, Ectothiorhodospira</i>
<b>Rhodospirilláceas</b>	Microaerófilas	<i>Rhodospirillum, Rhodopseudomonas, Rhodomicrobium</i>
Clorobacterias Chlorobiáceas	Anaerobias	<i>Chlorobium, Prosthecochloris, Pelodictyon, Clathrochloris</i>
<b>Bacterias vaginadas</b>	Aerobias	<i>Sphaerotilus, Laptothrix, Crenothrix</i>
<b>Bacterias pediculadas</b>	Aerobias	<i>Hyphomicrobium, Rhodomicrobium, Caulobacter, Gallionella, Nevskia</i>
<b>Actinomicetos</b>	Aerobios	
Bacterias corinneformes Actinomicetos genuinos		<i>Corynebacterium, Arthrobacter</i> <i>Nocardia, Streptomyces, Actinoplanes</i>
<b>Espiroquetas</b>	Aerobias, Anerobias	<i>Spirochaeta, Cristispira, Treponema, Leptospira</i>
<b>Myoplasmas</b>		<i>Thermoplasma?, Metallogenium?</i>
<b>Bacterias reptantes</b>	Aerobias, Anaerobias	
Beggiatoáceas Cytophagáceas		<i>Beggiatoa, Thioploca</i> <i>Cytophaga, Sporocytophaga, Flexibacter, Flexithrix</i>
Leucothricháceas		<i>Leucothrix, Thiothrix</i>

Figura 5.1: Tabla de bacterias presentes en el agua  
Fuente: *Fisicoquímica y Microbiología de los medios acuáticos*

### 5.3.2. Virus

Los virus son partículas infecciosas extremadamente pequeñas, que necesitan un huésped para reproducirse. El agua puede actuar como vehículo de transmisión de virus entéricos, responsables de enfermedades gastrointestinales y hepáticas.

Entre los más comunes en aguas contaminadas se encuentran el virus de la hepatitis A, el rotavirus, el adenovirus y los enterovirus. Su detección resulta más compleja que la de las bacterias, por lo que su control requiere procesos de desinfección eficaces y constantes.

## 5.4. Normativa vigente de la calidad de agua para consumo humano en Paraguay

En Paraguay, el marco regulatorio que establece los parámetros para la calidad del agua destinada al consumo humano se encuentra definido en la Norma Paraguaya NP 24 001 80. Esta norma fija los límites máximos permisibles de sustancias físicas, químicas y microbiológicas presentes en el agua potable, con el objetivo de garantizar su inocuidad y aptitud para el consumo humano.

La norma clasifica los parámetros de calidad del agua en varias categorías:

#### ■ Características físicas:

- El aspecto del agua debe ser límpido, es decir, sin presencia visible de partículas en suspensión o turbidez evidente. En cuanto al color, se indica que debe mantenerse dentro de un límite conveniente igual o inferior a 15 unidades de color verdadero (UCV), expresadas según la escala Platino/Cobalto (Pt/Co), que sirve como referencia estándar internacional para medir el color del agua.
- Respecto al olor y el sabor, ambos deben ser aceptables para el consumidor, lo que implica que el agua no debe presentar características organolépticas objetables o que generen rechazo. En relación con la turbidez, esta no debe superar las 5 unidades nefelométricas de turbidez (UTN), un valor que permite asegurar la claridad del agua y la ausencia de partículas coloidales que podrían interferir con procesos de desinfección o indicar contaminación.
- La normativa también establece un límite para los sólidos totales disueltos (STD), que no deben superar los 600 mg/L. Una concentración elevada de STD puede

afectar negativamente tanto el sabor del agua como su efecto sobre la salud a largo plazo. Finalmente, la conductividad eléctrica, que es un indicador indirecto de la cantidad de sales disueltas en el agua, debe mantenerse por debajo de los 1.250 microsiemens por centímetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Un valor superior puede señalar una excesiva concentración de minerales o sales inorgánicas, lo que afecta la calidad general del recurso hídrico.

- **Características químicas inorgánicas:** se establecen límites para sustancias como el arsénico (máximo 0,05 mg/L), el flúor (1,5 mg/L), el nitrato (45 mg/L) y el hierro (0,3 mg/L), entre otros. Estos elementos, si se encuentran en concentraciones superiores a las permitidas, pueden representar un riesgo para la salud pública.

COMPONENTE	VALOR MÍNIMO (mg/l)	VALOR MÁXIMO (mg/l)
Arsénico (As)	--	0,05
Cromo (Cr) total	--	0,05
Fluoruro (F)	--	1,50
Nitrato (como $\text{NO}_3^-$ )	--	45,00
Nitrito (como $\text{NO}_2^-$ )	--	0,1
N-Amoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ )	--	0,05
Materia orgánica (como $\text{O}_2$ ) <sup>1</sup>	--	3
Cloro libre residual ( $\text{Cl}_2$ )	0,2	2,0
Manganeso (Mn)	--	0,4
Calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ )	--	200
Magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ )	--	50
Sodio (Na)	--	200
Potasio <sup>2</sup>	--	--
pH en UpH <sup>3</sup>	4	9
Alcalinidad (F) <sup>4</sup> como $\text{CaCO}_3$	--	120
Alcalinidad total como $\text{CaCO}_3$	--	250
Dureza total como $\text{CaCO}_3$	--	400
Cloruro como $\text{Cl}^-$	--	250
Sulfato como $\text{SO}_4^{-2}$	--	250
Sólidos totales a 105°C	--	1 000
Hierro total ( $\text{Fe}^{+3}$ )	--	0,3

<sup>1</sup> Para determinaciones efectuadas con los Métodos Normalizados, se designa a la oxidabilidad como el conjunto de la materia orgánica y los metales oxidables.  
<sup>2</sup> El valor límite está determinado por el sabor.  
<sup>3</sup> Se admite una tolerancia de pH entre 5,0 a 9,0 para aguas subterráneas, sin sistemas de distribución.  
<sup>4</sup> Fenolftaleína.

Figura 5.2: Valores mínimos y máximos de los requisitos químicos de a normativa paraguaya

Fuente: Norma Paraguaya NP 24 001 80

- Características microbiológicas:** uno de los puntos más críticos de la norma es la exigencia de ausencia total de coliformes totales y fecales o termotolerantes en 100 mL de muestra (<1,1 NMP), garantizando así que el agua no esté contaminada por microorganismos patógenos que puedan provocar enfermedades de origen hídrico. El recuento de aerobios mesófilos no debe superar las 500 UFC/mL, ya que este grupo de bacterias, aunque no necesariamente patógenas, sirve como indicador del estado general de higiene y posible contaminación reciente. De manera más específica, la presencia de *Escherichia coli* en el agua también debe ser nula, al ser un marcador directo de contaminación fecal reciente y potencial portadora de cepas patógenas peligrosas para la salud humana. Asimismo, se establece la ausencia de *Pseudomonas aeruginosa* (<2 NMP), un microorganismo oportunista que, si bien no es de origen fecal, puede proliferar en sistemas hídricos mal mantenidos y representar un riesgo para personas inmunocomprometidas.

MICROORGANISMO	LÍMITES MÁXIMOS
Aerobios Mesófilos	500 UFC/ml
Coliformes Totales, en 100 ml	0 UFC < 1,1 NMP Ausencia
Coliformes Fecales o Termotolerantes a $44,5 \pm 0,2$ °C, en 100 ml	0 UFC < 1,1 NMP Ausencia
<i>Escherichia coli</i> , en 100 ml	0 UFC < 1,1 NMP Ausencia
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , en 100 ml	0 UFC < 2 NMP Ausencia

Figura 5.3: Requisitos microbiológicos de la norma paraguaya.

Fuente: Norma Paraguaya NP 24 001 80

Donde UFC es el recuento en placa, NMP es el de tubos múltiples y ausencia es el cualitativo.

- Desinfectantes y subproductos de la desinfección:**
- En los sistemas convencionales de tratamiento de agua potable, es común el uso de sustancias químicas como coagulantes y desinfectantes. En el caso de la comunidad objeto de estudio, la planta de tratamiento empleaba sulfato de aluminio para la coagulación y sedimentación de partículas, y cloro como agente desinfectante. Ambos compuestos, si bien eficaces, deben utilizarse con un control riguroso para evitar la presencia de residuos perjudiciales en el agua final.

- Aunque la Norma Paraguaya NP 24 001 80 no establece un límite específico para el contenido residual de aluminio en el agua potable, se advierte que su uso excesivo como coagulante puede dejar trazas en el agua tratada. De acuerdo con las recomendaciones internacionales, como las elaboradas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), en condiciones operativas óptimas de plantas de tratamiento grandes, se pueden lograr concentraciones residuales de aluminio por debajo de 0,1 mg/L, mientras que en plantas de menor escala, como las de ciertas comunidades rurales, un valor práctico aceptable se sitúa en 0,2 mg/L. Exceder estos niveles podría tener implicaciones tanto para la salud como para la calidad estética del agua (olor, sabor y turbidez).
- En cuanto a la desinfección con cloro, aunque la norma paraguaya no fija un rango obligatorio de cloro residual libre en el punto de distribución, sí establece límites estrictos para los subproductos resultantes de la cloración. Estos compuestos, si bien no están presentes en el cloro en sí, se generan al reaccionar con materia orgánica disuelta en el agua y pueden representar un riesgo sanitario considerable.
- Entre los subproductos regulados se encuentran el bromato (límite máximo permisible de 107 µg/L), el clorato y clorito (700 µg/L cada uno), y los trihalometanos totales (300 µg/L), con mención específica al cloroformo (300 µg/L), bromodiclorometano y dibromoclorometano (100 µg/L cada uno). Estos últimos han sido asociados a efectos carcinógenos en exposiciones prolongadas, razón por la cual la norma advierte que no deben superarse ciertos umbrales de riesgo.

Esta normativa es aplicable a todas las fuentes de agua destinadas al abastecimiento de la población, ya sean sistemas centralizados, como plantas de tratamiento convencionales, o sistemas comunitarios de menor escala. En este sentido, cualquier infraestructura de tratamiento debe cumplir estrictamente con los valores establecidos por la NP 24 001 80 para que el agua pueda considerarse potable.

En el caso particular de la comunidad objeto de este estudio, la inactividad de la planta de tratamiento y el retorno al consumo directo de agua del río Paraguay sin tratamiento previo representa una vulneración directa de los criterios mínimos exigidos por la normativa vigente. Esta situación pone en riesgo la salud de la población, al no garantizarse el cumplimiento de los parámetros de calidad microbiológica ni de otros indicadores clave.

Por tanto, cualquier propuesta técnica orientada a la reactivación del sistema de tratamiento o a la implementación de soluciones alternativas deberá considerar como requisito indispensable el cumplimiento íntegro de la Norma Paraguaya NP 24 001 80, tanto en la fase de diseño como en la operación y el monitoreo de la calidad del agua.

## 5.5. Comparativa con la normativa vigente de la calidad de agua para consumo humano en España

En España, la normativa que regula la calidad del agua de consumo humano se encuentra recogida en el Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, mediante el cual se transpone al ordenamiento jurídico nacional la Directiva (UE) 2020/2184. Este decreto establece los valores paramétricos que deben cumplir los sistemas de abastecimiento en relación con los parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua, así como los procedimientos de control, muestreo y responsabilidad de las autoridades competentes. Se trata, por tanto, de un marco legal que, al igual que la Norma Paraguaya NP 24 001 80, busca garantizar la seguridad sanitaria del agua y la protección de la salud pública.

	<b>Parámetro</b>	<b>Valor de referencia</b>	<b>Unidad</b>	<b>Nota</b>
56	Color	15	mg/L Pt/Co	
57	Olor	3	Índice dilución	
58	Sabor	3	Índice dilución	

Figura 5.4: Requisitos organolépticos de la norma española

*Fuente: Real Decreto 3/2023*

En el ámbito de las características físicas y organolépticas, ambas normativas coinciden en exigir que el agua presente un aspecto límpido, un color inferior a 15 unidades Pt/Co y un olor y sabor aceptables para el consumidor.

	<b>Parámetro</b>	<b>Valor Paramétrico</b>	<b>Unidad</b>	<b>Nota</b>
38	Bacterias coliformes.	0	UFC o NMP / 100 ml	1
39	Recuento de colonias a 22 °C.	100	UFC / 1 ml	2
40	Colifagos somáticos.	0	UFP / 100 ml	3
41	Aluminio.	200	µg/L	4
42	Amonio.	0,50	mg/L	5
43	Carbono Orgánico total.	5,0	mg/L	6
44	Cloro combinado residual.	2,0	mg/L	7
45	Cloro libre residual.	1,0	mg/L	8
46	Cloruro.	250	mg/L	9
47	Conductividad.	2500	µS/cm a 20 °C	10
48	Hierro.	200	µg/L	11
49	Manganeso.	50	µg/L	12
50	Oxidabilidad.	5,0	mg/L	13
51	pH.	6,5 a 9,5	Unidades pH	14
52	Sodio.	200	mg/L	15
53	Sulfato.	250	mg/L	16
54	Turbidez.	4,0	UNF	17
55	Índice de Langelier.	+/- 0,5	Unidades de pH	18

Figura 5.5: Parámetros indicadores de calidad de la norma española

*Fuente: Real Decreto 3/2023*

Sin embargo, el tratamiento de la turbidez es más estricto en el caso español, donde se fija un valor de 4 unidades nefelométricas de turbidez en red y, de forma más detallada, un máximo de 0,8 unidades a la salida de la estación de tratamiento, con un objetivo operativo de 0,3 unidades en el proceso de filtración. En Paraguay, por su parte, el límite se sitúa en 5 unidades, lo cual representa un estándar menos exigente. En cuanto a la concentración de sales, Paraguay establece un límite máximo de 600 mg/L para los sólidos totales disueltos y una conductividad inferior a 1.250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que España no fija un valor específico para los sólidos disueltos y permite una conductividad de hasta 2.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En este sentido, la norma paraguaya se muestra más restrictiva que la española.

	Parámetro	Valor Paramétrico	Unidad	Nota
5	Acrilamida (CAS 79-06-01).	0,10	$\mu\text{g}/\text{L}$	1
6	Antimonio.	10	$\mu\text{g}/\text{L}$	
7	Arsénico.	10	$\mu\text{g}/\text{L}$	
8	Benceno (CAS 71-43-2).	1,0	$\mu\text{g}/\text{L}$	
9	Benzo(a)pireno (CAS 50-32-8).	0,010	$\mu\text{g}/\text{L}$	
10	Bisfenol a (CAS 80-05-7).	2,5	$\mu\text{g}/\text{L}$	
11	Boro.	1,5	$\text{mg}/\text{L}$	2
12	Bromato.	10	$\mu\text{g}/\text{L}$	
13	Cadmio.	5,0	$\mu\text{g}/\text{L}$	
14	Cianuro total.	50	$\mu\text{g}/\text{L}$	
15	Clorato.	0,25	$\text{mg}/\text{L}$	3
16	Clorito.	0,25	$\text{mg}/\text{L}$	3
17	Cloruro de Vinilo (CAS 75-01-4).	0,50	$\mu\text{g}/\text{L}$	1
18	Cobre.	2,0	$\text{mg}/\text{L}$	
19	Cromo total.	25	$\mu\text{g}/\text{L}$	4
20	1,2-Dicloroetano (CAS 107-06-2).	3,0	$\mu\text{g}/\text{L}$	
21	Epiclorhidrina (CAS 106-89-8).	0,10	$\mu\text{g}/\text{L}$	1
22	Fluoruro.	1,5	$\text{mg}/\text{L}$	
23	Mercurio.	1,0	$\mu\text{g}/\text{L}$	
24	Microcistina – LR.	1,0	$\mu\text{g}/\text{L}$	5
25	Níquel.	20	$\mu\text{g}/\text{L}$	
26	Nitrato.	50	$\text{mg}/\text{L}$	6
27	Nitritos.	0,50	$\text{mg}/\text{L}$	6 y 7
28	Plaguicida individual.	0,10	$\mu\text{g}/\text{L}$	8 y 9
29	Plomo.	5,0	$\mu\text{g}/\text{L}$	10
30	Selenio.	20	$\mu\text{g}/\text{L}$	11
31	Uranio.	30	$\mu\text{g}/\text{L}$	
	Parámetros sumatorios (Nota 19):			
32	$\sum 5$ Ácidos Haloacéticos (HAH).	60	$\mu\text{g}/\text{L}$	12
33	$\sum 4$ Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (HPA).	0,10	$\mu\text{g}/\text{L}$	13
34	$\sum 20$ PFAS.	0,10	$\mu\text{g}/\text{L}$	14 y 15
35	$\sum n$ Plaguicidas totales.	0,50	$\mu\text{g}/\text{L}$	16
36	$\sum 2$ Tricloroetano + Tetracloroetano.	10	$\mu\text{g}/\text{L}$	17
37	$\sum 4$ Trihalometanos (THM).	100	$\mu\text{g}/\text{L}$	18

Figura 5.6: Requisitos químicos de la norma española

Fuente: Real Decreto 3/2023

Respecto a los parámetros químicos, pueden identificarse diferencias significativas. La NP 24 001 80 establece, por ejemplo, un límite máximo de 0,05 mg/L para el ar-

sénico, mientras que el Real Decreto español reduce este valor a 10 µg/L, es decir, cinco veces más estricto. En el caso del flúor, ambas normativas coinciden en el valor máximo permisible de 1,5 mg/L. En lo relativo al nitrato, Paraguay adopta un límite de 45 mg/L, más restrictivo que los 50 mg/L admitidos en España, aunque la norma española añade la condición combinada con nitritos, lo que permite un control más fino del riesgo sanitario. El hierro se regula en Paraguay con un máximo de 0,3 mg/L, mientras que en España aparece como parámetro indicador con un límite de 0,2 mg/L, lo que implica un control similarmente riguroso. En relación con el aluminio residual derivado del uso de coagulantes, la normativa paraguaya no establece un valor específico, mientras que la española fija un límite de 200 µg/L como valor indicativo.

Las mayores diferencias aparecen en lo que respecta a los subproductos de la desinfección. Paraguay establece valores permisibles de 107 µg/L para el bromato, 700 µg/L para clorato y clorito, y 300 µg/L para los trihalometanos totales. España, en cambio, endurece considerablemente estos parámetros, al fijar límites de 10 µg/L para el bromato, 250 µg/L para clorato y clorito, y 100 µg/L para trihalometanos. Además, la normativa española incorpora límites para compuestos no considerados en Paraguay, como los ácidos haloacéticos (60 µg/L) o las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS), con un máximo de 0,10 µg/L para la suma de veinte de ellas. Esto refleja un enfoque mucho más estricto y actualizado en relación con los contaminantes emergentes y los riesgos asociados a la desinfección química.

	<b>Parámetro</b>	<b>Valor Paramétrico</b>	<b>Unidad</b>	<b>Nota</b>
1	<i>Escherichia coli</i> .	0	UFC o NMP en 100 ml	
2	<i>Enterococo intestinal</i> .	0	UFC o NMP en 100 ml	
3	<i>Clostridium perfringens</i> (incluidas las esporas).	0	UFC en 100 ml	1
4	<i>Legionella spp.</i>	100	UFC en 1 L	2 y 3

Figura 5.7: Requisitos microbiológicos de la norma española

Fuente: Real Decreto 3/2023

En lo que respecta a los parámetros microbiológicos, tanto Paraguay como España coinciden en exigir la ausencia de *Escherichia coli* en 100 mL de muestra. La diferencia principal radica en que Paraguay establece también la ausencia de coliformes totales y termotolerantes, así como de *Pseudomonas aeruginosa* en <2 NMP, mientras que España sustituye estos indicadores por otros de mayor valor sanitario, como la ausencia de enterococos intestinales y de *Clostridium perfringens*, cuya detección está directamente relacionada con la presencia de contaminación fecal persistente o resistente a los procesos de potabilización. Además, en el caso español se establece un valor paramétrico para *Legionella spp.* de 100 UFC/L, especialmente relevante en entornos asistenciales y sistemas de riesgo, algo que no figura en la normativa paraguaya. Ambos marcos coinciden, sin embargo, en exigir la ausencia de bacterias indicadoras de contamina-

ción fecal y en la necesidad de garantizar un recuento microbiológico bajo que refleje la higiene general del sistema de distribución.

Teniendo en cuenta esta normativa, España establece controles mucho más severos para los subproductos de la desinfección y amplía la lista de parámetros microbiológicos, incorporando indicadores de contaminación persistente que no aparecen en la NP 24 001 80. Estas diferencias responden tanto a un mayor alineamiento de España con los estándares de la Unión Europea como a la incorporación de riesgos emergentes que aún no han sido regulados en Paraguay. En consecuencia, cualquier propuesta técnica para la reactivación de la planta de tratamiento de Bahía Negra debería, como mínimo, cumplir con la normativa nacional vigente, pero también resultaría recomendable incorporar algunos de los criterios más exigentes del Real Decreto 3/2023. De esta forma se garantizaría no solo la conformidad con la Norma Paraguaya NP 24 001 80, sino también un margen de seguridad adicional frente a contaminantes químicos y biológicos que pueden comprometer la salud de la población a largo plazo.

# Capítulo 6

## Procesos de tratamiento del agua

El agua es un recurso esencial para la vida, pero el agua que se encuentra en la naturaleza; en ríos, embalses o acuíferos, no siempre reúne las condiciones necesarias para el consumo humano. Por ello, es imprescindible someterla a un proceso de potabilización, que consiste en aplicar distintas técnicas físicas, químicas y biológicas hasta garantizar que cumpla con los criterios de calidad definidos por la normativa vigente (en Paraguay, el NP 24 001 80 para agua potable y la Ley 1614/00 para agua bruta).

### 6.1. E.T.A.P.

El proceso de potabilización del agua se lleva a cabo en las estaciones de tratamiento de agua potable (E.T.A.P.), que son instalaciones diseñadas para transformar el agua bruta procedente de ríos, embalses o acuíferos en agua segura y apta para el consumo humano. En términos generales, el proceso se organiza en varias etapas sucesivas que se adaptan a las características iniciales del agua. Estas son el pretratamiento tras la captación, el tratamiento estándar y la desinfección para una distribución segura.



Figura 6.1: Etapas del proceso de potabilización del agua

*Fuente: Creación propia*

#### 6.1.1. Pretratamiento

En primer lugar, se realiza el pretratamiento, cuyo objetivo es acondicionar el agua para las fases posteriores del tratamiento. Dependiendo de su calidad, esta fase puede

incluir distintas operaciones.

Una de ellas es el desbaste y el tamizado, cuyo objetivo principal es reducir el contenido de residuos sólidos.

El desbaste elimina los sólidos de gran tamaño mediante rejillas instaladas en los canales de entrada. Estas rejillas, construidas con barras de acero dispuestas vertical o inclinadamente, permiten el paso del agua mientras retienen los elementos sólidos. El diseño de estas estructuras considera aspectos como el tamaño de las barras, la separación entre ellas, su inclinación y la velocidad del flujo. Existen rejillas manuales, con separación entre 25 y 50 mm, que se limpian con un rastrillo, y son ideales para plantas pequeñas. En cambio, las rejillas mecánicas incorporan peines automatizados que recogen los residuos y los transportan mediante cintas.



Figura 6.2: Funcionamiento desbaste del pretratamiento del agua

Fuente: GEDAR

En el proceso de tamizado se emplean rejillas más finas que retienen partículas pequeñas en suspensión. Son sistemas simples y de bajo coste. Los tamices más comunes son los rotativos y los estáticos. Los rotativos consisten en un tambor cilíndrico que gira, permitiendo que el agua lo atraviese mientras los sólidos quedan retenidos y se eliminan con agua a presión. Los tamices estáticos, sin piezas móviles, permiten que los sólidos se deslicen por gravedad hacia un colector, siendo más económicos, pero con mayor pérdida de carga.

Por otro lado, la aireación es una operación que busca poner en contacto el agua con el aire, con el objetivo de modificar la concentración de sustancias volátiles disueltas. Gracias a esta etapa, se eliminan compuestos orgánicos volátiles, se aumenta el oxígeno disuelto lo cual favorece a organismos vivos y procesos posteriores y se reducen gases como dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, metano, cloro y amoníaco. Además, se

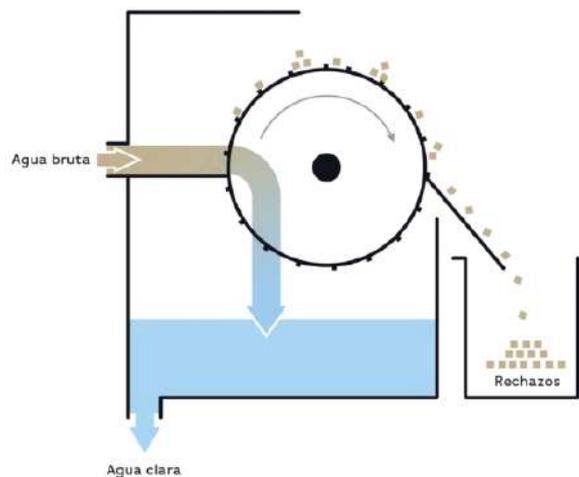


Figura 6.3: Funcionamiento del tamizado rotativo  
Fuente: SERTAM

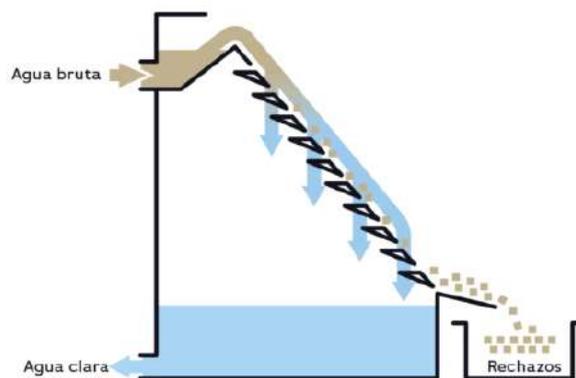


Figura 6.4: Funcionamiento del tamizado estático  
Fuente: SERTIS

favorece la oxidación de metales como el hierro y el manganeso, y se eliminan olores y sabores desagradables.

El rendimiento del proceso de aireación depende de factores como la temperatura del agua, el pH y el tiempo de aireación. A mayor temperatura, mayor volatilidad, mientras que un pH adecuado también favorece la eliminación de ciertos gases. Según la primera Ley de Fick y la teoría de la capa líquida estacionaria, que explican cómo los gases atraviesan la interfase entre el aire y el agua, la velocidad de transferencia de oxígeno depende de varios factores físicos y operacionales:

- Área de contacto entre el aire y el agua

La transferencia de gases es más eficaz cuando existe una gran superficie de contacto entre ambas fases. Por ello, los sistemas de aireación suelen fragmentar el agua en gotas o láminas finas mediante fuentes o cascadas, lo que incrementa exponencialmente esa superficie y, en consecuencia, la eficiencia del proceso.

- **Coefficiente de transferencia de oxígeno**

Este coeficiente representa la facilidad con la que el oxígeno se transfiere del aire al agua. Su valor depende de variables como la temperatura, la agitación, la presión y el tipo de sistema utilizado. A mayor coeficiente, mayor será la velocidad de transferencia.

- **Déficit de saturación**

Se define como la diferencia entre la concentración de oxígeno disuelto actual en el agua y la concentración que tendría si estuviera en equilibrio con el aire (saturación). Cuanto mayor sea este déficit, mayor será el gradiente de concentración, y por tanto, más rápida será la transferencia.

Existen diferentes configuraciones tecnológicas para llevar a cabo la aireación, que varían en diseño, eficiencia, coste y espacio requerido. En primer lugar, los aireadores de surtidor lanzan el agua en gotas finas al aire mediante toberas o boquillas, generando un efecto visual atractivo, pero ocupando mucho espacio y presentando un alto consumo energético. Por otro lado, los aireadores de cascada hacen descender el agua por escalones, incrementando la superficie de contacto. Estos son eficientes y económicos. Por último, los sistemas de bandejas múltiples permiten el paso del agua por varias bandejas perforadas, facilitando un contacto continuo con el aire.

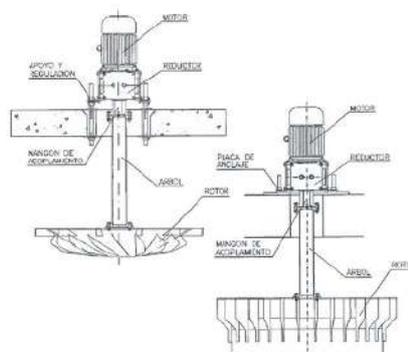


Figura 6.5: Aireador de surtidor

Fuente: *Hidrometálica*

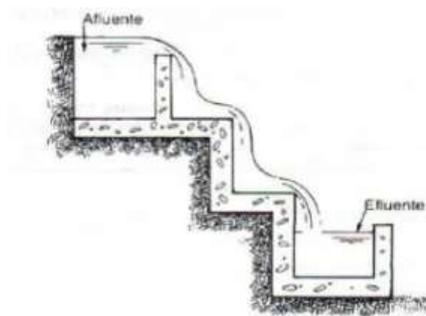


Figura 6.6: Aireador de cascada

Fuente: *Curso de plantas de tratamiento; Junio2020; Paola Castiblanco*

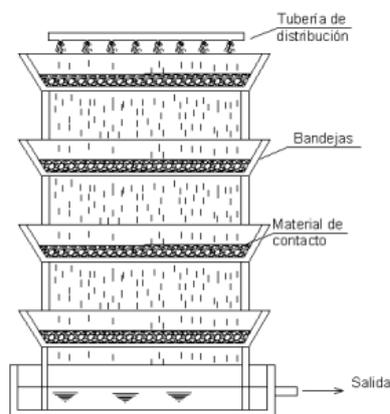


Figura 6.7: Aireador de bandejas múltiples

Fuente: *Proyecto de tesis; Universidad de Nariño*

Por último, la preoxidación química se basa en añadir agentes oxidantes al agua en las primeras etapas del tratamiento para mejorar la eficiencia de los procesos posteriores. Los oxidantes más utilizados son el cloro gas, los hipocloritos, el permanganato potásico y el dióxido de cloro. La aplicación de cloro gas se conoce como precloración y permite oxidar y precipitar metales como hierro y manganeso, mejorar la coagulación, suavizar el agua, y controlar el crecimiento de algas. Aunque también tiene cierto efecto desinfectante, no es su objetivo principal.

### 6.1.2. Tratamiento estándar

Una vez finalizado el pretratamiento, se lleva a cabo el tratamiento estándar, formado por varios procesos que se complementan entre sí para eliminar partículas y contaminantes presentes en el agua. Forman parte de un proceso físico-químico cuyo fin es transformar partículas no sedimentables en partículas sedimentables.

En primer lugar, se realiza la sedimentación, donde las partículas más grandes,

superiores a unas 200 micras y no floculadas, se depositan en el fondo por efecto de la gravedad. Después se produce la coagulación, que tiene como propósito neutralizar las cargas eléctricas de las partículas coloidales, facilitando su unión. Para ello, se añaden coagulantes como el cloruro férrico, el sulfato ferroso, el cloruro de aluminio o el sulfato de aluminio.

La mezcla rápida y homogénea de estos productos con el agua es esencial, y se consigue mediante agitadores o turbulencia hidráulica. En la etapa de floculación, las partículas ya desestabilizadas colisionan entre sí para formar agregados más grandes llamados flóculos. Aquí, la mezcla debe ser más lenta para evitar romper los flóculos, y se lleva a cabo en tanques similares a los de coagulación, pero con menor velocidad de agitación.

Finalmente, la decantación permite la sedimentación de los flóculos bajo el efecto de la gravedad. Se utilizan decantadores de diferentes formas según el tamaño de la planta. Las grandes instalaciones emplean tanques circulares mecanizados, mientras que en las pequeñas se utilizan decantadores estáticos, de fondo inclinado y forma circular o rectangular, por su simplicidad y menor coste.

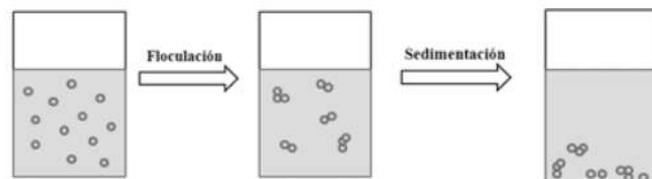


Figura 6.8: Coagulación, floculación y decantación del tratamiento estándar del agua  
*Fuente: Fluidra*

Para finalizar esta etapa, el agua se somete a un proceso de filtración. La filtración es una etapa crucial para obtener un agua clara y de calidad. Aunque las fases anteriores eliminan la mayor parte de los sólidos en suspensión, la filtración retira las partículas más pequeñas y reduce la carga microbiológica. Este proceso no se basa exclusivamente en la retención física, sino también en mecanismos químicos y biológicos.

El sistema de filtración más habitual es el filtro de arena por gravedad. Este consiste en un depósito abierto, cilíndrico o rectangular, que contiene uno o varios medios filtrantes como arena o antracita. En su base se encuentra un sistema de boquillas encargado de recoger el agua filtrada. Son filtros que no requieren presión, resultan fáciles de construir y operar, pero necesitan una mayor superficie.

El rendimiento del filtro depende principalmente de las características del medio



Figura 6.9: Sistema de filtración por gravedad

Fuente: *Instituto del agua*

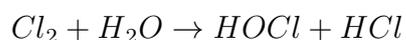
filtrante, como el tamaño de grano, la dureza, la densidad, el tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad de la arena empleada.

### 6.1.3. Desinfección

La desinfección es la última etapa del tratamiento de aguas residuales antes de su vertido o reutilización. Su objetivo principal es eliminar o inactivar los microorganismos patógenos que aún puedan estar presentes tras las fases anteriores del tratamiento. Aunque en algunos casos se logra una reducción significativa de la carga microbiológica con la filtración, la desinfección es fundamental para garantizar que el agua sea segura para el medio ambiente o para un uso posterior.

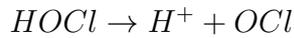
La cloración es el método de desinfección más ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas potables, debido a su eficacia, bajo coste y capacidad de mantener una acción residual que protege el agua hasta su consumo. Consiste en añadir compuestos clorados al agua, principalmente cloro gaseoso ( $Cl_2$ ), hipoclorito sódico ( $NaClO$ ) o hipoclorito cálcico ( $Ca(ClO)_2$ ), que al disolverse generan especies oxidantes capaces de inactivar microorganismos patógenos (bacterias, virus, protozoos).

La reacción principal cuando el cloro se disuelve en agua es la siguiente:



El producto clave es el ácido hipocloroso ( $HOCl$ ), que es el agente desinfectante

más eficaz. Este a su vez se encuentra en equilibrio con el ion hipoclorito ( $\text{OCl}^-$ ), y la proporción entre ambos depende del pH del agua:



A pH bajos, en torno a 5-7, predomina la forma de ácido hipocloroso ( $\text{HOCl}$ ), que es significativamente más eficaz como agente desinfectante. En cambio, cuando el pH es alto (valores iguales o superiores a 8), se favorece la formación del ion hipoclorito ( $\text{OCl}^-$ ), cuya capacidad desinfectante es menor. Por ello, se considera que el intervalo óptimo de pH para una cloración eficiente se sitúa entre 6,5 y 7,5.

Además, influyen factores como la concentración de cloro libre residual (idealmente entre 0,2 y 0,5 mg/L), el tiempo de contacto, la temperatura (a mayor temperatura, mayor velocidad de desinfección) y la demanda de cloro, es decir, la cantidad que se consume al reaccionar con compuestos presentes en el agua y que no contribuye directamente a la desinfección.

Otra opción es el uso de ozono, un desinfectante muy eficaz que oxida compuestos orgánicos y no deja residuos ni altera el sabor o el olor del agua, aunque tiene un coste más elevado y no mantiene efecto residual. También puede emplearse la radiación ultravioleta, que daña el ADN de los microorganismos e impide su reproducción; es efectiva y no modifica las características del agua, aunque tampoco proporciona protección posterior en la red de distribución.

Para eliminar pesticidas, compuestos orgánicos, sabores y olores, se utiliza la adsorción con carbón activo. El mismo es un material de origen vegetal o mineral que ha sido tratado para desarrollar una estructura altamente porosa, lo que le confiere una gran capacidad de adsorción. Gracias a esta característica, se utiliza ampliamente en procesos de purificación de agua, ya que es capaz de atrapar compuestos orgánicos, pesticidas, restos de medicamentos, metales pesados, cloro y otros contaminantes que afectan el sabor, olor y seguridad del agua. No elimina microorganismos como bacterias o virus por sí solo, pero es un complemento eficaz cuando se combina con otros métodos de potabilización. Su funcionamiento se basa en la atracción física entre las partículas contaminantes y la superficie del carbón, lo que permite retenerlas en sus poros sin necesidad de una reacción química.

Finalmente, para retener virus, bacterias y contaminantes disueltos, se puede recurrir a la filtración avanzada mediante membranas, como la ultrafiltración, la nanofiltración o la ósmosis inversa.

En conjunto, todas estas etapas permiten transformar el agua bruta en un recurso seguro, asegurando que cumpla con los estándares de calidad.

## 6.2. E.T.A.P. de Bahía Negra

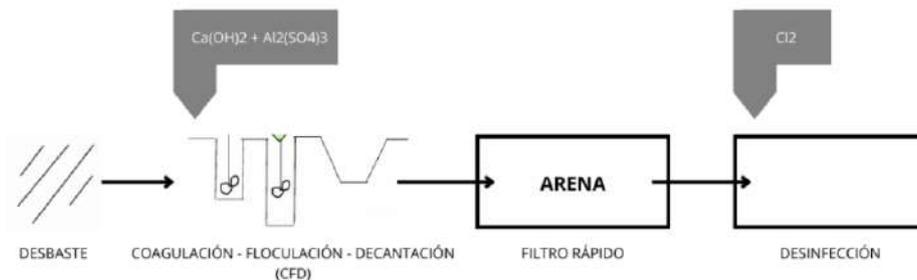


Figura 6.10: Esquema del funcionamiento ideal de la planta

*Fuente: Creación propia*

La planta potabilizadora original de Bahía Negra cuenta con un sistema de tratamiento de aguas que, si bien es básico, abarcaría las fases esenciales para garantizar una mejora significativa en la calidad del agua captada del río Paraguay.

El proceso se iniciaría con una etapa de desbaste, en donde se retiraban los sólidos más grandes presentes en el agua cruda. Esta remoción física se llevaba a cabo mediante rejillas o mallas metálicas y tenía como fin proteger los equipos posteriores del sistema y evitar obstrucciones.

Posteriormente, el agua pasa por la fase de coagulación, floculación y decantación, donde se aplicaban productos como el hidróxido de calcio, que ajusta el pH, o el sulfato de aluminio, que ayuda a la floculación. Como se ha explicado en apartado anteriores, estos componentes químicos son los encargados de neutralizar las cargas de las partículas suspendidas para su posterior aglomeración, con el objetivo de que estas, una vez agrupadas, sedimenten al fondo del tanque mediante decantación laminar, mejorando así la claridad del agua.

Seguidamente, el agua parcialmente clarificada atraviesa un filtro de arena, donde se retiran las partículas que no pudieron ser retiradas en las etapas previas. Este filtro actúa como una barrera física, atrapando impurezas más pequeñas y contribuyendo también a la reducción de algunos patógenos, aunque su efecto no es suficiente para garantizar por sí solo la salubridad del agua. No obstante, desempeña un papel

fundamental en la eliminación de huevos de parásitos como los nemátodos, que pueden resistir la desinfección química con cloro. La eficiencia de esta etapa depende del correcto mantenimiento del medio filtrante.

Como última etapa, el agua pasaría por un proceso de desinfección con cloro ( $\text{Cl}_2$ ), que tiene como objetivo eliminar microorganismos patógenos, como bacterias, virus y protozoos. Esta etapa es crítica para asegurar que el agua sea segura para el consumo humano.

### 6.3. Sostenibilidad

El estudio del medio ambiente y la sostenibilidad ha evolucionado como respuesta a los problemas derivados del crecimiento industrial, la contaminación y la presión creciente.

En cuanto al marco jurídico, la normativa ambiental se construye sobre distintos niveles: reglamentos, directivas y decisiones de la administración comunitaria; leyes y reales decretos a nivel estatal; normativa autonómica y, finalmente, ordenanzas municipales, todas ellas orientadas a regular actividades, proteger el entorno y garantizar un desarrollo compatible con la conservación de los recursos.

Desde la perspectiva científica, la ecología es la disciplina que estudia las relaciones entre los seres vivos y su entorno, abordando el nivel superior de organización biológica, que incluye tanto a individuos de una misma especie como a organismos de especies diferentes. La ecotoxicología, por su parte, se centra en analizar cómo los contaminantes y sustancias tóxicas se mueven e impactan en los ecosistemas. Estos contaminantes pueden dividirse entre aquellos que modifican el medio físico, como el  $\text{CO}_2$  o los nutrientes que provocan eutrofización, y contaminantes propiamente tóxicos, como dioxinas y metales pesados, cuya peligrosidad depende de su concentración, persistencia y biodisponibilidad.

Entre los fenómenos que explica la ecotoxicología se encuentra la bioacumulación, que describe la tendencia de algunas sustancias químicas a acumularse en los organismos vivos a lo largo del tiempo. A mayor escala, la biomagnificación describe cómo estas sustancias se concentran progresivamente en los niveles superiores de la cadena trófica, afectando especialmente a los grandes depredadores.

La toxicidad de los contaminantes puede verse amplificada, reducida o simplemente sumarse según el tipo de mezcla que generen, dando lugar a efectos aditivos, antagónicos

o sinérgicos. Además, factores como el pH, la dureza del agua y la temperatura pueden modificar su efecto sobre los seres vivos.

Frente a los modelos económicos tradicionales, surgió la ecología industrial como un enfoque que propone organizar las actividades humanas imitando el funcionamiento de los ecosistemas naturales. En un ecosistema industrial, los procesos productivos están interrelacionados, de manera que los residuos de una actividad pueden convertirse en materia prima de otra, reduciendo así el impacto ambiental y aprovechando mejor los recursos.

En paralelo, la economía circular plantea superar el modelo lineal basado en producir, usar y desechar, apostando por la reutilización, el reciclaje y la valorización de los productos y materiales para reducir el consumo de recursos y la generación de residuos. Este enfoque responde a retos globales como la escasez de agua y materias primas, el cambio climático, la contaminación del suelo, la crisis energética y el crecimiento demográfico. Los principios de la economía circular incluyen la idea de que todo residuo puede convertirse en recurso, la necesidad de diseñar productos desmontables y reciclables, el uso exclusivo de energías renovables y la adopción de un pensamiento sistémico que tenga en cuenta todas las relaciones e impactos. También propone modelos de negocio basados en el servicio en lugar de la propiedad, precios que reflejen los costes reales ambientales y sociales y el reconocimiento de que el reciclaje, aunque importante, no basta por sí solo para lograr la sostenibilidad.

En este sentido, en Bahía Negra hay una gran oportunidad para hacer un diseño integrado sostenible y circular del saneamiento (incluyendo la gestión de aguas residuales y los residuos sólidos), el abastecimiento de energía (también con renovables y biogás) y el desarrollo local sostenible mediante el intercambio y aprovechamiento de insumos.

En definitiva, abordar los problemas ambientales actuales requiere integrar conocimientos científicos, legislación, cambios sociales y modelos económicos más respetuosos con el entorno, apostando por la cooperación entre sectores, la innovación y la implicación de toda la sociedad.



Figura 6.11: Estado actual del basurero comunal de Bahía Negra  
*Fuente: Creación propia*

## 6.4. Otros sistemas de potabilización

### 6.4.1. Sistema de potabilización de PCI

La organización Pro Comunidades Indígenas (PCI) trabaja desde hace siete años para garantizar el acceso al agua potable en comunidades del Pantanal paraguayo, apostando por sistemas de potabilización basados en la naturaleza y contruidos con

materiales locales, sin depender de químicos como el sulfato de aluminio. Llevan cuatro años implementando este modelo en comunidades indígenas, integrando la gestión comunitaria, la capacitación técnica y el desarrollo de planes de negocio para asegurar la sostenibilidad del sistema.

El proceso comienza con la captación de agua del río mediante una bomba de 2,5 HPS. El agua se impulsa a través de una tubería que entra a la parte baja de los tanques de filtrado con una curva de 45 grados y dirige el caudal hacia los filtros de forma que impacte en las piedras de mayor tamaño, dividiendo la presión y favoreciendo la sedimentación inicial. El sistema de filtración está compuesto por tres filtros verticales de 250 litros cada uno, dispuestos en serie:

- En el primer filtro, el agua entra inclinada, choca con piedras de tamaño intermedio y atraviesa capas de grava de 2,5 micras y tela plástica que retiene partículas finas. El flujo se divide y sube de nivel a través de una malla perforada, facilitando la decantación de sedimentos.
- El segundo filtro replica el proceso: piedras de distintos tamaños, nuevas capas de grava y arena lavada del río que ayudan a oxigenar el agua y a retener impurezas más finas. Entre capas se colocan mallas plásticas para separar y sostener los materiales filtrantes.
- El tercer filtro incorpora carbón activado, encargado de eliminar olores, sabores y residuos orgánicos, mejorando la calidad final del agua.

El agua pasa de un filtro a otro mediante un tubo que coge el agua de la parte alta de uno de ellos y la lleva a la parte baja del siguiente, utilizando así la gravedad para este proceso. Una vez filtrada, el agua cae por gravedad a un tanque enterrado de 10.000 litros, equipado con una boya eléctrica que detiene la bomba de captación cuando se alcanza el nivel máximo, evitando pérdidas y sobrecargas. Desde este depósito, una segunda bomba eleva el agua hasta un tanque elevado, cuya capacidad varía según la población abastecida, instalado a 6 metros de altura para garantizar la presión necesaria en la distribución. Este tanque también cuenta con una boya automatizada que activa o detiene la bomba de impulsión cuando se requiere reponer el nivel de reserva.

Para asegurar la desinfección, el único químico utilizado es el cloro, que se inyecta en la salida del filtro de carbón activado. La dosificación se ajusta entre un 2 % y un 4 % según la época del año, la turbidez del agua y la presencia de elementos contaminantes como sedimentos, plantas o cenizas. El promedio de consumo se estima en 55-60 litros por persona al día.

El mantenimiento del sistema combina métodos mecánicos y manuales: se emplea un sistema de presión de aire con picos perforados de 2mm en el interior de los filtros para remover sedimentos acumulados. Con esta técnica se genera burbujeo que arrastra la suciedad hacia la parte superior, mientras el agua de limpieza se evacúa por una salida inferior conectada a un desagüe. Uno de los desafíos es la aparición de caracoles que anidan en las piedras filtrantes y sanguijuelas que pueden obstruir las capas, por lo que PCI recomienda instalar pre-filtros para evitar su paso al sistema principal.

El diseño contempla la integración de sistemas de energía fotovoltaica y la construcción de oficinas y estructuras de apoyo con materiales locales. Todo este enfoque busca reducir costos de operación, aumentar la autonomía de las comunidades y reforzar la gobernanza local sobre el agua, alineándose con principios de sostenibilidad y respeto por el entorno.

#### **6.4.2. Sistemas de potabilización en las viviendas y el hospital**

En la comunidad de Bahía Negra, el suministro de agua no se realiza de manera continua a lo largo del día, lo que ha llevado a que las viviendas estén equipadas con tanques elevados para almacenar el agua destinada al consumo diario. Este sistema permite a las familias asegurar la disponibilidad de agua durante las horas en las que no se realiza la distribución. Debido a la falta de un tratamiento centralizado, cada hogar se encarga de purificar el agua por cuenta propia. Para ello, se utilizan productos químicos, principalmente sulfato de aluminio, cloro e hipoclorito de sodio, que permiten eliminar impurezas y garantizar la potabilidad del agua almacenada.

Algunas familias también cuentan con métodos de recolección de agua de lluvia ya que se encuentra menos contaminada, posteriormente esta agua también es tratada para garantizar su salubridad y se utiliza para el consumo, evitando así enfermedades por la ingesta de agua contaminada del río.

Por otro lado, el hospital de Bahía Negra cuenta con su propio sistema básico de tratamiento de agua para cubrir las necesidades internas. Ante la imposibilidad de acceder a un suministro público de agua potable, el hospital se ve obligado a adquirir agua mineral a precios elevados, lo que ha motivado la implementación de un proceso de potabilización propio. Este consiste en una primera etapa de filtrado doble, seguida de la adición de hipoclorito de sodio como desinfectante principal. De manera complementaria y según disponibilidad, también se emplean cloro y sulfato de aluminio como agentes coagulantes y desinfectantes adicionales.



Figura 6.12: ESistema de filtrado doble empleado en el hospital  
*Fuente: Creación propia*

Una vez tratada, el agua se almacena en un tanque de reposo con capacidad para 15.000 litros, desde donde se distribuye para su uso en las instalaciones sanitarias. Aunque este sistema no garantiza una potabilización completa según estándares internacionales, permite una mejora significativa en la calidad del agua utilizada, reduciendo en parte los riesgos sanitarios asociados al consumo de agua contaminada. La continuidad de este sistema depende también del suministro energético, razón por la cual se están instalando paneles solares fotovoltaicos que aseguren la operación autónoma de los equipos de tratamiento y almacenamiento.

# Capítulo 7

## Acceso actual al agua en Bahía Negra

El acceso al agua potable en la comunidad de Bahía Negra presenta serias deficiencias tanto a nivel estructural como sanitario. La planta de potabilización de agua en Bahía Negra continúa abasteciendo a la población, aunque actualmente solo se utiliza para la captación y distribución directa de agua cruda del río, ya que el sistema de tratamiento está fuera de funcionamiento desde 2023. Esto representa un riesgo elevado para la salud pública, especialmente para niños, personas mayores y otros grupos vulnerables.

### 7.1. Fuente de agua: el río Paraguay

En la actualidad, la principal fuente de abastecimiento hídrico en Bahía Negra es el río Paraguay, que atraviesa el territorio nacional y desempeña un rol fundamental en la vida económica, social y ambiental de la región del Chaco. Este río, de régimen pluvial, presenta características dinámicas que influyen directamente en la calidad y disponibilidad del recurso hídrico, especialmente en épocas de sequía o crecida. Debido a su cercanía geográfica, la captación de agua en Bahía Negra se realiza directamente desde el cauce del río, lo que facilita el acceso, pero también plantea desafíos importantes en términos de calidad del agua bruta, ya que se encuentra expuesta a factores de contaminación tanto naturales como provocados por el ser humano.

El agua captada del río Paraguay en esta zona presenta un nivel elevado de turbidez, que incrementa notablemente tras el paso de barcos. También cuenta con una alta carga de materia orgánica y la presencia frecuente de sedimentos, lo cual dificulta su tratamiento y potabilización sin una infraestructura adecuada.

Además, el carácter lodoso del lecho del río en el entorno de Bahía Negra limita los procesos de filtración natural, afectando la eficiencia de los sistemas tradiciona-



Figura 7.1: Turbidez del río Paraguay tras el paso de un barco

*Fuente: Creación propia*

les de captación subterránea. Sin embargo, cabe mencionar la presencia de camalotes (*Eichhornia crassipes*), plantas acuáticas flotantes típicas de la región que, si bien en grandes concentraciones pueden dificultar la navegación, también cumplen un rol ecológico al absorber metales pesados, nutrientes en exceso y otras sustancias contaminantes presentes en el agua. Asimismo, la vegetación acuática del tipo acuapié, compuesta por plantas enraizadas en zonas anegadas o con hojas flotantes, contribuye a los procesos de biofiltración y estabilización del ecosistema acuático, ofreciendo un primer nivel de depuración natural en el agua captada.

## 7.2. Estructura actual del sistema de distribución

En 2025, 203 familias se abastecen a través de esta red, frente a las 183 que lo hacían en 2024. El sistema de distribución cuenta con un cobro mensual de 30.000 guaraníes por familia, independientemente del volumen de consumo. El suministro se organiza por franjas horarias: de 7:00h a 15:00h para el barrio norte y de 15:00h a 00:00h para el barrio sur.

El agua es captada directamente del río mediante dos bombas, que se encuentran en el interior de un torreón situado en la orilla del río. Una de las bombas no se encuentra operativa debido a un fallo en el motor, originado por una quema ocasionada por la



Figura 7.2: Eichhornia crassipes presentes en el río Paraguay  
*Fuente: Creación propia*



Figura 7.3: Flor de acuapié presente en el río Paraguay  
*Fuente: Creación propia*

inestabilidad de la red eléctrica. Además, la llave de paso de esta bomba está rota, lo que provoca pérdidas de agua dentro de la estructura donde se aloja, generando una acumulación que debe ser drenada manualmente cada dos semanas para evitar que el nivel de agua alcance y dañe la segunda bomba, que actualmente es la que sí está en funcionamiento. Una vez captada, el agua cruda se dirige al sistema de tratamiento, entrando directamente al depósito cuadrado donde comenzaría el proceso.

Antes de ingresar al sistema de filtrado, se debería realizar la introducción de los productos químicos necesarios mediante dosificadores diseñados para añadir la proporción correcta de cada sustancia. Las mezclas se llevaban a cabo en la sala de mezcladoras, situada a 6 metros del sistema de filtrado, y se enviaría el resultado a la cañería que conecta el torreón con el tanque de filtración.



Figura 7.4: Captación de agua del río Paraguay  
*Fuente: Creación propia*



Figura 7.5: Motores y bombas de captación]  
*Fuente: Creación propia*



Figura 7.6: Estructura para las bomba  
*Fuente: Creación propia*

En primer lugar, se añadiría cal en pasta, preparada con una mezcla de 10 kg de cal y 500 litros de agua, cuya función es equilibrar el pH del agua. Simultáneamente, se incorporaría sulfato de aluminio, en una cantidad de 15 kg de producto granulado, cuya función es provocar la coagulación de las partículas presentes en el agua. En este momento, esta parte del sistema no se encuentra operativa por la falta de funcionamiento

de los motores de las mezcladoras y por la inexistencia de dosificadores.



Figura 7.7: Mezcladoras con sus respectivos motores

*Fuente: Creación propia*



Figura 7.8: Adición de la mezcla de sulfato de aluminio]

*Fuente: Creación propia*



Figura 7.9: Adición de la mezcla del hipoclorito de sodio

*Fuente: Creación propia*

A continuación, se llevaría a cabo el proceso de floculación ya en el interior del tanque, en el que las partículas coaguladas se agruparían formando flóculos más grandes. El agua pasaría seguidamente a la decantación, donde estos flóculos sedimentarían en el fondo del depósito y el agua clarificada continuaría su curso hacia la siguiente etapa del tratamiento. En este orificio del tanque se observan las lamelas, elementos en forma de placas inclinadas que aumentan la superficie de decantación y favorecen la separación de sólidos. Estas estructuras permiten que los sedimentos se acumulen en la parte superior mientras el agua limpia continúa su recorrido hacia el siguiente punto

del sistema. Actualmente, el agua pasa directamente por los separadores del tanque, sin pasar por ningún proceso especificado.

Cada 4 o 5 horas se realizaba paralelamente el vaciado del tanque de decantación para la eliminación de sedimentos.

El agua llega entonces a un filtro de arena ubicado en el último orificio del depósito cuadrado. Este filtro actúa como una última barrera física para retener partículas en suspensión que no se habrían eliminado en las etapas anteriores. Actualmente el filtrado de arena sí se utiliza, pero cabe destacar cuál es su estado más adelante.

Finalizada esta fase, el agua se dirige hacia el reservorio.



Figura 7.10: Flocculación]  
*Fuente: Creación propia*



Figura 7.11: Sedimentación  
*Fuente: Creación propia*

Antes de ingresar al reservorio de 10.000 litros, se le añadiría en la cañería que lo conecta con el tanque previo el hipoclorito de sodio, que actuaría como desinfectante final para garantizar que el agua llegue libre de agentes patógenos. El reservorio cuenta con una ventanilla en la tapa, desde donde se tomaría una muestra para evaluar la calidad del agua antes de ser distribuida. Como estos pasos no se llevan a cabo actualmente, el agua se bombea desde el reservorio directamente hasta el tanque elevado a 23 metros de 35.000 litros de capacidad, desde donde se da la presión necesaria para su distribución.

La red de distribución comienza con cañerías de 3 pulgadas a la salida de la planta, que se reducen a 2 pulgadas a lo largo del trayecto principal. Estas tuberías están enterradas a una profundidad aproximada de 60 a 70 centímetros bajo la superficie.



Figura 7.12: Lamelas de la decantación]  
Fuente: Creación propia



Figura 7.13: Tanques de vaciado  
Fuente: Creación propia



Figura 7.14: Filtro de arena]  
Fuente: Creación propia



Figura 7.15: Estructura de floculación,  
decantación y filtrado de arena  
Fuente: Creación propia

Hacia el norte, la cañería sigue la calle principal hasta la última calle del barrio norte, bifurcándose en la calle del aeropuerto para abastecer la zona interior de Bahía Negra. Hacia el sur, la red también sigue la calle principal, llegando hasta cerca de 2 kilómetros antes de la entrada de Puerto Diana, el pueblo indígena vecino que no depende de esta planta. Las conexiones individuales a las viviendas se hacen mediante cañerías de media pulgada.

Cabe destacar que la cañería principal de distribución tiene más de 60 años de



Figura 7.16: Reservorio]  
*Fuente: Creación propia*



Figura 7.17: Tanque elevado  
*Fuente: Creación propia*

antigüedad y presenta fugas importantes. Sin embargo, hay una parte más nueva que tiene solo dos años en el barrio sur, que son los 100 metros finales de la cañería principal.

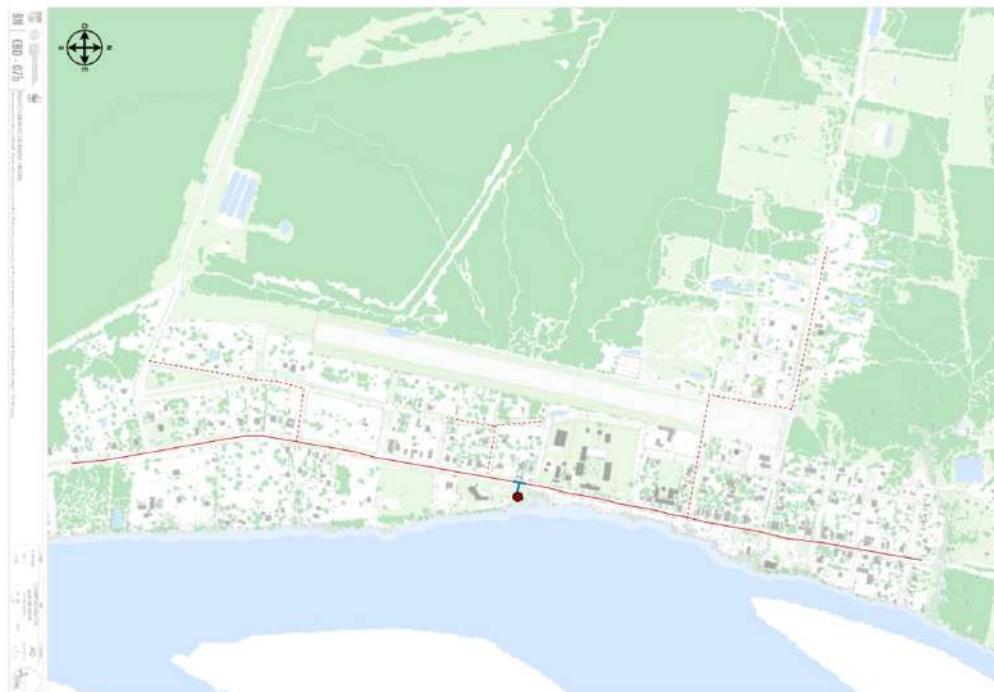


Figura 7.18: Mapa de distribución de agua en Bahía Negra  
*Fuente: Antiguo Gerente de la Planta de Saneamiento*

Cada domingo se vacían los tanques y filtros para realizar tareas de mantenimiento y limpieza, y en su momento, todo el sistema funcionaba correctamente.

### **7.2.1. Planos de la planta de tratamiento**

El dimensionamiento adecuado de una planta de tratamiento de agua es fundamental para garantizar su funcionamiento eficiente, seguro y sostenible. Un diseño bien dimensionado permite que cada componente cumpla su función específica con el caudal y la presión requeridos, evitando tanto pérdidas de eficiencia como riesgos sanitarios o estructurales. Además, asegura la adaptación del sistema a las condiciones reales del entorno, como el caudal disponible, la calidad del agua bruta, el crecimiento poblacional previsto y las limitaciones logísticas propias del territorio.

En el caso de Bahía Negra, el diseño existente responde a la necesidad de una solución autosuficiente y funcional que pueda operar en condiciones de aislamiento, priorizando la sencillez operativa y el mantenimiento mínimo. Por ello, el plano general de la planta muestra un recorrido lineal y lógico del agua a lo largo del sistema de tratamiento.

#### **Planta de tratamiento - General**

El proceso comienza en la torre de captación, donde se toma el agua directamente del río. Desde allí, pasa al tanque donde se añaden los químicos provenientes de las mezcladoras y se llevan a cabo los procesos de decantación, floculación y coagulación. A continuación, el agua se dirige a un tanque reservorio, donde se produce el reposo. Finalmente, el agua tratada es impulsada al tanque elevado, cuya función es distribuirla a las viviendas del pueblo, asegurando una presión estable y continua en la red de abastecimiento.

#### **Planta de Tratamiento - Filtro de arena**

A continuación se presenta el plano detallado del primer tanque de tratamiento, cuya función principal es llevar a cabo las etapas iniciales del proceso de potabilización del agua. Este tanque recibe el agua cruda desde la torre de captación y constituye el núcleo del tratamiento físico-químico antes de su paso al reservorio general.

Cabe destacar una diferencia del plano respecto a la realidad y es la ausencia de las lamelas, que dado su estado, no fueron consideradas relevantes para el diseño del plano.

Sin embargo, sí se observa cómo los tres primeros orificios del tanque están conectados por la parte inferior, separando de dicha unión el filtro de arena. Para una mayor precisión, se expone también el plano con sus respectivas acotaciones en una escala 1:5.

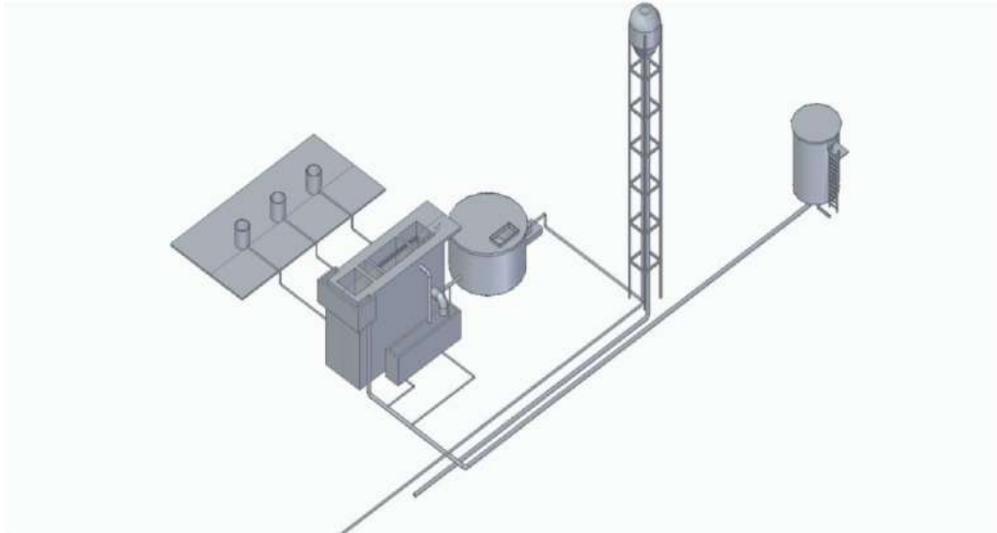


Figura 7.19: Modelo 3D de la planta de tratamiento  
 Fuente: Creación propia

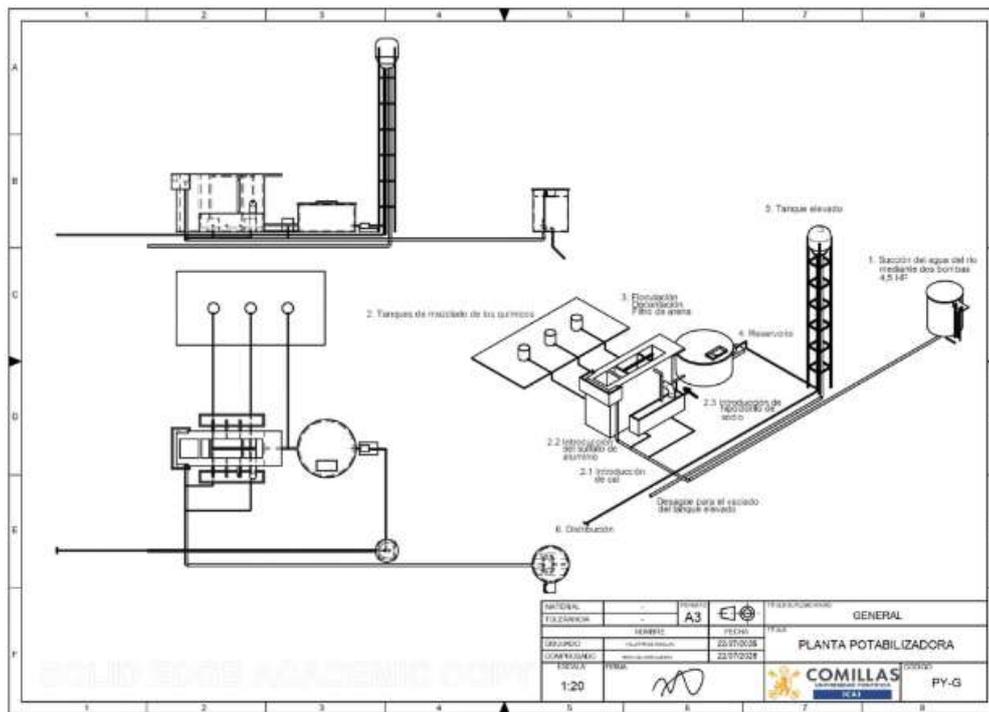


Figura 7.20: Vista general de la planta con alzado, planta y miniatura 3D con explicación  
 Fuente: Creación propia

## Planta de Tratamiento - Reservorio

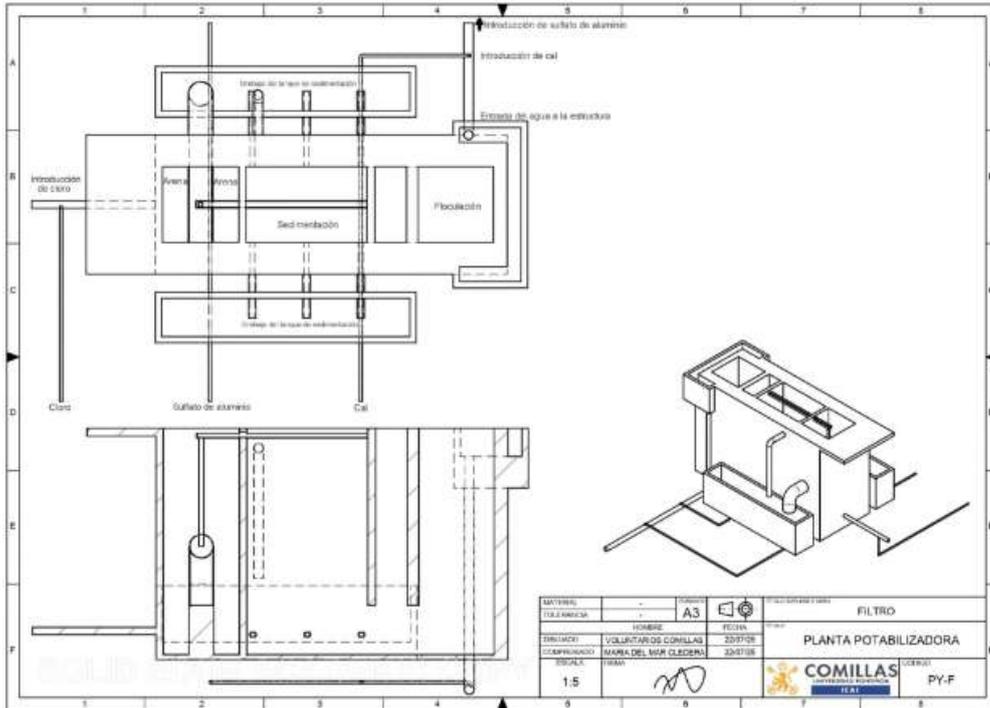


Figura 7.21: Plano explicativo del filtro de arena con alzado y planta  
*Fuente: Creación propia*

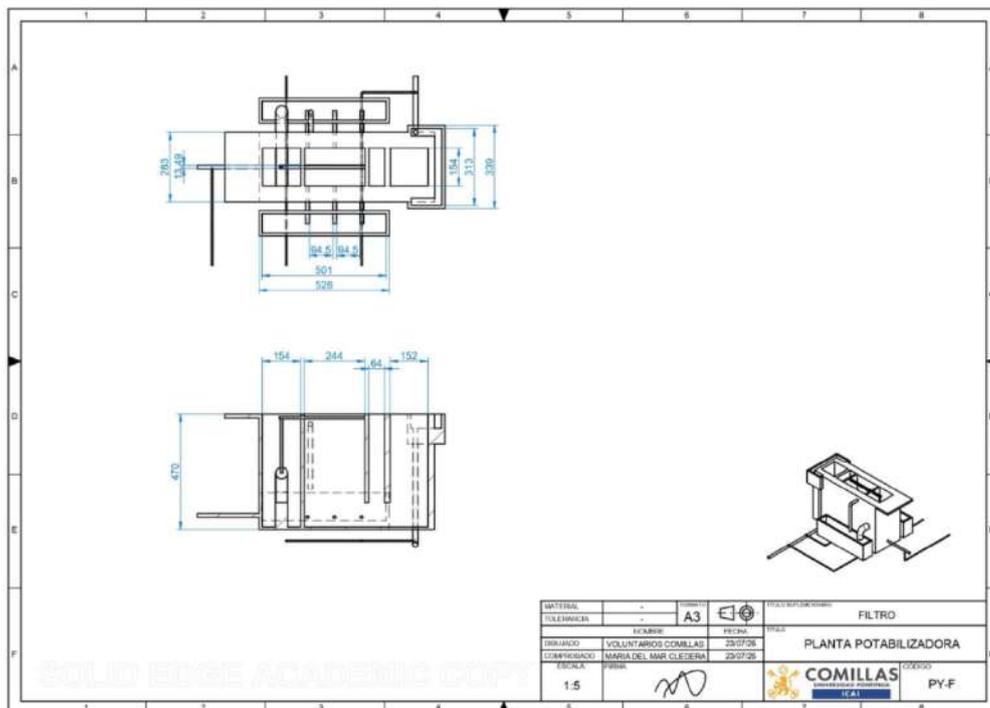


Figura 7.22: Plano descriptivo de la planta con acotaciones  
*Fuente: Creación propia*

El dimensionamiento del reservorio permite regular el flujo y asegurar una disponi-

bilidad continua en caso de interrupciones puntuales del proceso.

En la parte superior se encuentra un orificio destinado a realizar mediciones y controles de calidad del agua, permitiendo verificar su estado antes de ser distribuida al tanque elevado y, posteriormente, a la red de consumo.

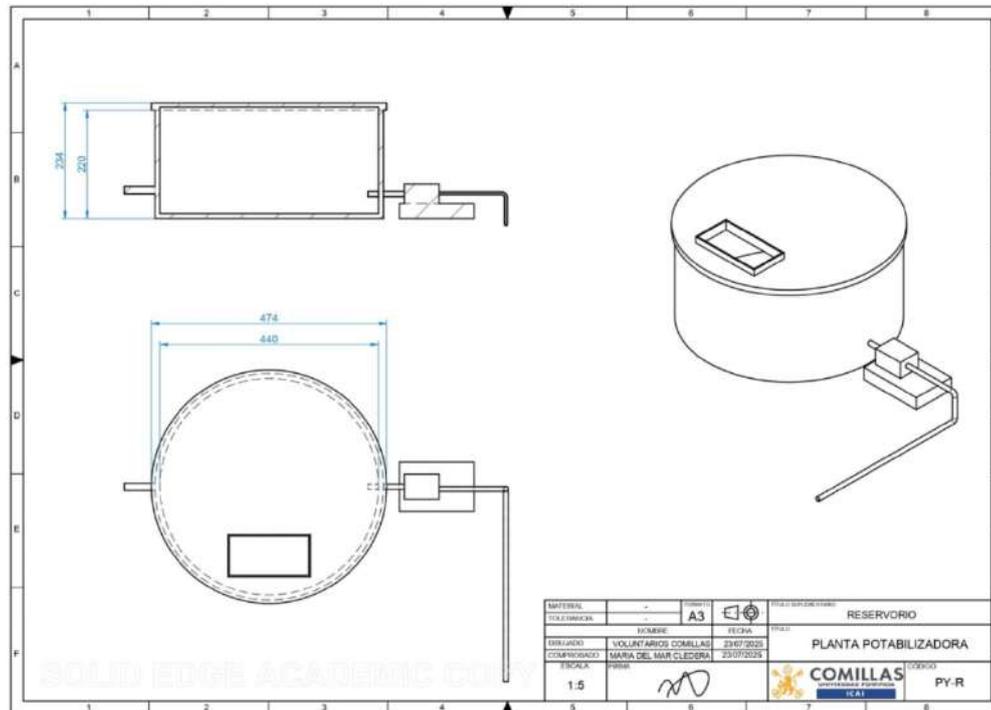


Figura 7.23: Plano acotado del reservorio

Fuente: Creación propia

### Planta de tratamiento - Tanque elevado y motores de succión

El tanque elevado, con una capacidad de 35.000 litros y una altura total de 23 metros, se ha representado a una escala menor en el plano de la planta general con el fin de mantener una perspectiva más compacta y facilitar la visualización del conjunto del sistema. No obstante, en la realidad constructiva, es imprescindible respetar la altura real para asegurar la presión hidrostática necesaria.

También resulta relevante contar con la vista superior y lateral del torreón de captación, donde se ubican los motores de succión. La altura exacta de esta estructura no ha podido determinarse con precisión debido a la presencia constante de agua en su interior, lo cual dificultaba y ponía en riesgo la toma de medidas. No obstante, este dato deja de ser crítico siempre que el sistema interno, en particular el funcionamiento de la llave de paso, opere correctamente.

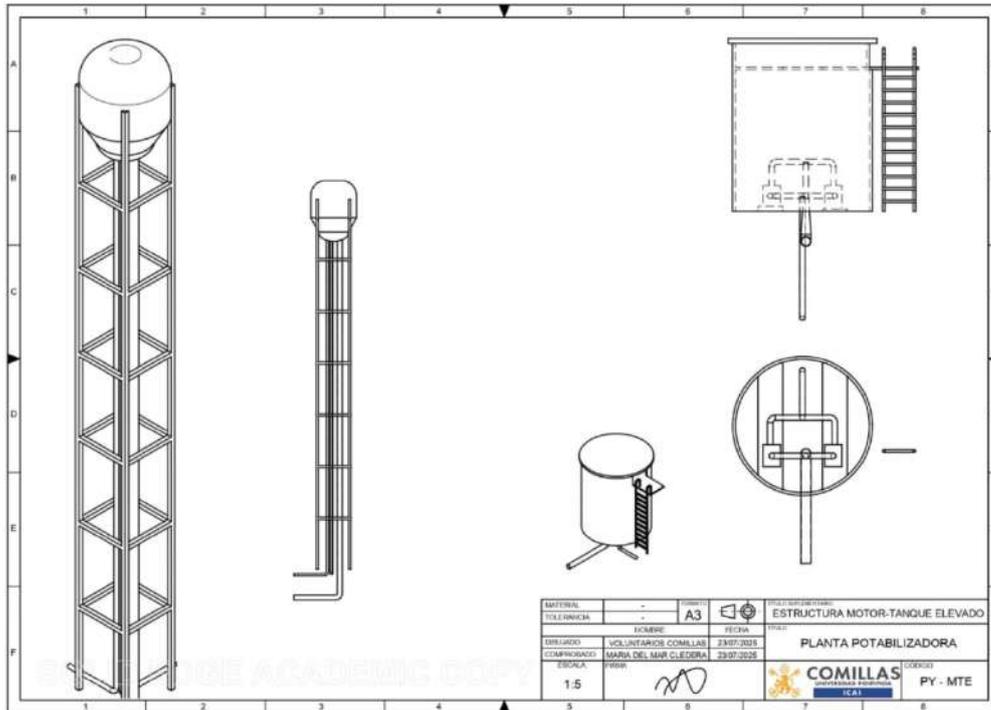


Figura 7.24: Plano del tanque elevado a 23 metros y la estructura que aloja los motores de succión

Fuente: Creación propia

### 7.3. Métodos actuales de potabilización en el poblado

Para saber con precisión el uso que se le da al agua en Bahía Negra, se ha conducido una encuesta a 56 miembros de la comunidad, la cual podemos extrapolar a un uso general de todo el pueblo (Anexo III). A partir de ahí se han obtenido los siguientes resultados.

El acceso al agua de manera general (80,4 %) proviene de la planta de tratamiento, la cual distribuye agua bruta. El resto, por otro lado, la obtienen de los motores propios que cuentan con acceso directo al río. La población Bahía Negrense, en la misma proporción, no cree que el agua que ingieren sea segura para la salud de personas y animales.

Se ha evidenciado que el agua tiene una relación directa con los malestares gastrointestinales de parte de la población. Un 50 % de los encuestados han tenido que asistir al centro de salud por este motivo en los últimos tres años, donde todos tienen el presentimiento o certeza de que el motivo ha sido la ingesta de agua no segura. Al asistir al hospital por esta razón, se les concienta sobre la importancia del agua trata-

da, además de enseñárseles cómo tratarla en sus casas. Consecuentemente, se dan unos resultados congruentes a la pregunta del tipo de agua consumida, donde se obtuvo que el 67,9 % consumía agua tratada, el 16,1 % totalmente cruda y la proporción restante consume agua mineral. Del primer grupo se analizan distintas técnicas para tratarla. La más común, con un uso por parte del 64,3 % del grupo, es la dosificación de sulfato de aluminio previa al consumo. Siguiendo a esta, el 30,4 % la tratan con cloro. Una minoría del 5,4 % lo hace con hipoclorito de sodio.

El agua tratada se usa mayormente, por un 76,8 % de la población, para el consumo propio. Un 12,5 la usa también para cocinar. Luego, en proporciones mucho menores es usada también para limpiar o para dar de beber a los animales. Todos los informantes son conscientes de que es importante consumir agua tratada.

# Capítulo 8

## Diagnóstico técnico

### 8.1. Análisis de las muestras de agua de Bahía Negra

El 15 de julio de 2025 se procedió a la toma de tres muestras de agua en la localidad de Bahía Negra, siguiendo un orden secuencial: (1) agua del río, previa a su ingreso al sistema de distribución; (2) agua cruda almacenada en el tanque; y (3) agua proveniente de una canilla de una vivienda particular en la localidad. El objetivo del análisis fue determinar la calidad del agua existente antes de la remodelación de la planta potabilizadora, a fin de aportar un enfoque realista al diseño de esta y para a su vez poder identificar con certeza la función que cumple actualmente. Como referencia para la evaluación de los parámetros, se empleará la resolución 222/02 Art 3º Clase II de la Secretaría del Ambiente por la cual se establece el padrón de calidad de las aguas en el territorio nacional y la norma paraguaya NP 24 001 80 de agua potable. Las muestras se recogieron en los puntos mencionados y, en un plazo inferior a 48 horas, fueron trasladadas por vía aérea hasta Asunción para su análisis en el laboratorio de la Universidad Nacional de Asunción. Durante el transporte se mantuvieron en condiciones de refrigeración, con suficiente hielo para preservar su integridad. Previo al llenado de cada recipiente, este fue enjuagado entre tres y cuatro veces con el mismo agua a recolectar; posteriormente, se procedió al llenado y cierre hermético para garantizar su adecuada conservación hasta su recepción en el laboratorio.

Cabe resaltar la descripción con la que se definió en el laboratorio el estado del agua: líquido amarillo claro, olor característico, con partículas en suspensión y sedimentables.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis de las muestras. Los parámetros se han agrupado en dos categorías principales: fisicoquímicos y microbiológicos y, se comparan con los valores máximos permitidos establecidos por la norma paraguaya para agua potable. Las tablas que siguen resumen los valores registrados en

cada punto de muestreo, indicando claramente aquellos que cumplen o incumplen la normativa, con el fin de facilitar su interpretación técnica y su vinculación directa con las necesidades de mejora en la planta potabilizadora.

Tabla 8.1: Tabla de resultados análisis fisiológico agua del río antes de la distribución

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Resolución 222/02</b>	<b>Cumple</b>
pH	-	7,16	6,00-9,00	Sí
Conductividad	µS/cm	293	-	-
Turbidez	UNT	4,54	100	Sí
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,0512	0,0165	No
Nitritos	mg/L	0,0197	3,28	Sí
Nitratos	mg/L	0,0101	45,0	Sí
Magnesio	mg/L	6,32	-	-
Sólidos Suspendidos	mg/L	0,800	-	-
Ortofosfato	mg/L	0,313	-	-

Tabla 8.2: Tabla comparativa con la norma paraguaya de resultados análisis fisiológico agua del río antes de la distribución

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Límite NP 24 001 80</b>	<b>Cumple</b>
pH	-	7,16	4,00-9,00	Sí
Conductividad	µS/cm	293	1250	Sí
Turbidez	UNT	4,54	5	Sí
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,0512	-	-
Nitritos	mg/L	0,0197	0,1	No
Nitratos	mg/L	0,0101	45,0	Sí
Magnesio	mg/L	6,32	50	Sí
Sólidos Suspendidos	mg/L	0,800	-	-
Ortofosfato	mg/L	0,313	-	-

Tabla 8.3: Tabla de resultados análisis microbiológicos agua del río antes de la distribución

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Resolución 222/02</b>	<b>Cumple</b>
Coliformes totales	NMP/100 mL	4,9	-	-
Coliformes fecales	NMP/100 mL	7,8	≤ 1000	Sí

En los parámetros físico-químicos, el pH (7,16) se encuentra dentro de los rangos establecidos tanto por la Resolución 222/02 (6,00 - 9,00) como por la Norma Paraguaya

Tabla 8.4: Tabla comparativa con la norma paraguaya de resultados análisis microbiológicos agua del río antes de la distribución

Parámetro	Unidad	Resultado	Resolución 222/02	Cumple
Coliformes totales	NMP/100 mL	4,9	1,1	No
Coliformes fecales	NMP/100 mL	7,8	$\leq 1,1$	No

NP 24 001 80 (4,00 - 9,00), indicando una condición neutra y estable del agua en el momento del muestreo. La conductividad (293  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) se sitúa muy por debajo del límite de la norma paraguaya (1250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), lo que refleja una baja concentración de sales disueltas. La turbidez (4,54 UNT) cumple con la Resolución 222/02 ( $\leq 100$  UNT) y se encuentra justo por debajo del límite más estricto de la norma paraguaya ( $\leq 5$  UNT), por lo que, aunque adecuada, es un parámetro que convendría vigilar en el diseño de la etapa de clarificación.

En cuanto a los compuestos nitrogenados, el nitrógeno amoniacal (0,0512 mg/L) supera el valor máximo establecido por la Resolución 222/02 (0,0165 mg/L), lo que indica la posible presencia de materia orgánica o descargas recientes de origen doméstico o agrícola. Los nitritos (0,0197 mg/L) cumplen con ambas normativas, ya que se encuentran muy por debajo de los límites (3,28 mg/L en la resolución y 0,1 mg/L en la norma paraguaya). Los nitratos (0,101 mg/L) presentan concentraciones mínimas frente a los valores máximos permitidos (45 mg/L en ambas referencias). El contenido de magnesio (6,32 mg/L) está muy por debajo del límite paraguayo (50 mg/L), y los sólidos suspendidos (0,800 mg/L) reflejan baja presencia de partículas en suspensión. El ortofosfato (0,313 mg/L), aunque no regulado en la normativa nacional, se mantiene en valores bajos, reduciendo el riesgo de eutrofización y proliferación de algas.

En los parámetros microbiológicos, los coliformes totales (4,9 NMP/100 mL) superan el límite de la norma paraguaya (1,1 NMP/100 mL), lo que evidencia una contaminación microbiológica general. En el caso de los coliformes fecales (7,8 NMP/100 mL), aunque cumplen con la Resolución 222/02 ( $\leq 1000$  NMP/100 mL), también superan el límite de la norma paraguaya (1,1 NMP/100 mL), lo que confirma la presencia de contaminación fecal.

En los parámetros físico-químicos, el pH (7,26) se encuentra dentro de los rangos aceptables, reflejando condiciones neutras del agua cruda. La conductividad (73,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) es significativamente baja y muy inferior al límite de la norma paraguaya (1250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), lo que indica una reducida presencia de sales disueltas. La turbidez (4,91 UNT) cumple con la Resolución 222/02 ( $\leq 100$  UNT) y se sitúa apenas por debajo del valor

Tabla 8.5: Tabla de resultados análisis fisiológico agua del tanque (Agua cruda)

Parámetro	Unidad	Resultado	Resolución 222/02	Cumple
pH	-	7,26	6,00-9,00	Sí
Conductividad	µS/cm	73,0	-	-
Turbidez	UNT	4,91	100	Sí
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,0583	0,0165	No
Nitritos	mg/L	0,0361	3,28	Sí
Nitratos	mg/L	0,215	45,0	Sí
Magnesio	mg/L	6,30	-	-
Sólidos Suspendidos	mg/L	1,20	-	-
Ortofosfato	mg/L	0,569	-	-

Tabla 8.6: Tabla comparativa con la norma paraguaya de resultados análisis fisiológico agua del tanque (Agua cruda)

Parámetro	Unidad	Resultado	Límite NP 24 001 80	Cumple
pH	-	7,26	4,00-9,00	Sí
Conductividad	µS/cm	73,0	1250	Sí
Turbidez	UNT	4,91	5	Sí
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,0583	-	-
Nitritos	mg/L	0,0361	0,1	No
Nitratos	mg/L	0,215	45,0	Sí
Magnesio	mg/L	6,30	50	Sí
Sólidos Suspendidos	mg/L	1,20	-	-
Ortofosfato	mg/L	0,569	-	-

Tabla 8.7: Tabla de resultados análisis microbiológicos de agua del tanque (agua cruda)

Parámetro	Unidad	Resultado	Resolución 222/02	Cumple
Coliformes totales	NMP/100 mL	33	-	-
Coliformes fecales	NMP/100 mL	23	1000	Sí

Tabla 8.8: Tabla comparativa con la norma paraguaya de resultados análisis microbiológicos de agua del tanque (agua cruda)

Parámetro	Unidad	Resultado	Resolución 222/02	Cumple
Coliformes totales	NMP/100 mL	33	1,1	No
Coliformes fecales	NMP/100 mL	23	1,1	No

máximo permitido por la norma paraguaya ( $\leq 5$  UNT), lo que sugiere una concentración de partículas en suspensión similar a la del punto anterior y que requiere control

en el tratamiento.

En cuanto a los compuestos nitrogenados, el nitrógeno amoniacal (0,0583 mg/L) supera nuevamente el límite de la Resolución 222/02 (0,0165 mg/L), lo que confirma una posible presencia de materia orgánica. Los nitritos (0,0361 mg/L) cumplen con ambas referencias (3,28 mg/L y 0,1 mg/L respectivamente), aunque se observa un ligero aumento respecto a la muestra anterior. Los nitratos (0,215 mg/L) se encuentran muy por debajo de los límites establecidos (45 mg/L), al igual que el magnesio (6,30 mg/L, frente a un límite de 50 mg/L). El contenido de sólidos suspendidos (1,20 mg/L) sigue siendo bajo y el ortofosfato (0,569 mg/L), aunque no regulado, presenta un valor algo mayor que en el punto previo, lo que podría estar relacionado con procesos internos en el tanque.

En el análisis microbiológico, los coliformes totales (33 NMP/100 mL) exceden ampliamente el límite de la norma paraguaya (1,1 NMP/100 mL), manteniéndose la evidencia de contaminación microbiológica general. En cuanto a los coliformes fecales (23 NMP/100 mL), si bien cumplen con la Resolución 222/02 ( $\leq 1000$  NMP/100 mL), vuelven a incumplir la norma paraguaya (1,1 NMP/100 mL), confirmando la presencia de contaminación fecal persistente.

En comparación con la primera muestra, tomada directamente del río antes de la captación, los valores físico-químicos se mantienen en rangos similares, aunque se observa una ligera reducción de la conductividad y un incremento leve en nitritos, nitratos y ortofosfatos. La turbidez presenta una variación mínima, manteniéndose cercana al límite paraguayo. En el plano microbiológico, el número de coliformes totales y fecales ha aumentado notablemente tras la captación, lo que podría indicar contaminación adicional durante el almacenamiento en el tanque o falta de medidas de protección adecuadas en la infraestructura de captación.

En los parámetros físico-químicos, el pH (7,46) cumple con los rangos establecidos por la Resolución 222/02 (6,00 - 9,00) y la Norma Paraguaya NP 24 001 80 (4,00 - 9,00), manteniendo una condición neutra y estable. La conductividad (84,3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) continúa siendo baja y muy inferior al límite paraguayo (1250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), lo que refleja una baja mineralización. Sin embargo, la turbidez (6,86 UNT), aunque cumple con la Resolución 222/02 ( $\leq 100$  UNT), supera el límite de la norma paraguaya ( $\leq 5$  UNT), indicando que, tras el filtrado y almacenamiento, persiste una concentración de partículas en suspensión superior a lo exigido para agua potable.

En cuanto a los compuestos nitrogenados, el nitrógeno amoniacal (0,0733 mg/L)

Tabla 8.9: Tabla de resultados análisis fisiológico agua del tanque (Agua cruda)

Parámetro	Unidad	Resultado	Resolución 222/02	Cumple
pH	-	7,46	6,00-9,00	Sí
Conductividad	µS/cm	84,3	-	-
Turbidez	UNT	6,86	100	Sí
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,0733	0,0165	No
Nitritos	mg/L	0,0476	3,28	Sí
Nitratos	mg/L	0,202	45,0	Sí
Magnesio	mg/L	6,40	-	-
Sólidos Suspendidos	mg/L	2,00	-	-
Ortofosfato	mg/L	0,383	-	-

Tabla 8.10: Tabla comparativa con la norma paraguaya de resultados análisis fisiológico agua del tanque (Agua cruda)

Parámetro	Unidad	Resultado	Límite NP 24 001 80	Cumple
pH	-	7,46	4,00-9,00	Sí
Conductividad	µS/cm	84,3	1250	Sí
Turbidez	UNT	6,86	5	Sí
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	0,0733	-	-
Nitritos	mg/L	0,0476	0,1	No
Nitratos	mg/L	0,202	45,0	Sí
Magnesio	mg/L	6,40	50	Sí
Sólidos Suspendidos	mg/L	2,00	-	-
Ortofosfato	mg/L	0,383	-	-

Tabla 8.11: Tabla de resultados análisis microbiológicos de agua del tanque (agua cruda)

Parámetro	Unidad	Resultado	Resolución 222/02	Cumple
Coliformes totales	NMP/100 mL	240	-	-
Coliformes fecales	NMP/100 mL	79	1000	Sí

Tabla 8.12: Tabla comparativa con la norma paraguaya de resultados análisis microbiológicos de agua del tanque (agua cruda)

Parámetro	Unidad	Resultado	Resolución 222/02	Cumple
Coliformes totales	NMP/100 mL	240	1,1	No
Coliformes fecales	NMP/100 mL	79	1,1	No

vuelve a superar ampliamente el límite de la Resolución 222/02 (0,0165 mg/L), lo que confirma la presencia continuada de materia orgánica. Los nitritos (0,0476 mg/L) se

encuentran muy por debajo de los límites establecidos (3,28 mg/L y 0,1 mg/L, respectivamente) y los nitratos (0,202 mg/L) están muy lejos del valor máximo permitido (45 mg/L). El magnesio (6,40 mg/L) presenta una concentración estable y baja frente al límite paraguayo (50 mg/L). Los sólidos suspendidos (2,00 mg/L) y el ortofosfato (0,383 mg/L), aunque no regulados por las normativas citadas, muestran ligeros aumentos respecto a las muestras anteriores, lo que podría estar relacionado con arrastres en la red de distribución o con la manipulación interna del sistema.

En el análisis microbiológico, los coliformes totales (240 NMP/100 mL) superan de forma muy notable el límite de la norma paraguaya (1,1 NMP/100 mL), reflejando una contaminación microbiológica significativa que podría haberse incrementado durante el transporte y almacenamiento en la red. Los coliformes fecales (79 NMP/100 mL) cumplen con la Resolución 222/02 ( $\leq 1000$  NMP/100 mL), pero exceden de forma clara el límite paraguayo (1,1 NMP/100 mL), lo que confirma la presencia de contaminación fecal activa en el punto de consumo.

En comparación con las muestras anteriores, esta presenta un empeoramiento claro en términos de turbidez, que pasa de valores próximos al límite paraguayo a superarlo. El nitrógeno amoniacal mantiene una tendencia ascendente, alcanzando su valor más alto en esta etapa. En el ámbito microbiológico, el aumento de coliformes totales es muy marcado respecto al punto de captación y al tanque, y aunque los coliformes fecales muestran una reducción frente al tanque, siguen incumpliendo la normativa paraguaya. Estos resultados sugieren que el proceso de filtrado y almacenamiento no está siendo suficiente para garantizar la calidad microbiológica del agua, pudiendo existir recontaminación en la red de distribución o en la propia instalación de la propiedad.

## **8.2. Problemática actual observada en el campo de trabajo**

### **8.2.1. Eléctrico**

La planta de Bahía Negra originalmente recibía energía mediante una red eléctrica de alta tensión de 240 kV en trifásica, que era transformada localmente a 220 V mediante un transformador para alimentar los motores también en trifásica. Esta energía provenía de la central hidroeléctrica de Itaipú, situada a unos 1400 km de distancia. La subestación más cercana a Bahía Negra es Vallemi 2, ubicada a aproximadamente 700 km. Itaipú cuenta con una capacidad de generación de 14.000 MW y opera con diez unidades destinadas a Paraguay a una frecuencia de 50 Hz. El agua de su embalse

desciende 120 metros para mover turbinas tipo Francis, generando electricidad que es elevada de 18 kV a 500 kV mediante transformadores y subestaciones con aislamiento de gas SF<sub>6</sub>. La empresa estatal ANDE es responsable del transporte y distribución de esta energía a través de redes de 500 kV y 220 kV que atraviesan el país. Sin embargo, debido a la lejanía de Bahía Negra respecto a estas infraestructuras y la ausencia de subestaciones intermedias, el suministro eléctrico en la zona era especialmente vulnerable a fluctuaciones, caídas de tensión y picos de voltaje que afectaban directamente al funcionamiento de los motores de la planta y a los suministros eléctricos de cada particular del pueblo.

Actualmente, este sistema no está en uso debido a la falta de mantenimiento del transformador, y la planta está conectada a la red de baja tensión del generador local que opera a gasolina. Este generador fue instalado por el gobierno como respuesta a una situación precaria: los equipos eléctricos se quemaban con frecuencia tanto en la planta como en las viviendas del pueblo, lo que generó numerosas quejas en la comunidad. Hasta que se establezca una red eléctrica estable y segura, el gobierno se ha comprometido a mantener el generador en funcionamiento. Este sistema cuenta con algunos elementos de protección eléctrica, como un contactor que interrumpe el suministro si se desbalancean las fases, un relé térmico que actúa al detectar sobrecalentamiento, y un relé de falta de fase, que se encarga de proteger los motores desconectándolos automáticamente cuando una de las fases del suministro falla o se interrumpe, evitando daños por funcionamiento asimétrico.

Se prevé la construcción de una nueva subestación eléctrica en Carmelo Peralta, a unos 250 km de Bahía Negra, cuya construcción comenzaría en 2026 con puesta en marcha estimada para 2027. Esta subestación será de 220/23 kV con una capacidad de 50 MVA, conectada a través de una línea de 75 km desde Vallemi 2. Su funcionamiento permitirá mejorar la capacidad de distribución eléctrica en toda la región del Chaco, especialmente en el extremo norte, brindando mayor estabilidad al sistema eléctrico. Esto abriría la posibilidad de reactivar el sistema de alimentación original desde Itaipú. De hecho, el hospital local aún dispone de un transformador en funcionamiento conectado a la red de alta tensión, lo que demuestra la viabilidad técnica del sistema si se garantiza la infraestructura adecuada.

### **8.2.2. Caracterización del estado del filtro de arena**

Para evaluar el comportamiento del filtro de arena, se realizaron ensayos experimentales usando la misma arena extraída del tanque de la planta. El objetivo fue estimar su eficacia mediante la medición del caudal de filtración y el cálculo del coeficiente de



Figura 8.1: Transformador en desuso



Figura 8.2: Transformador del hospital

permeabilidad ( $k$ ) aplicando la Ley de Darcy. El montaje consistió en un cilindro de 11,5 cm de diámetro interior (radio 5,75 cm, área transversal  $0,0104 \text{ m}^2$ ).

Como referencia de drenaje puro, primero se midió el flujo sin arena. Después se ensayó la arena original sin lavar, la arena lavada para retirar finos, y finalmente se tamizó la muestra para separar la fracción fina de las piedras, ensayando ambos escenarios: arena tamizada sola y arena con capa de piedras. En todos los casos se mantuvo la arena húmeda para evitar que absorbiera parte del agua y alterara los tiempos reales de paso.

Se vertió agua hasta una altura de 14cm en cada ensayo, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 8.13: Tabla de resultados análisis fisiológico agua del tanque (Agua cruda)

Ensayo	Altura agua (m)	Tiempo (s)	Q ( $\text{m}^3$ )	k (m/s)
Sin arena	0,14	2280	$6,39 \times 10^{-7}$	-
Arena sin lavar	0,10	8280	$1,26 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-5}$
Arena lavada	0,14	4740	$3,07 \times 10^{-7}$	$2,95 \times 10^{-5}$
Arena tamizada (solo)	0,14	3240	$4,49 \times 10^{-7}$	$2,77 \times 10^{-5}$
Arena tamizada y piedras	0,14	2580	$5,64 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-5}$

Donde los volúmenes se calcularon como  $V=A \cdot h$  y el caudal medio como  $Q=v/t$ .



Figura 8.3: Arena limpia del filtro  
*Fuente: Creación propia*



Figura 8.4: Arena tamizada  
*Fuente: Creación propia*



Figura 8.5: Piedras  
*Fuente: Creación propia*

El coeficiente de permeabilidad ( $k$ ) se estimó mediante:  $k = \frac{Q * L}{A * h}$ ,

usando la altura media como carga hidráulica: 5 cm para la arena sin lavar y 7 cm para el resto; y la respectiva altura del lecho utilizada para cada ensayo.

El conjunto de ensayos confirma que la arena analizada funciona como un medio filtrante eficaz, capaz de reducir de forma significativa la velocidad de paso del agua respecto al flujo libre observado sin material granular. La prueba de control sin arena, realizada con la misma base perforada, demuestra que el sistema por sí solo permite un drenaje rápido cuando no existe resistencia interna. Por tanto, la disminución del caudal

al añadir la arena se explica exclusivamente por la estructura porosa del material, que obliga al agua a recorrer trayectos tortuosos entre los granos.

El aumento progresivo del coeficiente de permeabilidad tras el lavado y el tamizado muestra que la muestra original contenía partículas finas, polvo o materia orgánica que obstruían los poros y reducían la permeabilidad efectiva. Aun así, los valores calculados (alrededor de  $2,95 \times 10^{-5}$  m/s para la arena lavada,  $2,77 \times 10^{-5}$  m/s para la arena tamizada sola y hasta  $7,0 \times 10^{-5}$  m/s al añadir las piedras como capa drenante) se mantienen dentro del rango característico de arenas finas o limosas ( $k=10^{-6}$  a  $10^{-4}$  m/s), claramente inferior al de arenas medias o gruesas.

Esto confirma que el material actual es apropiado para retener partículas pequeñas mediante filtración lenta, gracias a su estructura granulométrica. El término lenta no implica que sea más lento que el paso sin medio filtrante, sino que se refiere a la baja velocidad de circulación dentro del lecho, necesaria para permitir la sedimentación y la acción biológica. Por ello, la arena estudiada resulta adecuada para procesos de clarificación o como etapa de pretratamiento, pero no es la opción más recomendable para sistemas de filtración rápida que deban procesar grandes volúmenes de agua en tiempos reducidos, como los que demanda la planta. De ahí la importancia de optimizar la granulometría y la disposición de capas para asegurar la eficacia y estabilidad hidráulica del filtro.

### 8.2.3. Mantenimiento

Por otro lado, los problemas de mantenimiento afectan de forma directa la operatividad de la planta. La falta de piezas de recambio para motores y bombas, sumada a la corrosión de componentes metálicos que no cumplen con los estándares adecuados (como el uso de tornillos que no son de bronce o acero inoxidable), genera reparaciones constantes y paros imprevistos.

A esto se suma la quema de motores, así como la ausencia de piezas clave como llaves de paso o elementos de unión entre motores y sus impulsores, lo que dificulta aún más la continuidad del servicio.

El filtro de arena, parte fundamental del tratamiento, permanece inutilizado por acumulación de suciedad y moho, lo que hace necesaria una limpieza profunda y periódica que no siempre se realiza. Además, la falta de una estructura cimentada con reja para proteger la toma del río permite la entrada de plantas, lodo y animales al tubo de succión, provocando obstrucciones y daños en el sistema de captación. Todo esto se agrava por la falta de personal suficiente y capacitado para ejecutar las tareas de man-



Figura 8.6: Motor sin tornillos debido a la corrosión de los mismos  
*Fuente: Creación propia*



Figura 8.7: Motores y otros materiales quemados  
*Fuente: Creación propia*



Figura 8.8: Estado actual del cableado de los motores  
*Fuente: Creación propia*

tenimiento preventivo y correctivo, lo que acelera la degradación de la infraestructura existente.

#### **8.2.4. Gestión y operación**

En el ámbito de la gestión y operación, la planta enfrenta dificultades para sostener su funcionamiento básico. La falta de personal administrativo y técnico calificado limita la capacidad de monitorear y planificar reparaciones, así como de controlar el pago de las cuotas mensuales por parte de los usuarios. La morosidad es alta y los mecanismos de corte de suministro resultan costosos e ineficaces, ya que muchas familias revierten los cortes por su cuenta o se ven afectados por cortes generalizados que perjudican a toda la comunidad. Además, la ausencia de sistemas de medición y control del consumo de agua en cada vivienda dificulta aplicar cobros proporcionales y fomenta un uso poco eficiente del recurso. Esta situación debilita la sostenibilidad financiera del sistema, impide invertir en mejoras y deja la operación diaria expuesta a la improvisación.

## Capítulo 9

# Soluciones propuestas para restaurar la planta de tratamiento

Para garantizar la reactivación progresiva de la planta de tratamiento de Bahía Negra, se han definido una serie de soluciones técnicas, operativas y de formación que permitan abordar de forma integral los problemas detectados. A nivel técnico, se plantea la sustitución de motores y bombas dañadas, así como la reposición de piezas clave como llaves de paso y conexiones de los impulsores, incorporando materiales adecuados que eviten la corrosión. Además, se propone construir una estructura cimentada con reja en la toma de agua del río para reducir la entrada de sedimentos, plantas y animales que actualmente afectan al sistema de captación, al estar en mitad del río, esta estructura debería estar correctamente señalizada para evitar posibles daños causados por embarcaciones. En un principio, esta última parte podría hacerse mediante una reja simple, pero es importante recalcar que esta sería una medida a corto plazo que en ningún momento podría remplazar la cimentación que es la solución por implementar.

De manera complementaria, se plantea desplazar la toma de agua unos metros aguas arriba, en una zona donde el caudal sea más constante y esté menos expuesto a la acumulación de residuos y materia orgánica que se genera tras el vertido de las aguas residuales de la comunidad. Este cambio permitiría una captación más limpia y eficiente, mejorando el rendimiento del sistema desde su punto de origen.

Dentro del proceso de potabilización, también se considera necesario incorporar un sistema de retro lavado del filtro de arena, lo que permitirá alargar la vida útil del medio filtrante, garantizar su eficiencia en la remoción de partículas y reducir la necesidad de paradas prolongadas para limpieza manual. Esta mejora técnica facilitará la operación y mantenimiento regular del sistema con menos recursos.

Otro componente clave será la revisión y rehabilitación de las redes de distribución.

Se han detectado que hay pérdidas importantes de agua debidas a fugas internas en las tuberías. Para hacer frente a esta situación y mitigar sus efectos negativos, se propone recubrir internamente las tuberías existentes con materiales sellantes. Esto permitiría reducir significativamente las fugas y, por tanto, mejorar la precisión del sistema y optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico tratado.

En el ámbito eléctrico, se contempla la inspección técnica de las actuales medidas de protección y la instalación de otros sistemas de protección como supresores de sobretensión y reguladores de tensión para mitigar los efectos de la inestabilidad de la red, así como el remplazo y revisión del transformador (220kV / 220 V) original para restablecer la conexión a la red de alta tensión cuando la nueva subestación de Carmelo Peralta entre en funcionamiento. Para complementar la seguridad energética, se prevé la posible instalación de sistemas de generación renovable, como paneles solares, que refuercen la autonomía de la planta.

Finalmente, se considera clave reforzar la parte operativa y de gestión mediante la contratación de personal técnico capacitado para garantizar las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo, así como implementar sistemas de medición del consumo de agua en cada vivienda para mejorar el control y la sostenibilidad financiera del servicio. Todo ello se acompaña de acciones de formación a la población local para promover buenas prácticas de uso y cuidado del sistema, asegurando así la viabilidad a largo plazo del abastecimiento de agua tratada en Bahía Negra.

# Capítulo 10

## Estudio económico

La elaboración del presente presupuesto ha sido realizada con base en la información técnica recopilada en el diagnóstico previo, los planos entregados y el análisis de muestras efectuado en la planta potabilizadora de Bahía Negra. Dicho presupuesto ha sido realizado de la mano de la empresa *Ecosistema del Agua*, con quienes se mantuvieron reuniones en Paraguay. Conviene destacar que la empresa ha colaborado de manera desinteresada, sin ánimo de lucro, y que los valores presentados corresponden a un presupuesto referencial, el cual deberá ser confirmado tras una inspección técnica en terreno.

La planta de tratamiento en cuestión utilizada para el cálculo abastece de agua potable a una comunidad conformada por aproximadamente 203 familias (cerca de 1.000 personas), contando con una capacidad instalada de 200 m<sup>3</sup>/día de potabilización.

### 10.1. Alcance general

El proyecto contempla la reactivación integral de la planta potabilizadora existente, lo cual incluye:

- Inspección técnica inicial.
- Reparación y adecuación electromecánica.
- Calibración de procesos y puesta en marcha.
- Capacitación del personal local encargado de la operación y mantenimiento.

La propuesta considera la participación de un equipo técnico multidisciplinar:

- Ingeniero encargado de la supervisión general del proyecto, seguimiento de trabajos y elaboración de manuales de operación.

- Arquitecto responsable de la elaboración de planos de adecuación, diagramas de instalación y memoria técnica.
- Equipo técnico especializado (mecánicos, eléctricos, montadores e instrumentistas) para instalaciones, pruebas y puesta en marcha.
- Capacitadores especializados para entrenamiento operativo y de mantenimiento.

Es importante señalar que los precios no incluyen el eventual cambio de cañerías y/o cables de potencia y control. Dichas necesidades podrán ser identificadas en la inspección inicial y, de ser requeridas, se presupuestarán de manera independiente.

## 10.2. Desglose económico

El presupuesto se estructura en dos fases diferenciadas: Fase A, correspondiente a la reactivación de la planta; y Fase B, relativa a la operación y mantenimiento durante el primer año.

### Fase A – Reactivación de la planta

Ítem	Descripción	Precio (USD)
1	Visita técnica inicial e informe diagnóstico (inspección mecánica, eléctrica y de proceso).	3.000
2	Reparación y adecuación de la planta de tratamiento (electromecánico, dosificación, filtración, tableros, instrumentación y pruebas en frío).	82.000
3	Puesta en marcha, pruebas de desempeño y capacitación operativa.	3.000
<b>Subtotal Fase A – Reactivación</b>		<b>88.000</b>

La reparación (Ítem 2) incluye los siguientes materiales y trabajos principales:

- **Equipos y mecánica:** bombas Pedrollo y KSB, motor Valco, acoplamientos Madeflex, mecanizado de piezas, base nueva para bomba y motor.
- **Proceso y tratamiento:** bombas dosificadoras de sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) e hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ); filtro de arena de  $2,2 \text{ m}^3$  con capacidad de  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ .
- **Electricidad y control:** nuevo panel de control con protecciones, boyas automáticas de nivel, cableado completo, puesta a tierra y protecciones térmicas.
- **Consumibles y varios:** pernos, sellos, empaquetaduras, soportes, herrajes y materiales menores.

## Fase B – Operación y Mantenimiento (Año 1)

Ítem	Descripción	Precio (USD)
4	Mantenimiento anual (visitas trimestrales): checklist mecánico/eléctrico, calibración de dosificación, limpieza de filtros, ajuste de parámetros y reporte técnico.	17.700
5	Insumos de operación anual: coagulante ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), hipoclorito de sodio, reposición de medios filtrantes, kits de sellos/empaques y consumibles.	25.000
<b>Subtotal Fase B – O&amp;M Año 1</b>		<b>42.700</b>

## Resumen de inversión

Concepto	Monto (USD)
Subtotal Fase A – Reactivación	88.000
Subtotal Fase B – Operación y Mantenimiento (Año 1)	42.700
<b>TOTAL PROPUESTA</b>	<b>130.700</b>

### 10.2.1. Supuestos y exclusiones

El presupuesto incluye únicamente los equipos, materiales y personal especializado descritos en la propuesta. Quedan excluidos: cambio de cañerías de proceso, redes eléctricas externas a tableros, obras civiles mayores (fundaciones, salas nuevas), techos o edificaciones, acometidas externas, tratamiento de lodos, laboratorios acreditados y permisos/regulaciones. Asimismo, se asume que la calidad del agua cruda se encuentra dentro de rangos compatibles con la tecnología planteada.

### 10.2.2. Entregables

La propuesta contempla los siguientes entregables:

- Informe de diagnóstico (posterior a la visita técnica).
- Plan de trabajos y cronograma.
- Planos unifilares y arquitectónicos de adecuación.
- Manuales de operación y mantenimiento elaborados por el ingeniero supervisor.
- Registro de parámetros de puesta en marcha y protocolo de pruebas.
- Capacitación integral al personal operador, tanto teórica como práctica.

### **10.2.3. Condiciones comerciales**

- Forma de pago: 50 % anticipo para aprovisionamiento; 45 % contra instalación mecánico-eléctrica y pruebas en frío; 5 % contra puesta en marcha y capacitación.
- Plazo de ejecución: sujeto a tiempos de entrega de equipos y aprobación del diagnóstico.
- Garantía: 12 meses frente a defectos de fabricación/instalación bajo condiciones normales de operación.

# Capítulo 11

## Divulgación

Desde un primer momento, el proyecto se ha entendido como algo transversal por parte del equipo, por lo que contar con el apoyo de los distintos agentes sociales de la zona es parte clave del trabajo. En este sentido, la tarea de la divulgación se entiende como una forma de preservar el trabajo y la naturaleza.

### 11.1. Educación a población infantil y juvenil

La población joven es un eje principal dentro de la conservación del medio y la preservación de los avances conseguidos en la planta. Es por ello por lo que la divulgación con niños y jóvenes se ha articulado a través de la escuela, donde se han desarrollado actividades participativas de concienciación para que comprendan la importancia de cuidar el río como fuente de agua para la comunidad y la necesidad de consumir siempre agua tratada. También se ha trabajado para que entiendan que, aunque el agua pueda parecer limpia, puede contener microorganismos que afectan directamente a su salud, por lo que el tratamiento del agua es fundamental para prevenir enfermedades. Una de las dificultades encontradas ha sido la coincidencia de estas actividades con las vacaciones de invierno, lo que ha limitado las posibilidades de desarrollar actuaciones más intensas.

Además, se han realizado actividades y juegos con los niños de la zona para trabajar la importancia de la separación de residuos y la gestión adecuada de la basura (ANEXO II). A través de dinámicas didácticas, se les ha mostrado cómo una correcta clasificación y disposición de los desechos contribuye a mantener limpio el entorno natural, especialmente el río, evitando la contaminación del agua y protegiendo la salud de toda la comunidad. También se trabajó con los más pequeños (menores de 5 años) a través de material para colorear.



Figura 11.1: Actividades en la escuela

*Fuente: Creación propia*



Figura 11.2: Actividades en la escuela

*Fuente: Creación propia*

## 11.2. Concienciación de la población adulta

Con la población adulta, se ha trabajado desde dos líneas complementarias. Por un lado, se han realizado encuentros y reuniones con los agentes sociales de Bahía Negra para conocer de cerca cómo se maneja y se trata el agua en cada hogar, así como el uso que se le da al agua potable disponible. También se ha colaborado con la asociación Pro Comunidades Indígenas (PCI) para conocer de primera mano los métodos de tratamiento de agua basados en la naturaleza que se están impulsando como alternativas sostenibles. Por otro lado, se han llevado a cabo conferencias abiertas en Bahía Negra y en la comunidad indígena de Puerto Diana, donde se ha explicado a la población adulta la importancia de proteger la cuenca del río, la función de cada producto químico utilizado para potabilizar el agua y la forma correcta de aplicarlos,

evitando dosis inadecuadas que puedan suponer riesgos para la salud. Estas charlas buscan que la comunidad comprenda mejor el método de tratamiento de la planta y pueda replicar prácticas seguras en sus hogares.

### **11.3. Formación técnica**

La formación técnica se enfrenta a varios desafíos importantes en el caso de la planta potabilizadora de Bahía Negra. Por un lado, existe una falta de interés general, junto con la dificultad de mantener la constancia necesaria para capacitaciones que requieren seguimiento sostenido. Además, la percepción de que esta formación técnica ofrece pocas o ninguna oportunidad real de empleabilidad reduce aún más la motivación. Actualmente, la única empleada de la planta cuenta únicamente con una formación básica, suficiente para tareas operativas de distribución, como achicar el agua cuando hace falta o resolver pequeños inconvenientes. Cabe mencionar, no obstante, que durante una de las charlas realizadas en las comunidades indígenas de Puerto Diana, se observó el caso de una señora que mostró disposición e interés por escuchar. En cualquier caso, la labor de impulsar una formación técnica más completa y sostenida es un tema que todavía deberá tratarse con mayor profundidad en el futuro.

# Capítulo 12

## Conclusiones y Trabajos Futuros

### 12.1. Conclusiones

El presente trabajo ha permitido realizar un diagnóstico técnico y económico de la situación del abastecimiento de agua potable en Bahía Negra, identificando las principales carencias del sistema actual y proponiendo una solución viable adaptada a las condiciones locales para el correcto uso de la planta de potabilización.

En primer lugar, el análisis de contexto puso de manifiesto la relevancia del acceso al agua segura como un elemento esencial para la salud y la calidad de vida de la población, así como la necesidad urgente de mejorar las infraestructuras existentes. La revisión de la situación actual evidenció deficiencias en el proceso de captación, distribución y tratamiento del agua, lo que conlleva riesgos sanitarios y ambientales significativos. Este diagnóstico inicial permitió orientar el diseño hacia una solución técnica realista y con impacto directo sobre la comunidad.

Desde el punto de vista técnico, se definió el esquema de planta basado en procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Se plantearon los cambios necesarios, considerando equipos y materiales accesibles en el contexto dado. Todo ello se concibió con un enfoque de simplicidad, robustez y facilidad de operación, de modo que la planta pueda ser gestionada de forma sostenible por personal local con una capacitación básica.

En este sentido, los planos elaborados durante el proyecto constituyen una herramienta fundamental, ya que permiten visualizar de manera clara y precisa la disposición de las distintas unidades de la planta, las conexiones hidráulicas y eléctricas, y el flujo de tratamiento del agua desde la captación hasta la distribución. Estos documentos no solo aportan rigor al diseño, sino que también resultan esenciales para la ejecución

futura de cualquier arreglo en la obra, el dimensionamiento de los equipos y la planificación de las labores de operación y mantenimiento. La representación gráfica se convierte así en un puente entre la teoría y la práctica, facilitando la comprensión del sistema tanto por parte de los técnicos especializados como de la propia comunidad beneficiaria.

El análisis económico, a partir del presupuesto facilitado por la empresa *Ecosistema del Agua*, refleja una inversión total estimada de 130.700 USD. Esta cifra se distribuye en 88.000 USD destinados a la reactivación integral de la planta y 42.700 USD correspondientes a la operación y mantenimiento durante el primer año. Más allá del volumen de inversión, los resultados permiten constatar que se trata de una propuesta técnica completa, que no solo contempla la adecuación electromecánica de la planta, sino también la capacitación del personal local y el aseguramiento de un suministro estable y seguro de agua potable. De este modo, el coste económico adquiere una justificación sólida en función del impacto social, sanitario y ambiental que supone garantizar agua segura para cerca de 1.000 personas en la comunidad de Bahía Negra.

Más allá de los resultados técnicos y económicos, el proyecto tiene un valor añadido de carácter social. La implantación de la planta no solo contribuirá a reducir enfermedades de origen hídrico, sino que también supondrá una mejora en las condiciones de vida de las 203 familias beneficiarias. Además, al tratarse de un diseño adaptado a las posibilidades de operación local, se promueve la autonomía de la comunidad en la gestión de un recurso tan vital como el agua.

Finalmente, cabe señalar que este estudio constituye una base inicial para la implementación del proyecto. Aunque las estimaciones realizadas son realistas y se han apoyado en reuniones con empresas especializadas en Paraguay, los valores definitivos deberán ajustarse con las cotizaciones oficiales y con las pruebas de tratabilidad en campo. No obstante, el trabajo demuestra la viabilidad técnica y económica de la solución propuesta, aportando un marco sólido para avanzar hacia la materialización del proyecto.

En conclusión, la propuesta de planta potabilizadora en Bahía Negra representa una solución integral y sostenible a una problemática crítica. Integra el diagnóstico de la situación actual, un diseño técnico apoyado en planos y esquemas gráficos adaptados al entorno, y un análisis económico detallado, estableciendo las bases para mejorar el acceso al agua potable en la comunidad. Su puesta en marcha supondrá un avance significativo en términos de salud pública, bienestar social y desarrollo local, reafirmando el valor del ingeniero como agente de transformación al servicio de la sociedad.

## **12.2. Futuros Proyectos**

### **12.2.1. Estudio sobre la instalación de fuentes de energía renovables**

Uno de los principales desafíos para la población de Bahía Negra es la inestabilidad de la red eléctrica, que afecta de forma directa a servicios básicos como la planta potabilizadora de agua. La dependencia de un suministro vulnerable y la falta de infraestructura de respaldo comprometen la continuidad de operaciones esenciales, especialmente en una zona donde los cortes de energía y las variaciones de voltaje son frecuentes. Por ello, se plantea la necesidad de realizar un estudio detallado sobre la instalación de fuentes de energía renovables, como sistemas fotovoltaicos o biogás, que garanticen una alternativa estable y sostenible. Experiencias cercanas en comunidades del Chaco paraguayo y del Pantanal han demostrado la viabilidad de estas tecnologías para reforzar la autonomía energética local y asegurar el funcionamiento de infraestructuras clave como la captación, tratamiento y distribución de agua potable.

### **12.2.2. Estudio del tratamiento de los residuos en Bahía Negra**

Otro proyecto prioritario para el desarrollo sostenible de Bahía Negra es la realización de un estudio exhaustivo sobre el tratamiento de los residuos sólidos urbanos. Actualmente, la comunidad dispone de un vertedero que no cuenta con infraestructura de protección ambiental ni sistemas de control, funcionando como un simple pozo excavado en la tierra. Además de este vertido directo, de forma regular se quema la basura, tanto en hogueras generales dentro del vertedero como en hogueras individuales en los jardines de las viviendas, debido en parte a la falta de servicio de recogida de desechos, generando emisiones contaminantes adicionales y aumentando el riesgo de incendios descontrolados en la zona. Esta situación convierte al vertedero en un foco permanente de contaminación del suelo y de las aguas subterráneas y superficiales, especialmente durante la temporada de lluvias, cuando los residuos pueden llegar fácilmente a filtrarse hacia cursos de agua cercanos, incluyendo el río del que se capta el agua para consumo. La falta de medidas de impermeabilización, separación y gestión controlada de los residuos incrementa el riesgo de proliferación de enfermedades, expone a la población a condiciones de insalubridad y eleva la posibilidad de fuegos accidentales que pongan en peligro viviendas y áreas naturales circundantes. Un estudio técnico permitirá evaluar alternativas viables para la construcción de un sistema de disposición final con relleno sanitario controlado, zonas de separación de residuos y posibles iniciativas de reciclaje comunitario, incorporando también estrategias de prevención de incendios mediante una gestión adecuada de los residuos combustibles. Con ello se contribuiría a

mitigar los impactos negativos sobre la salud pública, garantizar la protección del agua y reforzar la seguridad y gestión ambiental de la zona, alineándose con las necesidades reales de una población que depende de la calidad del entorno para asegurar su bienestar presente y futuro. Además, se podría considerar la posibilidad de aprovechar estos residuos para la generación de energía por medio de biogás, un combustible renovable obtenido de la descomposición de materia orgánica. Este proyecto, muy ambicioso, reforzaría el objetivo de avanzar hacia una sociedad más sostenible y comprometida con el uso eficiente de todos sus recursos.

### **12.2.3. Proyección de una planta depuradora**

Como complemento clave al tratamiento de residuos y al actual proyecto de tratamiento del agua, se propone la proyección de una planta depuradora para Bahía Negra, con el objetivo de reducir el impacto ambiental que genera el vertido directo de aguas residuales al río. Actualmente, la falta de infraestructura de saneamiento provoca que las aguas residuales de viviendas y otros centros desemboquen en el río sin tratamiento previo, afectando la calidad del agua que después se utiliza para consumo y otras actividades domésticas. La construcción de una planta depuradora permitiría mejorar significativamente la calidad del agua del río, proteger la biodiversidad local y reforzar la salud de la población, al evitar la contaminación cruzada entre aguas residuales y la fuente de captación de agua. Este proyecto se plantea como una necesidad prioritaria para acompañar la mejora integral del sistema de abastecimiento y saneamiento del distrito.

### **12.2.4. Educación y sensibilización ambiental comunitaria**

Este proyecto podría desarrollarse en colaboración con CIHS de la Universidad Pontificia Comillas. Consistiría en diseñar e implementar talleres, charlas y materiales didácticos adaptados a la realidad local, orientados a concienciar a la población sobre la importancia de conservar los recursos hídricos, aplicar buenas prácticas de higiene y gestionar adecuadamente los residuos. Las actividades podrían realizarse en distintos espacios comunitarios, involucrando tanto a familias como a líderes locales y jóvenes, para reforzar estos conocimientos y asegurar su puesta en práctica en la vida cotidiana.



Figura 12.1: Concienciación sobre el tratamiento de los residuos en Bahía Negra  
Fuente: Creación propia

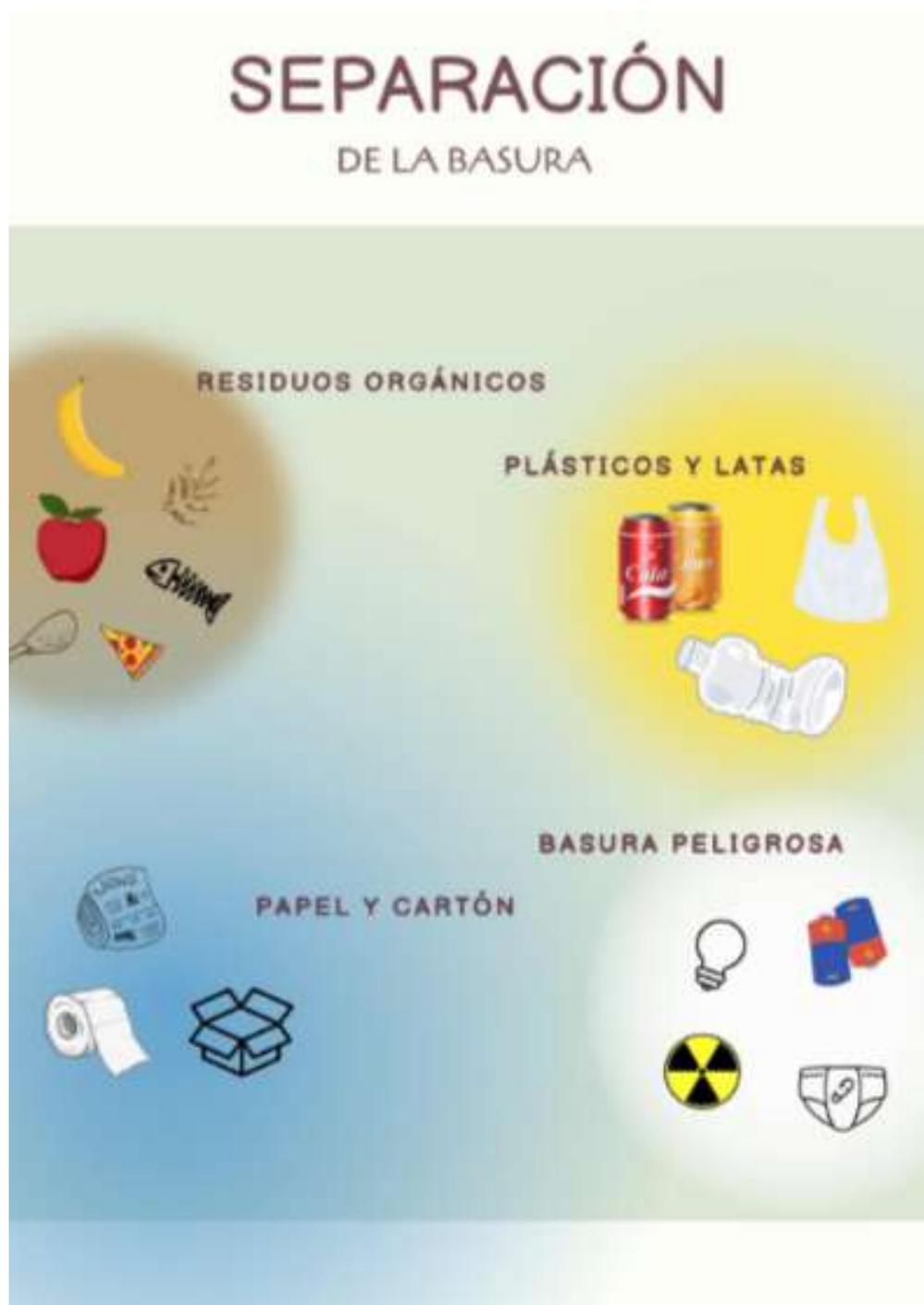
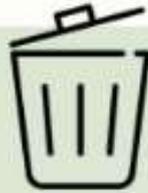


Figura 12.2: Explicación de la separación de los residuos para su posterior reciclaje  
*Fuente: Creación propia*

## CÚANTO TARDA LA **BASURA** EN DESAPARECER DE TU ENTORNO



**PLATANO**



3 - 4 SEMANAS

**PAPEL Y CARTÓN**



2 SEMANAS - 1 AÑO

**GIGARROS**



2-12 AÑOS

**CHICLES**



5 AÑOS

**LATAS**



10 AÑOS

**BOLSAS DE  
PLÁSTICO**



100 AÑOS

**BOTELLAS DE  
PLÁSTICO**



450 AÑOS

**PILAS**



500 AÑOS

**VIDRIO**



4000 AÑOS

Figura 12.3: Mapa conceptual sobre el tiempo de descomposición de distintos desechos  
Fuente: Creación propia

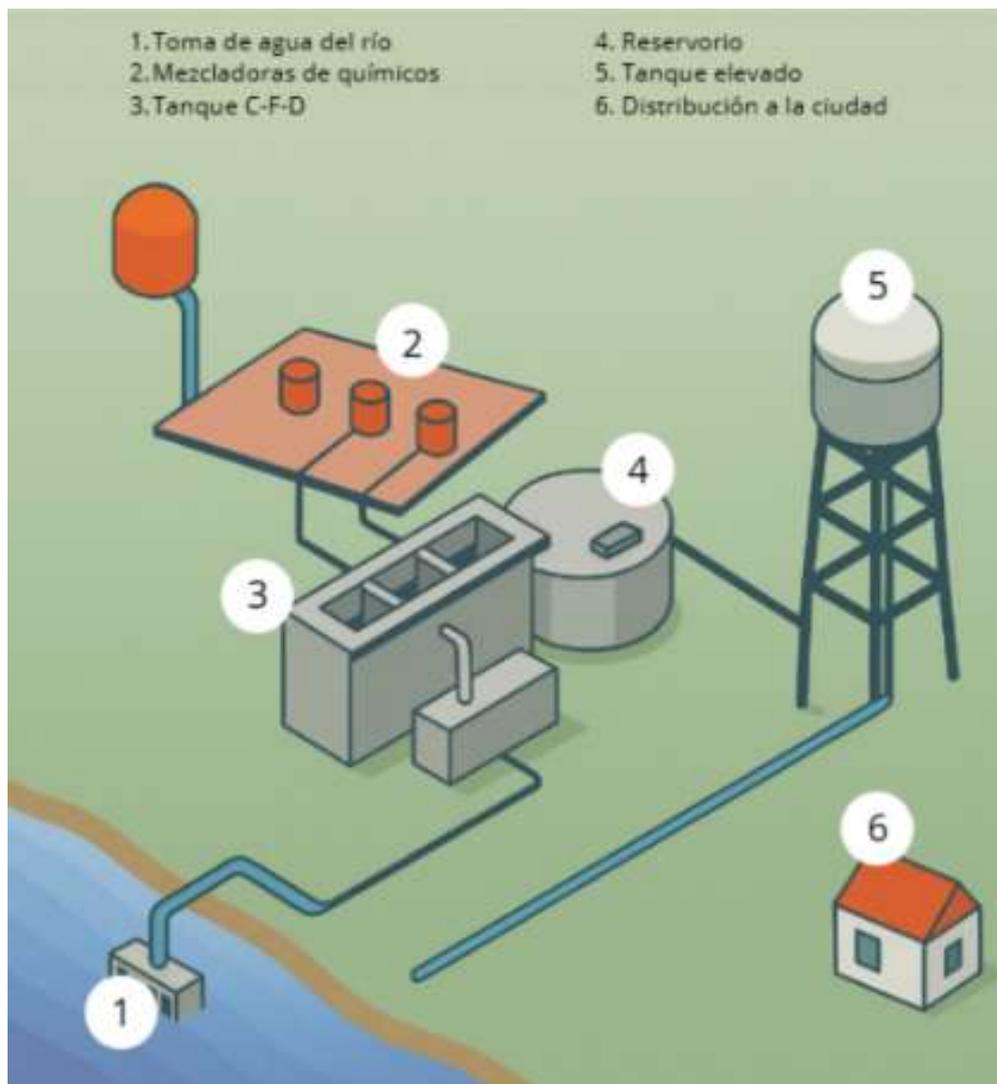


Figura 12.4: Funcionamiento de la planta de potabilización de Bahía Negra  
*Fuente: Creación propia*

## Anexo II: Instituciones y entidades de relevancia

### **Fe y Alegría:**

En una breve visita tuvimos un primer acercamiento al trabajo de los Jesuitas en Paraguay, manteniendo reuniones con la directora de su centro en Asunción. Tras una entrevista en su radio local pudimos pasear por sus oficinas mientras aprendíamos sobre el país, sus territorios y su cultura.

### **Junta de Saneamiento:**

Entidad clave en la gestión de la planta de tratamiento de Bahía Negra con quienes pudimos tener una fructífera conversación sobre los problemas que enfrenta la planta en la actualidad y sus posibles soluciones. El presidente nos recibió y nos explicó los actuales proyectos de la Junta, así como su funcionamiento. También hemos podido reunirnos con el resto de miembros de la misma para tener una visión completa de la planta y sus necesidades.

### **WWF (World Wildlife Fund):**

Organización estratégica en la realización de proyectos en el Chaco y todas las regiones del Paraguay. Su actual proyecto ‘Voces para la Acción Climática Justa (VAC)’ está focalizado en afrontar los problemas de las comunidades del Chaco mediante soluciones locales. De esta reunión obtuvimos información sobre otras iniciativas que tratan de cuidar el agua de la zona como la Mesa Interinstitucional de agua del Chaco (MIAS Chaco), enfocándose en la problemática que nosotros también tratamos.

### **PCI (Pro Comunidades Indígena):**

Esta asociación que busca empoderar a las comunidades indígenas, permitiéndoles tener acceso a recursos básicos mediante medios basados en la naturaleza y formaciones locales. Sus proyectos van desde instalación de placas solares hasta la potabilización de agua minimizando el uso de químicos. Ellos pudieron mostrarnos los métodos que utilizaban y tienen que ver con nuestro proyecto de tratamiento de agua, abriéndonos la mente a soluciones diferentes.

### **Municipalidad:**

Fuimos recibidos por el personal de la municipalidad (Concejales, Secretario del

Intendente y trabajadores del lugar) quienes nos explicaron los problemas que enfrenta el conjunto del municipio, así como la evolución de la planta y el agua desde hace varios años, entendiendo así el origen de los problemas observados y facilitando la propuesta de soluciones. También nos dieron acceso a mapas de la localidad que nos fueron de gran ayuda.

#### **Hospital de Bahía Negra:**

Los médicos y personal de hospital nos mostraron la totalidad de sus instalaciones, incluido el tratamiento que hacen del agua en sus instalaciones. También nos aportaron datos sobre la influencia del agua en la salud de la población, así como los proyectos ambiciosos que ya han empezado a tomar forma en el hospital (instalación de placas fotovoltaicas para lograr la eficiencia energética dentro del hospital).

#### **Brigada de Bomberos:**

La Brigada es la asociación formada por voluntarios, hombres y mujeres de Bahía Negra, que se dedican a la ayuda en la extinción de incendios. Ellos nos han explicado la problemática recurrente de incendios forestales en la zona, que acaban con la biodiversidad de la zona y empeoran la calidad del agua. Su formación está muy ligada al trabajo de la Asociación ECO Pantanal, quienes buscan ayudas para la obtención de material táctico.

#### **Mujeres Emprendedoras:**

La asociación de Mujeres Emprendedoras está formada por varias mujeres de Bahía Negra que se dedican a el cultivo de verduras y hortalizas de forma local y proyectos de promoción de la cultura Bahianegrense. Además de esto, la asociación ayuda a sus integrantes a emprender en sus propios negocios. Su ayuda durante el proyecto ha sido clave para entender la utilización del agua en otros ámbitos y la obtención de esta por otros métodos como el aprovechamiento del agua de lluvia.

#### **Comunidad Indígena de Puerto Diana:**

Pese a no estar conectados a la red de distribución de la planta de Bahía Negra, la comunidad indígena nos acogió para una conferencia en la que les explicamos la función de los químicos que usan para el tratamiento del agua y explicándoles los distintos métodos que existen para ello, permitiéndoles ampliar su conocimiento en esta materia para mejorar su salud y bienestar. También pudimos explicarles las cantidades que deben usar de cada químico para no dañar su salud y pudimos escucharlos en sus preocupaciones y explicaciones sobre cómo usan el agua y tratan los residuos.

#### **Base Naval:**

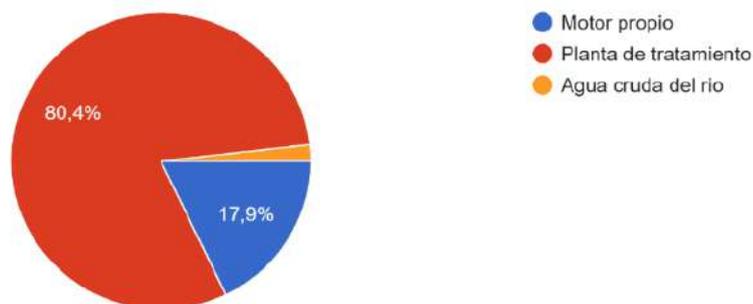
Unidad militar encargada de la defensa y la custodia de la región. Pese a su control parcial sobre los recursos hídricos, no tienen competencias técnicas ni operativas sobre la planta de potabilización. El agua que consumen es tratada manualmente por ellos mismos mediante la sedimentación en tambores con productos químicos básicos. Nos comentaron su manera de manejar los residuos, los problemas eléctricos de la zona y

cómo ellos se protegían ante los mismos. Adicionalmente, nos plantearon la falta de conocimiento técnico y de conciencia social sobre el valor del agua en la comunidad, y que esto perjudicaba a la sostenibilidad de la planta.

## Anexo III: Preguntas y respuestas de la encuesta a Bahía Negra

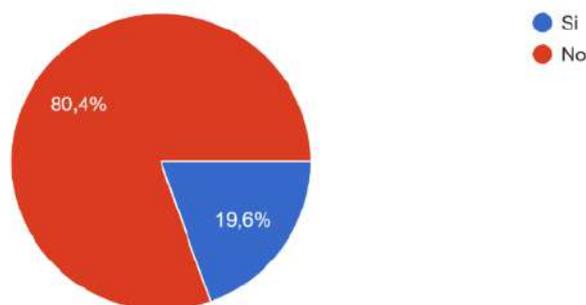
¿Cómo accedes al agua?

56 respuestas



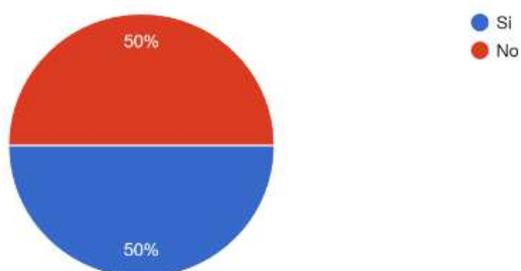
¿Crees que el agua que consumes es segura para la salud de personas y animales?

56 respuestas



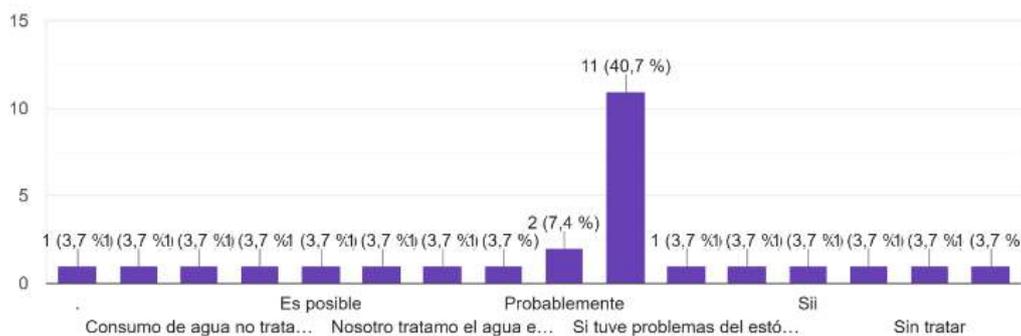
¿Has ido al hospital por algún problema gastrointestinal en estos últimos 3 años?

56 respuestas



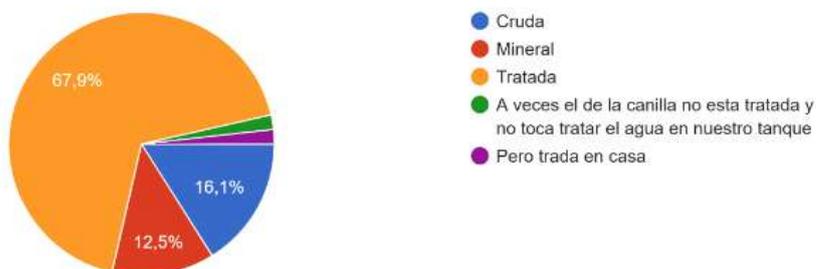
Si has ido al hospital por esta razón, ¿el problema tuvo origen en el consumo de agua no tratada?

27 respuestas



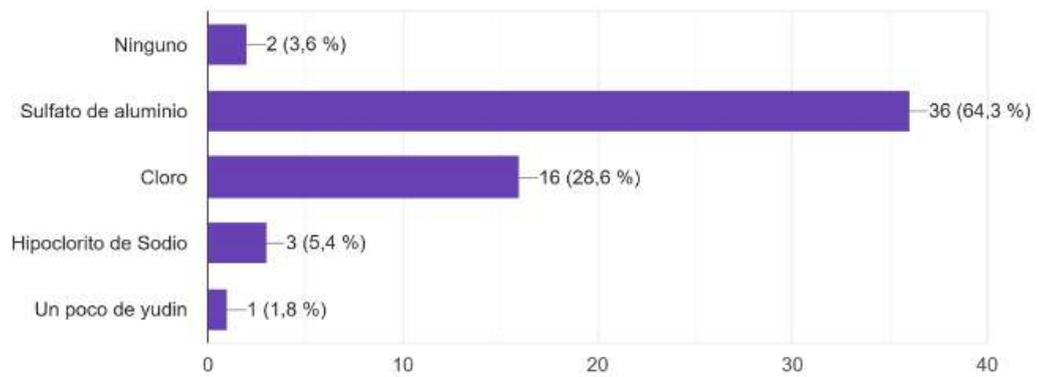
¿Que agua consumes?

56 respuestas



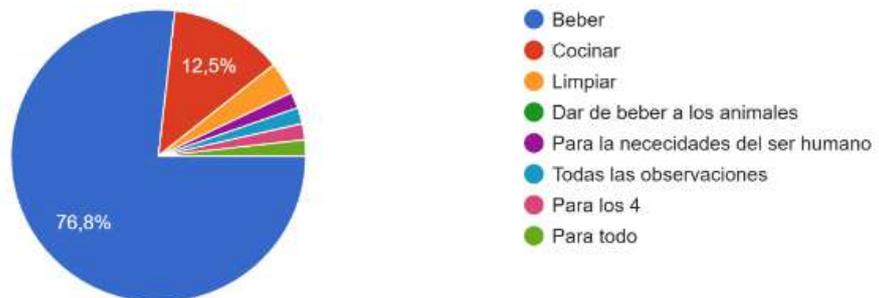
### En caso de que trates tú el agua, qué tratamiento usas para potabilizar el agua en tu casa?

56 respuestas



### ¿Para que usas el agua tratada?

56 respuestas



## Declaración de Uso de Herramientas de Inteligencia Artificial Generativa en Trabajos Fin de Grado

**ADVERTENCIA:** Desde la Universidad consideramos que *ChatGPT* u otras herramientas similares son herramientas muy útiles en la vida académica, aunque su uso queda siempre bajo la responsabilidad del alumno, puesto que las respuestas que proporciona pueden no ser veraces. En este sentido, NO está permitido su uso en la elaboración del Trabajo fin de Grado para generar código porque estas herramientas no son fiables en esa tarea. Aunque el código funcione, no hay garantías de que metodológicamente sea correcto, y es altamente probable que no lo sea.

Por la presente, yo, Blanca Rodríguez Martínez, estudiante de Programa de la Universidad Pontificia Comillas al presentar mi Trabajo Fin de Grado titulado “Diseño y propuesta de mejora de un sistema de potabilización de agua en una comunidad rural en Paraguay”, declaro que he utilizado la herramienta de Inteligencia Artificial Generativa *ChatGPT* u otras similares de IAG de código sólo en el contexto de las actividades descritas a continuación:

1. Brainstorming de ideas de investigación: Utilizado para idear y esbozar posibles áreas de investigación.
2. Crítico: Para encontrar contra-argumentos a una tesis específica que pretendo defender.
3. Referencias: Usado conjuntamente con otras herramientas, como Science, para identificar referencias preliminares que luego he contrastado y validado.
4. Metodólogo: Para descubrir métodos aplicables a problemas específicos de investigación.
5. Interpretador de código: Para realizar análisis de datos preliminares.
6. Estudios multidisciplinarios: Para comprender perspectivas de otras comunidades sobre temas de naturaleza multidisciplinar.
7. Constructor de plantillas: Para diseñar formatos específicos para secciones del trabajo.

8. Corrector de estilo literario y de lenguaje: Para mejorar la calidad lingüística y estilística del texto.
9. Generador previo de diagramas de flujo y contenido: Para esbozar diagramas iniciales.
10. Sintetizador y divulgador de libros complicados: Para resumir y comprender literatura compleja.
11. Generador de datos sintéticos de prueba: Para la creación de conjuntos de datos ficticios.
12. Generador de problemas de ejemplo: Para ilustrar conceptos y técnicas.
13. Revisor: Para recibir sugerencias sobre cómo mejorar y perfeccionar el trabajo con diferentes niveles de exigencia.
14. Generador de encuestas: Para diseñar cuestionarios preliminares.
15. Traductor: Para traducir textos de un lenguaje a otro.

Afirmo que toda la información y contenido presentados en este trabajo son producto de mi investigación y esfuerzo individual, excepto donde se ha indicado lo contrario y se han dado los créditos correspondientes (he incluido las referencias adecuadas en el TFG y he explicitado para que se ha usado *ChatGPT* u otras herramientas similares). Soy consciente de las implicaciones académicas y éticas de presentar un trabajo no original y acepto las consecuencias de cualquier violación a esta declaración.

Fecha: 28 de Agosto de 2025

Firma: Blanca Rodríguez Martínez

# Referencias

Albert Pérez Matamala, & Mercè Fargas Clua. (s.f.). *Manual técnico para la gestión comunitaria de sistemas de agua*. Associació Catalana d'Enginyeria Sense Fronteres, en coordinación con Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal Francisco de Orellana “Secretaría del Agua Demarcación Hidrográfica Napo.

Ramírez Quirós, F. (s.f.). *Tratamiento de desinfección del agua potable*. Canal de Isabel II.

Comisión Nacional del Agua. (2016). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Diseño de plantas potabilizadoras de tecnología simplificada*.

United Nations Water. (2018). *Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua: Informe mundial sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018*. Naciones Unidas.

Wambua, F. W., & Ochieng, B. (2018). *Sustainable treatment of drinking water using natural coagulants in developing countries: A case of informal settlements in Kenya*. European Water Management Online, enero 2018.

Hayes, F. E. (1996). *Seasonal and geographical variation in resident waterbird populations along the Paraguay River*.

Asociación Española del Aluminio, Sector Aluminio y Salud. (s.f.). *Compuestos de aluminio en tratamientos de aguas*.

Amazon. (s.f.). *Sitio web de Amazon*. <https://www.amazon.es/>

CYPE. (s.f.). *Web de CYPE para precios*. <https://generadordeprecios.info/>.

Universidad Pontificia Comillas. (s.f.). *Diapositivas de Ingeniería Medioambiental*.

Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología (INTN). (2011). *NP 24*

001 80. *Agua potable. Requisitos generales* (6<sup>a</sup> ed.). Asunción, Paraguay. (Reaprobada en 2016).

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). *Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro*. Recuperado de <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2023-628>

Municipio de Bahía Negra. (2023–2028). *Plan local de acción climática 2023–2028*.

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). *Guías para la calidad del agua de consumo humano* (4<sup>a</sup> ed., con primera adenda). Ginebra: OMS.

Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2019). *Agua y saneamiento en las Américas: Retos y perspectivas*. OPS/OMS.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2016). *El agua, la agricultura y la seguridad alimentaria*. Roma: FAO.

UNESCO. (2019). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. París: UNESCO.