

# Humedales Artificiales, una alternativa para la depuración de Aguas Residuales en el Municipio de Mizque, Bolivia.

**Alicia Carvajal Rowan**

Máster en Estrategias y Tecnologías para el Desarrollo UPM-UCM  
alicia.carvajal.rowan@gmail.com

**Claudia Zapattini Irala**

Máster en Estrategias y Tecnologías para el Desarrollo UPM-UCM  
clau.zapattini@gmail.com

**Carolina Quintero Zamora**

Máster en Estrategias y Tecnologías para el Desarrollo UPM-UCM  
caroquintz07@gmail.com

## Resumen

Una de las principales causas de la situación deficitaria en la que se encuentra el tratamiento de las aguas residuales a nivel mundial, es el alto costo que implica la construcción de un sistema de tratamiento convencional de depuración de aguas. En el contexto rural, la dispersión de la población y, a menudo, su limitada capacidad económica, complejizan, encarecen y dificultan la implementación de sistemas de depuración comunitaria. Los sistemas tradicionales de depuración intensiva a menudo resultan inviables desde una perspectiva técnico-económica.

Este es el caso del Municipio de Mizque, en Bolivia, donde las aguas residuales de la población urbana, no reciben el tratamiento adecuado y acaban siendo vertidas a los cauces de agua, que suponen la principal fuente de consumo de gran parte de la población rural. Con el objeto de contribuir a paliar esta situación, a continuación se proponen y describen los Humedales Artificiales como una tecnología alternativa para el tratamiento de aguas residuales de las viviendas conectadas a la red de alcantarillado.

*Palabras clave: Humedales artificiales, humedal de flujo subsuperficial vertical, fitodepuración, saneamiento, aguas residuales, innovación social, totora, desarrollo, rural.*

## Abstract

One of the main causes behind the deficient state of sewage provision worldwide, is the high cost of building conventional waste water treatment facilities. In rural contexts, the implementation of comunal sewage plants is more complex, expensive and difficult due to the scattered population and it is frequently limited economic capacity. Traditional intensive waste water treatment systems are often unfeasible from a technical and financial perspective.

*DisTecD. Diseño y Tecnología para el Desarrollo*  
*2018, 5, desde pag. 88 - hasta pag. 108*  
*ISSN: 2386-8546*

This is the case of the Municipality of Mizque, in Bolivia, where the waste water of the urban population does not receive adequate treatment and ends up thrown into the water channels, which represent the main source of consumption for a large part of the rural population. Therefore, to help alleviate this situation, the implementation of Artificial Wetlands is proposed and described, as an alternative technology for the treatment of waste water from homes connected to these water network.

*Key words: Artificial wetlands, vertical subsurface flow wetland, phytodepuration, Sewage, Wastewater, Social innovation, Development, Rural population.*

## Resumo

Uma das principais causas da situação de déficit em que o tratamento de águas residuais é encontrada em todo o mundo é o alto custo envolvido na construção de um sistema de tratamento convencional para tratamento de água. No contexto rural, a dispersão da população e, muitas vezes, a sua limitada capacidade econômica, complica e dificulta a implementação de sistemas de purificação da comunidade. Os sistemas tradicionais de purificação intensiva são muitas vezes inviáveis a partir de uma perspectiva técnico-econômica.

Este é o caso do município de Mizque, na Bolívia, onde as águas residuais da população urbana não recebem tratamento adequado e acabam sendo desalojadas nos canais de água, que representam a principal fonte de consumo para uma grande parte da população rural. Assim, para ajudar a aliviar esta situação, as Zonas Húmidas Artificiais são propostas e descritos abaixo como uma alternativa para o tratamento de águas residuais de lares conectados à rede de esgotos

*Palavras-chave: zonas húmidas artificiais, fluxo subterrâneo vertical, fitorremediação, Saneamento, águas residuais, inovação social, desenvolvimento, população rural.*

## 1. Introducción

A nivel global, existe una importante brecha de desigualdad en el acceso a servicios de agua potable y de saneamiento, la cual se intensifica en las zonas rurales, y aún más, en países con un alto índice de pobreza, como es el caso de Bolivia. En este país, más de 2,5 millones de personas no tienen acceso a servicios de agua potable y otras 5 millones carecen de servicios de saneamiento.

El saneamiento, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), se entiende como “*el suministro de instalaciones y servicios que permiten eliminar sin riesgo la orina y las heces... también hace referencia al mantenimiento de buenas condiciones de higiene gracias a servicios como la recogida de basura y la evacuación de aguas residuales*”.

La prestación del servicio de Saneamiento, para el tratamiento de las aguas residuales conlleva un costo de inversión superior al de abastecimiento de agua, por lo que la oferta de éste servicio se hace escaso. Así mismo, por el lado de la demanda este servicio no es percibido como tal, dado que las necesidades que pretende satisfacer no son inmediatas, si lo comparamos con el acceso al agua o la energía, por tanto su exigibilidad no se produce en la misma medida.

Nuestra zona de estudio es la ciudad de Mizque, capital de cantón y del municipio del mismo nombre, del departamento de Cochabamba en Bolivia. Aquí, un alto porcentaje de la población urbana dispone de conexión al alcantarillado. Sin embargo, las aguas residuales no están recibiendo el tratamiento adecuado y acaban siendo vertidas a los cauces de agua que suponen la principal fuente de agua para el consumo de gran parte de la numerosa población rural del entorno.

Además, la escasez de lluvias, con periodos de prolongada sequía, la intensa radiación solar y la escasa vegetación, hacen del municipio una zona marcadamente deficitaria en cuanto a recursos hídricos. Esta falta de disponibilidad afecta tanto al medio ambiente, sujeto a fuertes procesos erosivos y de deforestación, como a la población que depende de los escasos recursos para su consumo doméstico y su utilización en las actividades económicas que en la zona son predominantemente agrícolas. Compiten de este modo, agravado por el crecimiento demográfico y los efectos del cambio climático, diferentes necesidades por un mismo recurso, muy limitado y deteriorado.

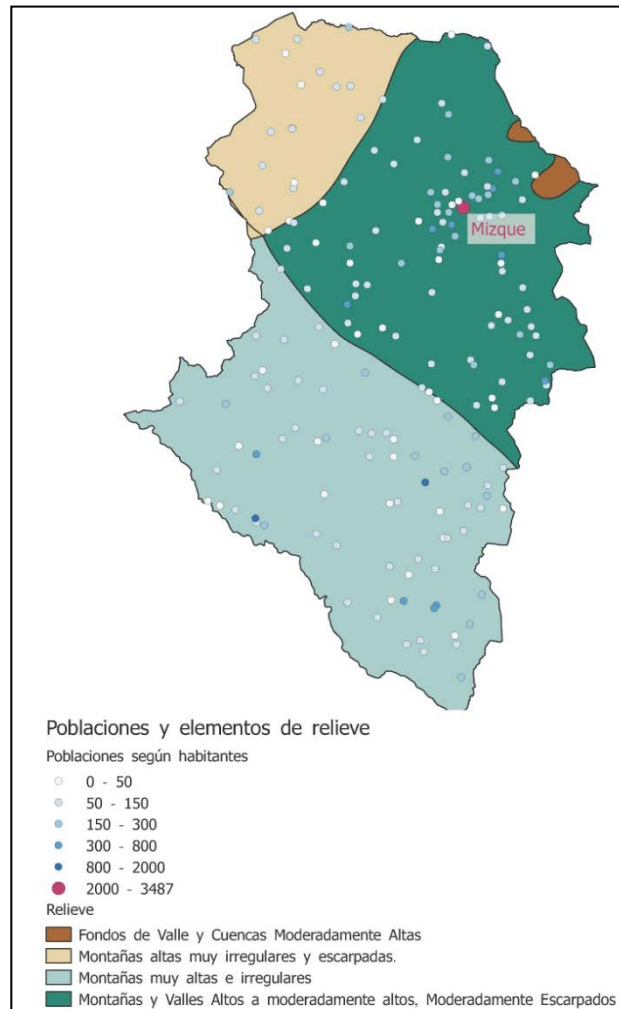
En algunos casos, las aguas residuales son el único recurso hídrico disponible para comunidades que subsisten de la agricultura con altas tasas de pobreza en el ámbito rural. Si bien su utilización en la agricultura puede aportar múltiples beneficios, incluyendo una mejor nutrición y una fortalecida seguridad alimentaria, su uso incontrolado puede generar importantes impactos negativos sobre la salud humana que se podrían evitar o minimizar implementando buenas prácticas de manejo [1].

El presente documento tiene como objeto abordar la problemática de la carencia de saneamiento de las aguas residuales en el municipio de Mizque. Tras un análisis preliminar de la problemática actual y las principales causas, se plantea una posible solución en forma de sistemas de tratamiento de agua alternativos basados en los humedales artificiales, los cuales permiten, depurar y recuperar el agua para su reutilización. La aplicación de un sistema de este tipo podría ser especialmente interesante en las zonas agrícolas del área árida y semiárida de Bolivia donde es cada vez más habitual el uso de aguas residuales para la agricultura, la acuicultura y la recarga de aguas subterráneas, entre otros.

## **2. Identificación**

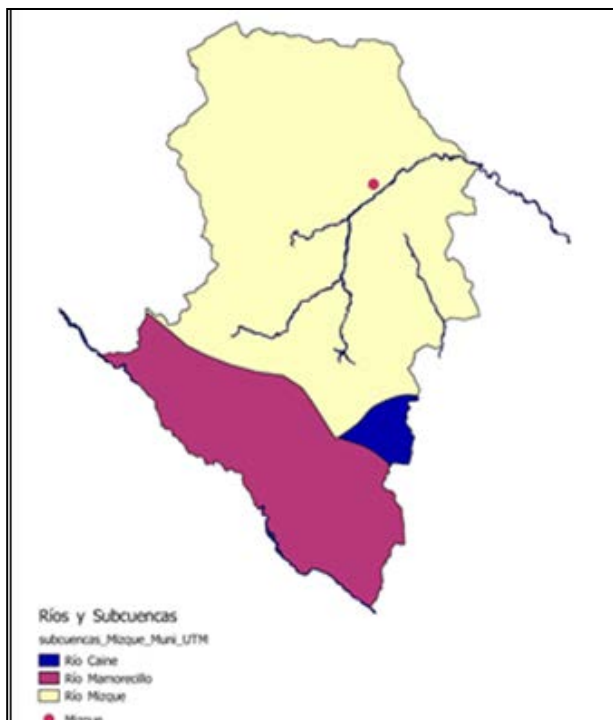
### **2.1. Contexto**

El Municipio de Mizque forma parte de la región del Cono Sur del departamento de Cochabamba (figura 1). Ubicado en el centro de Bolivia, se encuentra geográficamente situado en los valles altos de la Cordillera Oriental, a una altura aproximada de 2.000 msnm. Presenta una topografía, fruto del plegamiento tectónico, que se caracteriza por pendientes muy escarpadas, con pendientes de más del 40%, y zonas llanas en el fondo de los valles. Estas áreas de llanura concentran los suelos más profundos y fértiles, y, en consecuencia, albergan la mayor parte de las poblaciones y terrenos agrícolas.

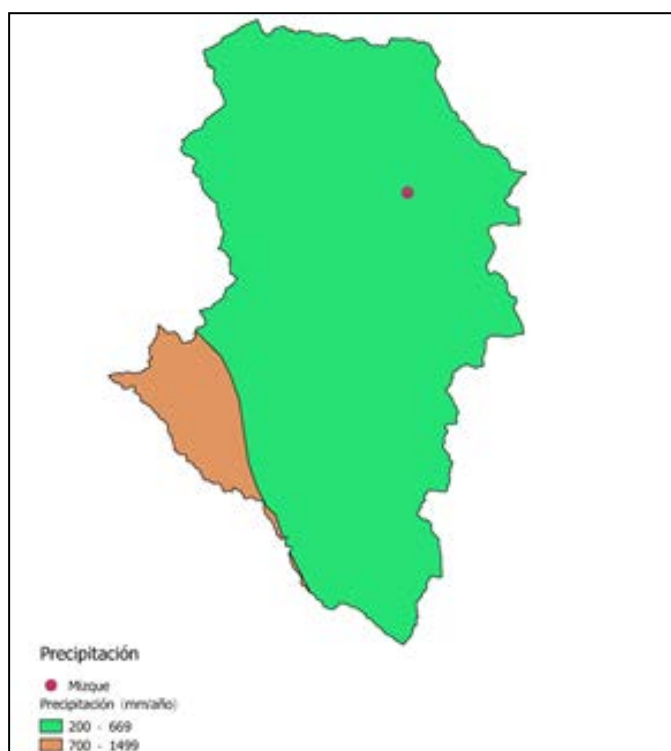


**Figura 1. Poblaciones y Elementos de relieve.**  
**Fuente: Elaboración propia, con datos del INE y Geo Bolivia.**

Mizque se caracteriza por tener un clima templado y seco durante la mayor parte del año (figura 2). Presenta escasez de lluvias, que se dan únicamente entre los meses de noviembre y marzo, sequías prolongadas y una temperatura media que oscila entre los 16 y 18 grados centígrados. Además, dadas sus características climáticas y de elevación, la zona registra una alta radiación solar con valores que fluctúan entre los 4 y los 6,9KWh/m<sup>2</sup>. Estas características convierten al municipio en una zona sumamente deficitaria en cuanto a recursos hídricos y, consecuentemente, muy vulnerable a los efectos negativos del cambio climático. Por su ubicación geográfica, sufre episodios de extrema sequía ligados al fenómeno del niño. Debido a los efectos del cambio climático, esta situación se está produciendo de forma más frecuente.



**Figura 2. Nivel de precipitación en Mizque.**  
Fuente: Elaboración propia, con datos de Geo Bolivia.

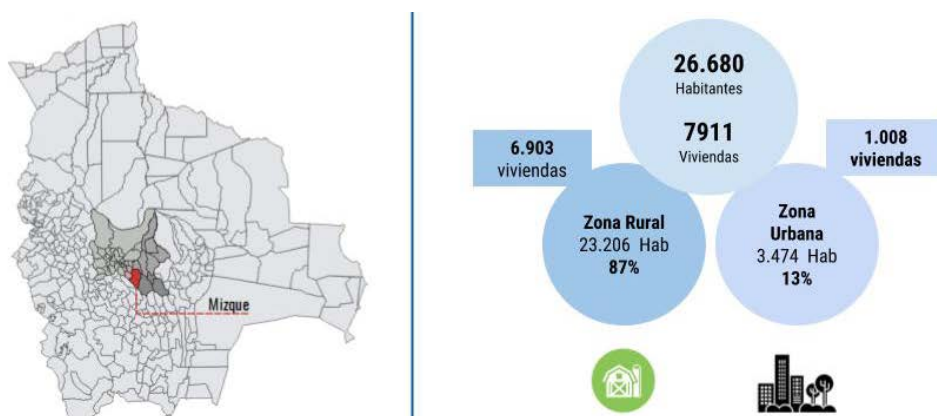


**Figura 3. Ríos y Subcuencas.**  
Fuente: Elaboración propia, con datos de Geo Bolivia.

El Municipio de Mizque se ubica en la cuenca del río del mismo nombre, que tiene una superficie total de 10.395,70 Km<sup>2</sup> (figura 3). El río Mizque, que pasa a poco más de un kilómetro del centro urbano, nace en la divisoria de aguas de Sivingani y entre sus principales afluentes están el Tujma, Callejas, Uyuchama, Tipajara, Vila Vila y VichuVichu. En su recorrido, confluye con el río Julpe para desembocar aguas abajo en el Río Grande, en el que se ha detectado un grado importante de contaminación, y, más adelante, en el Amazonas.

Predomina en el municipio la actividad ganadera y agrícola que se distribuyen en función, sobre todo, del relieve. El uso silvopastoril se ubica principalmente en las áreas de fondo de valle con pendientes más suaves, por debajo del 15%. En estas regiones se encuentra muy poca cobertura forestal que se utiliza para combustión y material de construcción.

El municipio de Mizque posee una extensión territorial de 1.880.74 km<sup>2</sup> y, administrativamente, cuenta con 5 cantones: Valle de Mizque, que comprende el área urbana, San Vicente, TinTin, Aguada y Molinero. Éstos, a su vez, se dividen en 141 comunidades y 8 juntas vecinales (figura 4).



**Figura 4. Ubicación y Población.**

**Fuente: Elaboración propia, con datos de QGIS y del INE, 2012.**

La población del Municipio de Mizque asciende a 26.680 habitantes, de origen mayoritariamente quechua, y presenta un índice de pobreza del 84,5%. En cuanto a la distribución poblacional del municipio por zonas, se registra que la mayoría de la población se encuentran en la zona rural con 23.206 habitantes, lo que representa el 87% de la población, y sólo 3.474 habitantes, que representan el 13,02%, se encuentran en la zona urbana.

## 2.2. Marco Normativo

La legislación sobre el tratamiento de aguas residuales en Bolivia se encuentra dispersa en varias normativas sobre el aprovechamiento, manejo y protección de los Recursos Naturales. En consecuencia es necesario realizar un inventario de las más importantes:

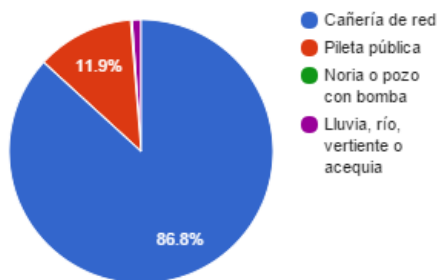
- Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia del año 2009, en su art.20 considera: "El acceso al agua y alcantarillado constituyen derechos humanos, no son objeto de concesión ni privatización y están sujetos a régimen de licencias y registros conforme a ley".

- Ley de Medio Ambiente N°1333/92 establece la prioridad nacional de planificación, protección y conservación de las aguas en todos sus estados, el manejo integral y control de las cuencas donde nacen o se encuentran las mismas, así mismo establece parámetros admisibles de descarga en cuerpos receptores. En su Reglamento en materia de contaminación Hídrica hace referencia a la prevención y control de la contaminación hídrica, en el marco del desarrollo sostenible.
- Ley de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario N°2066/00, define los roles del sector, crea la Superintendencia de Servicios Básicos y establece las condiciones para concesiones, licencias y registros. Define como encargados directos a los Gobiernos Municipales o delegadas a través de una Empresa de Prestación de Servicios Sanitarios (EPSA).
- Plan de Desarrollo Económico y Social 2016-2020 en su Pilar 2: Universalización de los Servicios Básicos, con parámetros de calidad y sostenibilidad, donde se propone como acción concreta “Rehabilitar y mejorar las plantas de tratamiento de aguas residuales con enfoque de reúso (cultivo restringido y/o energía)”.
- La Normativa Boliviana de la Calidad del Agua NB512, establece los valores máximos aceptables de los diferentes parámetros que determina la calidad de agua abastecida con destino al uso y consumo humano y las modalidades de aplicación y control. Esta normativa no posee directrices específicas respecto al reúso de agua con fines de riego, aunque sí contempla la clasificación de cuerpos de agua para su uso.

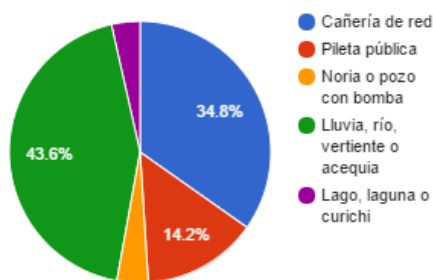
### **2.3. Problemática**

Se ha identificado en la región un grave problema ambiental y social, fruto de la deficiente provisión de los servicios de agua, saneamiento y recolección de residuos sólidos. Debido a la naturaleza cíclica del agua, la cobertura insuficiente de saneamiento y recolección de residuos está impactando directamente en la calidad del agua de la que depende gran parte de la población, a falta de una fuente segura de agua adecuadamente tratada, para su consumo y utilización.

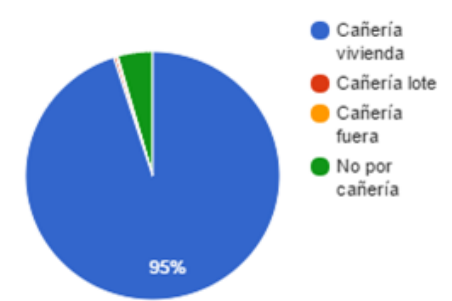
Las gráficas que se incluyen a continuación, elaboradas con datos del Censo de Población y Vivienda realizado en el año 2012, muestran el acceso a los servicios de agua y saneamiento en Mizque, diferenciando el ámbito urbano y el rural (figuras 5-12).



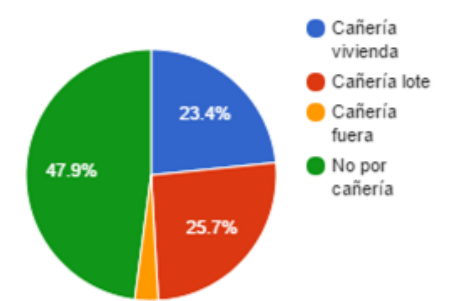
**Figura 5. Procedencia del agua utilizada (Ámbito Urbano).**  
 Fuente: Censo de Población y Vivienda, 2012.  
 INE. Bolivia.



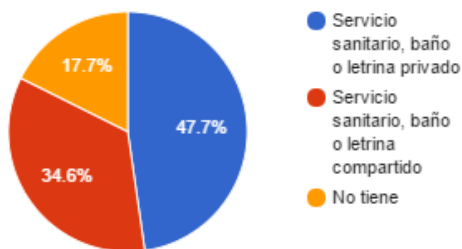
**Figura 6. Procedencia del agua utilizada (Ámbito Rural).**  
 Fuente: Censo de Población y Vivienda, 2012.  
 INE. Bolivia.



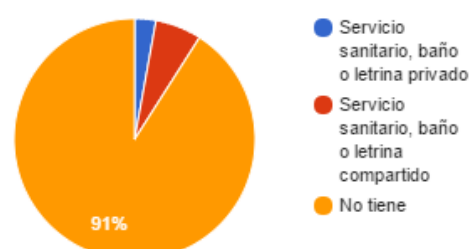
**Figura 7. Distribución del agua (Ámbito Urbano).**  
 Fuente: Censo de Población y Vivienda, 2012.  
 INE. Bolivia.



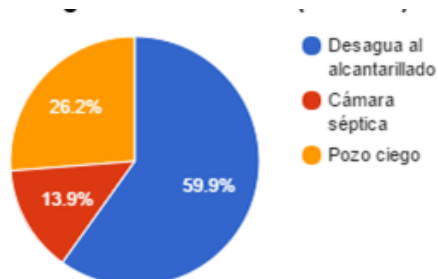
**Figura 8. Distribución del agua (Ámbito Rural).**  
 Fuente: Censo de Población y Vivienda, 2012.  
 INE. Bolivia.



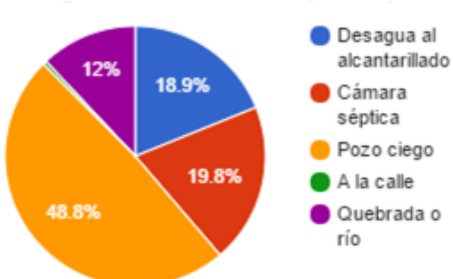
**Figura 9. Porcentaje de Saneamiento Urbano.**  
 Fuente: Censo de Población y Vivienda, 2012.  
 INE. Bolivia.



**Figura 10. Porcentaje de Saneamiento Rural.**  
 Fuente: Censo de Población y Vivienda, 2012.  
 INE. Bolivia.



**Figura 11. Porcentaje de Desagüe Saneamiento Urbano.**  
 Fuente: Censo de Población y Vivienda, 2012.  
 INE. Bolivia.



**Figura 12. Porcentaje de Desagüe Saneamiento Rural.**  
 Fuente: Censo de Población y Vivienda, 2012.  
 INE. Bolivia.



Estos datos evidencian la enorme brecha existente en la provisión de servicios básicos entre el mundo urbano y el rural. Los hogares rurales presentan tasas mucho más altas de carencia de servicios, a pesar de representar la mayor parte de la población. Por ello, dependen en mayor medida de fuentes como los ríos o la lluvia para proveerse de agua.

En consecuencia, se ven doblemente perjudicados por la falta de acceso a servicios básicos. En primer lugar, por no tener acceso a agua y saneamiento. En segundo, porque esta falta de servicios afecta directamente a la calidad del agua que se ven obligados a utilizar. Esto indicaría que actuar en el saneamiento del entorno urbano redundaría en un beneficio, no sólo de los habitantes de la ciudad, sino también de forma muy significativa en la población del ámbito rural circundante.

Esta situación está teniendo un impacto directo en la salud de la población. Existen multitud de enfermedades relacionadas con la utilización de agua en mal estado, incluyendo diarrea, disentería, cólera, paludismo, esquistosomiasis, tifus, tracoma, fiebre tifoidea, anemia, anquilostomiasis, encefalitis japonesa, legionelosis, leptospirosis, filariasis linfática, malaria, malnutrición, metahemoglobinemia, oncocercosis, polio, tinea, escabiosis y trichuriasis. Según Intermón Oxfam, en el mundo, mueren 1,5 millones de niños al año por causa del agua contaminada [2].

De acuerdo con datos de Unicef, la diarrea genera la muerte de 30.000 niños anualmente y más de 800 niños fallecen cada día por enfermedades diarreicas asociadas a la falta de higiene [3]. Según la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo-AECID, la malnutrición crónica y diarrea aguda representa la causa de un tercio de las muertes infantiles en Bolivia. Cochabamba es uno de los departamentos con mayor número de casos de enfermedades diarreicas agudas habiéndose registrado en 2016, según datos del Ministerio de la Salud, 87.532 casos sospechosos.

La sequía ha llevado a que se produzcan cortes en el suministro de agua, que se han ligado a turbidez y a la presencia de organismos patógenos, como bacterias y parásitos, haciendo que el agua sea insegura tanto para consumo como para su utilización en el aseo.

Si bien es cierto que la ejecución de infraestructuras de saneamiento y depuración de aguas residuales requiere una inversión relativamente alta, no es comparable con el enorme costo a nivel global que producen los efectos de la falta de saneamiento. Las Naciones Unidas estiman que el impacto económico de no invertir en agua y saneamiento supera el 4% del producto interno bruto (PIB) de toda África Subsahariana. A su vez, el Banco Mundial calcula que las consecuencias y costes económicos de la falta de saneamiento reducen el PIB de la India en un 6,4%.

Es imprescindible, para asegurar la sostenibilidad de los servicios de agua potable y saneamiento básico, que se produzca la apropiación por parte de la población beneficiaria y que ésta asuma sus responsabilidades tanto para durante la ejecución, por medio del acompañamiento de las obras, como durante la operación y mantenimiento, cumpliendo con el pago de tarifas o cuotas y haciendo un adecuado manejo y uso de los servicios.

### 3. Alternativa Propuesta

#### 3.1. Evaluación de alternativas

Debido a la existencia de una variedad de sistemas para el tratamiento de aguas residuales, es necesario pasar por un proceso de selección para determinar la mejor alternativa. Para este proceso, se analizan un conjunto de variables sobre 3 tipos de tecnologías, los tanques de Imhoff, los sistemas de lagunas de estabilización y los humedales artificiales, que son las más empleadas para el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico, en Bolivia [4].

Al respecto, La Asociación Nacional de Empresas de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado-ANESAPA, ha elaborado el documento “Recomendaciones para la elección de plantas de tratamiento de agua residual aptas para Bolivia” en donde propone ciertas variables a tener en cuenta para determinar el sistema más óptimo de tratamiento [5].

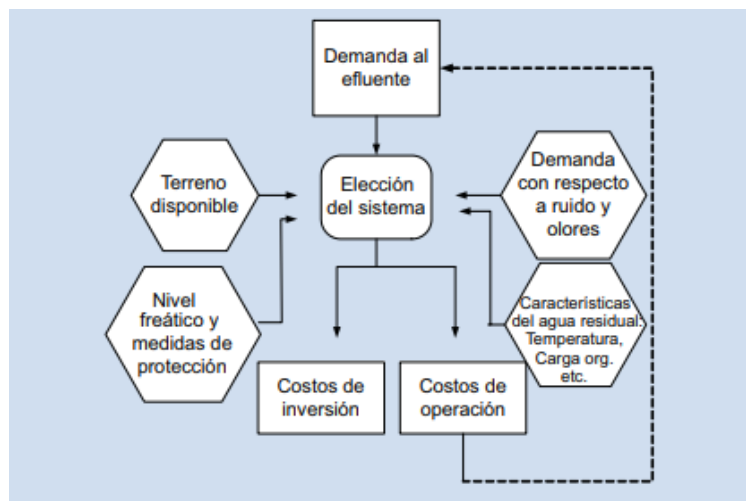


Figura 13. Esquema del Proceso para la determinación del sistema óptimo.

Fuente: Recomendaciones para la elección de plantas de tratamiento de agua residual aptas para Bolivia, ANESAPA. 2010.

Es así que, entendiendo que los tipos de sistemas más comunes en Bolivia, mencionados anteriormente, se corresponden a distintas etapas del proceso de tratamiento, y que podrían o no, estar combinadas con otras tecnologías, para este caso de estudio, sólo se analizarán algunas variables. Así mismo mencionar que para la selección de la tecnología, hemos utilizado parámetros, en algunos casos cuantitativos y en otros cualitativos, debido a la falta de datos exactos en relación con los requerimientos de algunas variables.

**Tabla1. Comparación de variables cuantitativas. Fuente: Recomendaciones para la elección de plantas de tratamiento de agua residual aptas para Bolivia. ANESAPA, 2012. \*Ministerio del Medio Ambiente y Agua. “Guía Técnica de Diseño y Ejecución de Proyectos de Agua y Saneamiento con tecnologías alternativas”. Bolivia, 2010.**

Tecnología	Humedales Artificiales	Tanques de Imhoff	Lagunas de Estabilización
<b>Variable</b>			
<b>Demanda del efluente (potencial de eliminación)</b>			
DBO <sub>5</sub> (límites de 80mg DBO/l)	10-80 mg DBO/l	100-120 mg DBO/l	35-80 mg DBO/l
Coliformes(límites de 1000 CF/100 ml)	10+E2–10+E4 CF/ml	10+E6 – 10+E7 CF/ml	10+E2–10+E4 CF/ml
<b>Concentración en efluente</b>			
Nitrógeno	17-50 mg/l	-	25-50 mg/l
Fósforo	2,5-25 mg/l	-	5-25mg/l
<b>Costos y operación</b>			
Inversión	20-30 U\$S/hab	25-50 U\$S/hab.	15-35 U\$S/hab.
Operación	2-5 U\$S/hab/año	hasta 0,7% de la inversión.	0,5 hasta 0,7% de la inversión.
<b>Terreno disponible</b>			
Área netas demandada	15 a 60m <sup>2</sup> 1000/hab *	3 a 12m <sup>2</sup> /1.000 hab	40 a 140m <sup>2</sup> /1.000 hab

**Tabla2. Comparación de variables cualitativas. Fuente: Guía de desarrollo comunitario en proyectos de agua y saneamiento para poblaciones de 2001 a 10000 habitantes. Ministerio del Agua. Bolivia, 2008.**

Alternativa de Tratamiento	Humedales Artificiales	Tanques de Imhoff	Lagunas de Estabilización
Generación de Olores	Bajo	Bajo	Medio-Alto
Generación de Mosquitos	Bajo	Bajo	Medio
Complejidad de construcción	Bajo	Media	Media
Necesidad de Personal para operación	Bajo	Medio	Alto
Área de Implementación	Medio	Bajo	Alto
Monitoreo	Medio	Alto	Alto

### **3.2. Los Humedales Artificiales, como alternativa más óptima**

Los Humedales Artificiales son considerados como una tecnología totalmente alineada con la sostenibilidad ambiental, ya que no requiere instalaciones complejas, tiene un costo de mantenimiento muy bajo y se integra al paisaje natural propiciando incluso refugio a la vida silvestre [6].

Este sistema posee una sencillez operativa y funciona con vegetación o sin ella, pero la diversidad de plantas disponibles en la zona de Mizque, nos brinda una ventaja para la implementación del sistema de vegetación, pues la utilización de la misma hará que el efluente del agua sea de mayor calidad y en condiciones para que su re-uso sea inmediato.

En poblaciones cercanas a nuestra zona de intervención (Municipio de Punata, Cochabamba) ya existen sistemas de humedales artificiales para la depuración de aguas residuales, donde el responsable del proyecto fue “*El Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua de la Universidad Mayor de San Simón*”, con cooperación Técnica del Departamento de Productos Naturales, Biología Vegetal y Edafología de la Universitat de Barcelona - UB y con financiamiento de la Agencia Catalana de Cooperación al Desarrollo. Esta intervención fue realizada con actividades específicas como: Socialización del proyecto con los funcionarios así como con las comunidades participantes; Diseño conceptual del sistema y Diseño Hidráulico, la construcción con ayuda de los beneficiarios; y acuerdo con las comunidades.

El contexto de la población seleccionada condiciona un proceso de adaptación previo, tanto por el idioma como por las costumbres existentes. Será necesaria en la fase inicial del proyecto la promoción de las ventajas que ofrece el sistema, luego las capacitaciones técnicas y el empoderamiento de las juntas vecinales para el control y monitoreo. El sistema de Humedales Artificiales para su implementación y mantenimiento posee procesos sencillos, y esto hace que la aceptación de la población local sea mayor.

Los bajos costos en operación y mantenimiento, la facilidad de construcción y la capacidad de utilización de materiales locales para su construcción y reparación, se consideran ventajas significativas para la elección de este tipo de tecnología [7].

### **3.3. Caracterización y funcionamiento de Los Humedales Artificiales**

Los Humedales artificiales son sistemas de fitodepuración<sup>1</sup>, que aprovechan la capacidad de las plantas para la depuración de aguas residuales, la cual tiene lugar al hacerlas circular a través de estas zonas húmedas artificiales. La tecnología de Humedales Artificiales actúa como un complejo micro ecosistema en el que están presentes los siguientes elementos:

- Agua a tratar: Circula a través del sustrato filtrante y/o de la vegetación.
- Sustrato: Tienen las finalidades de servir de soporte a la vegetación y de permitir la fijación de la población microbiana (en forma de biopelícula), que va a participar en la mayoría de los procesos de eliminación de los contaminantes presentes en las aguas a tratar.
- Plantas emergentes acuáticas (macrófitas): Proporcionan superficie para la formación de películas bacterianas, facilitan la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, contribuyen a la oxigenación del sustrato y a la eliminación de nutrientes y controlan el crecimiento de algas, al limitar la penetración de la luz solar [8].

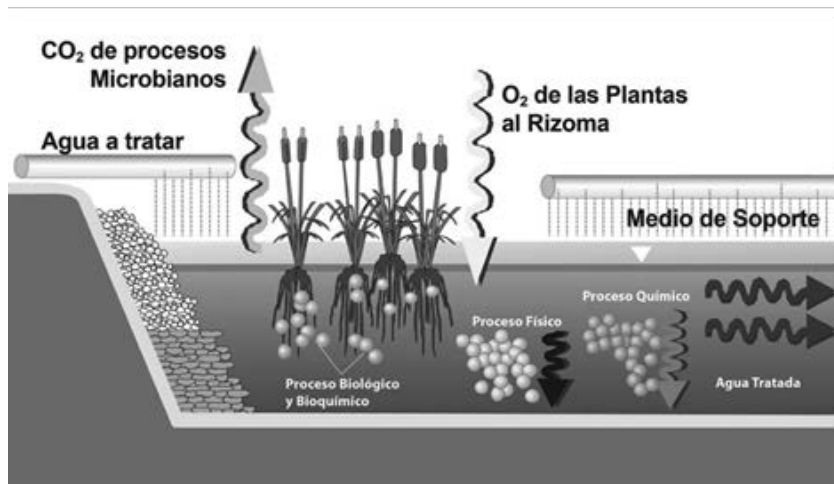
El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas<sup>2</sup> hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente<sup>3</sup> es depurada progresiva y lentamente, tal como se evidencia en el siguiente esquema:

---

<sup>1</sup> La fitodepuración, en este caso, se refiere a la depuración de aguas contaminadas por medio de plantas superiores (macrófitas).

<sup>2</sup> El término macrófitas, abarca a las plantas acuáticas visibles a simple vista, incluye plantas acuáticas vasculares, musgos, algas y helechos.

<sup>3</sup> Las aguas residuales que se tratarán en este sistema son aguas domésticas y urbanas provenientes de las residencias del municipio de Mizque que actualmente cuentan con alcantarillado.



**Figura 14. Sistema tipo de Humedales artificiales.**

**Fuente: Dpto. de Biología, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.**

Este tipo de sistema purifica el agua mediante remoción del material orgánico (DBO), oxidando el amonio, reduciendo los nitratos y removiendo el fósforo, los cuales son nutrientes esenciales para las plantas. Por su parte, las bacterias, como microorganismos en el suelo, captan y almacenan nutrientes, algunos otros contaminantes, y asimismo, son responsables de la degradación de la materia orgánica. Reemplazan así el tratamiento secundario e incluso, bajo ciertas condiciones, al terciario y primario de las aguas residuales.

El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos: la actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de los vegetales durante el día y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de los vegetales, además de servir como material filtrante. En conjunto, estos elementos eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual y biodegradan materia orgánica hasta mineralizarla y formar nuevos organismos [9].

Así mismo, estos sistemas tienen tres funciones fundamentales que les otorgan un atractivo potencial, en especial en contextos de limitados recursos económicos, para el tratamiento de aguas residuales: Fijan físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos y logran buenos niveles de tratamiento con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento [10].

El perfil artificial de los Humedales se da por ciertas particularidades como el confinamiento del humedal, construido mecánicamente y la impermeabilización para evitar pérdidas al subsuelo; la utilización de sustratos para el enraizamiento de las plantas; y, la elección sobre el uso de plantas [11].

Para la implantación de esta alternativa, existen varios tipos de sistemas que se pueden utilizar partiendo de la clasificación en función del modelo de circulación del agua: Superficial o subterránea (subsuperficial).

En los Humedales Artificiales de Flujo Superficial o Flujo Libre, el agua a tratar circula por encima del sustrato, mientras que en los Humedales Artificiales de Flujo Sub-superficial, el agua recorre el humedal de forma subterránea, a través de los espacios intersticiales del lecho filtrante. A continuación se especifican las características de cada uno de estos modelos.

### 3.3.1. Humedales de Flujo Superficial

Son aquellos donde el agua circula a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera. Este tipo de humedales son una modificación al sistema de lagunas convencionales.

A diferencia de estas, tienen menor profundidad y tienen plantas. Están constituidos por balsas o canales con vegetación emergente y niveles de agua poco profundos (inferiores a 0,4m). En términos de paisaje, este sistema es bastante recomendable por su capacidad de albergar distintas especies.

El agua discurre libremente por la superficie del sustrato donde se encuentran enraizadas las plantas, circulando alrededor de sus tallos y hojas, por lo que se encuentra expuesta directamente a la atmósfera.

Suelen ser instalaciones de varias hectáreas que, principalmente, se emplean como tratamiento de afino (reciben efluentes procedentes de tratamientos secundarios), a modo de reutilización ambiental de las aguas tratadas.

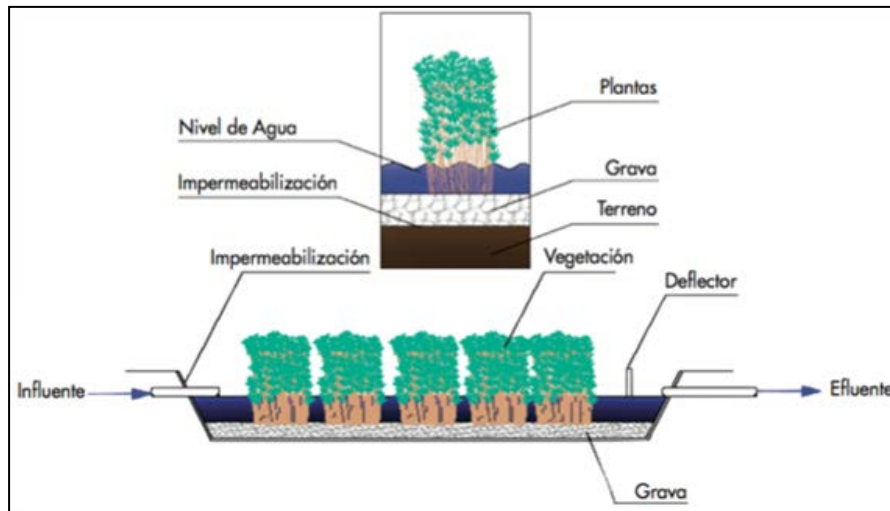


Figura 15. Esquema de Humedal superficial. Fuente: Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones”. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Urbano. Gobierno de España. 2010.

### 3.3.2. Humedales de Flujo Subsuperficial

Se caracterizan porque la circulación del agua en los mismos se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0,6m. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. Pueden ser de dos tipos en función de la forma de aplicación de agua al sistema horizontal y vertical. También es necesario mencionar que en este tipo de humedales el agua no es visible.

Son instalaciones de menor tamaño y, en la mayoría de los casos, se emplean como tratamiento secundario de las aguas residuales generadas en pequeños núcleos de población.

Tiene una baja incidencia de malos olores debido a la naturaleza subterránea del flujo de agua. Posee un bajo riesgo de exposición directa de las personas y de aparición de insectos (mosquitos) gracias al flujo subterráneo.

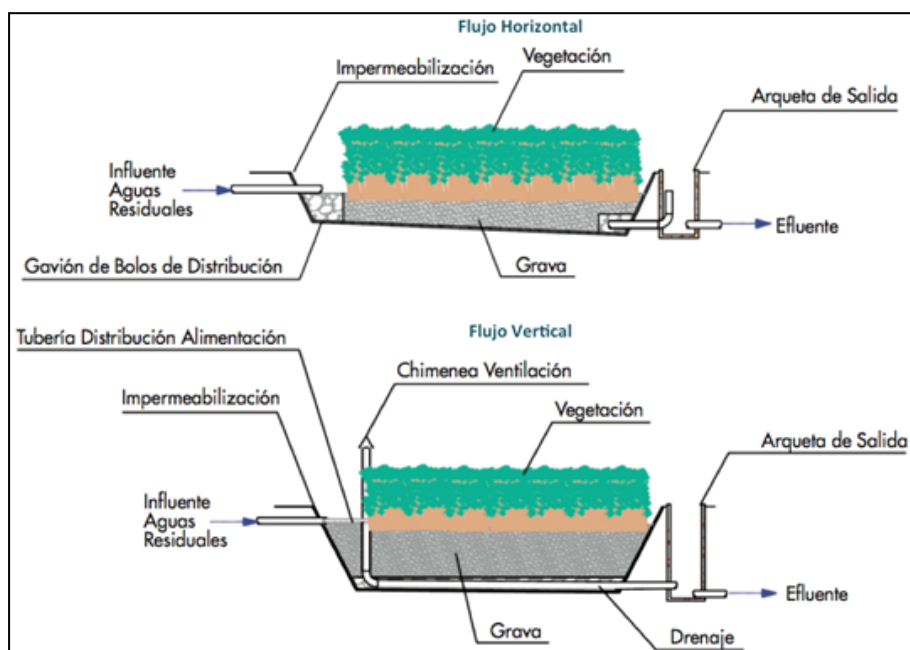


Figura 16. Esquema de Humedal sub superficial.

Fuente: Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones”. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Urbano. Gobierno de España. 2010.

Tabla 3. Comparación de sistemas de flujo humedal.

	Flujo Superficial	Flujo Subsuperficial
Tratamiento	Tratamiento de flujos secundarios (agua ya tratadas por otros medios. Por ej.: lagunas, biodiscos, fangos activados).	Para tratar flujos primarios (aguas pretratadas. Por ej.: Tanques IMHOFF, pozos sépticos,...
Operación	Opera con baja carga orgánica.	Altas tasas de carga orgánica.
Olor	Puede ser controlado.	No existe.
Insectos	Control es caro.	No existe.
Protección térmica	Mala, las bajas temperaturas afectan al proceso de remoción.	Buena, por acumulación de restos vegetales y el flujo subterráneo el agua mantiene una temperatura casi constante.
Área	Requiere superficies de mayor tamaño.	Requieren superficies de menor tamaño.
Costo	Menor costo en relación al subsuperficial.	Mayor costo debido al material granular que puede incrementar el precio hasta un 30%.
Valor Ecosistema	Mayor valor como ecosistemas para la vida salvaje, el agua es accesible a la fauna.	Menor valor como ecosistema para la vida, el agua es difícilmente accesible a la fauna.
Usos generales	Son de restauración y creación de nuevos ecosistemas.	Tratamiento de aguas residuales, principalmente para casa asiladas y núcleos menores de 200 habitantes.
Operación	Son tratamientos adicionales a los sistemas convencionales (usadas para tratamiento terciario y mejoramiento de calidad agua).	Puede usarse como tratamiento secundario.



### 3.4. Diseño técnico de la propuesta

Teniendo en cuenta el contexto del municipio en el que se plantea la posible solución y la comparación de estos dos tipos de humedales, la alternativa seleccionada para el tratamiento de aguas residuales en el municipio de Mizque es el Humedal Artificial Subsuperficial.

Partiendo de que las aguas a tratar tienen una alta carga orgánica y que la probabilidad de que se generen olores y vectores en este tipo de alternativa es nula. La aparición de casos de dengue, zika y chikungunya ligados al aumento de la temperatura en la región por los efectos del cambio climático, hacen especialmente importante la elección de un sistema en el que no quede expuesta una lámina de agua para la proliferación de mosquitos. Adicionalmente, este tipo de humedal, al producirse el flujo bajo la superficie, mantiene la temperatura del agua constante más constante a lo largo del año.

En cualquier caso, como tratamiento primario, para asegurar el buen funcionamiento del sistema y reducir las posibilidades de colmatación del sustrato, las aguas residuales deberán pasar, antes de llegar al humedal artificial subsuperficial, por un canal de desbaste y un desarenador estático.

Puesto que este sistema de tratamiento está destinado principalmente a núcleos menores de 200 habitantes, en el diseño detallado se deberá contemplar la combinación de sistemas de tratamiento paralelos que logren captar las aguas servidas de 606 viviendas que son las que actualmente disponen de red de alcantarillado en Mizque. Éstas se corresponden con 481 viviendas urbanas, el 48% de 1.008, y 125 viviendas rurales, el 1.8% de 6.903. De la totalidad del ámbito rural, únicamente el 9% tiene una instalación de saneamiento, 621 viviendas, y, de éstas, el 20% disponen de conexión al alcantarillado.

La combinación que se propone constituye un sistema híbrido, en el que el influente atraviesa un canal de desbaste y desarenador estático antes de acceder al humedal vertical a continuación del cual se sitúa un humedal horizontal. En el vertical se logra la eliminación de la DBO y la nitrificación que a continuación se corrige a su paso por el humedal horizontal.

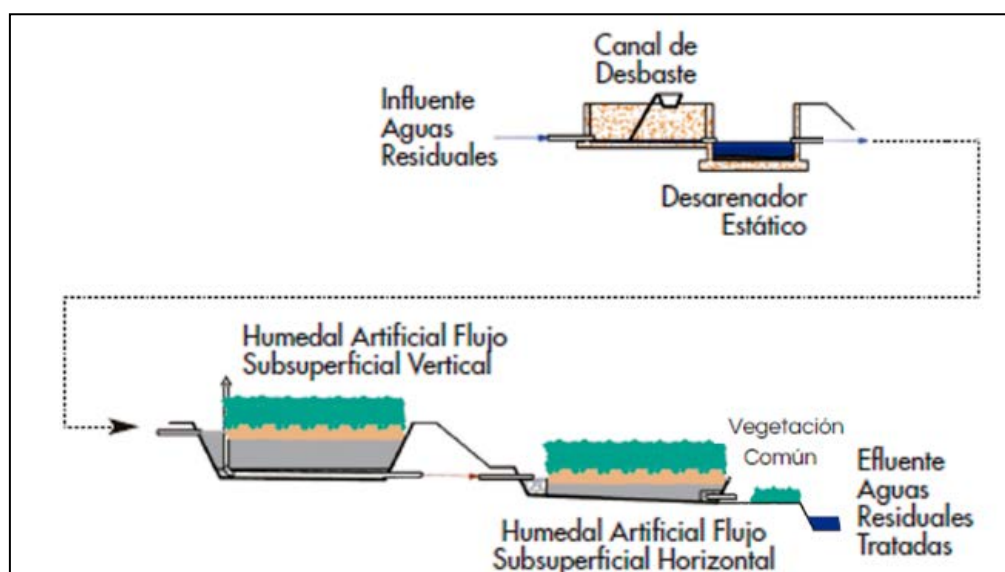


Figura 17. Esquema de la combinación propuesta.

Fuente: Elaboración propia s/Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones.

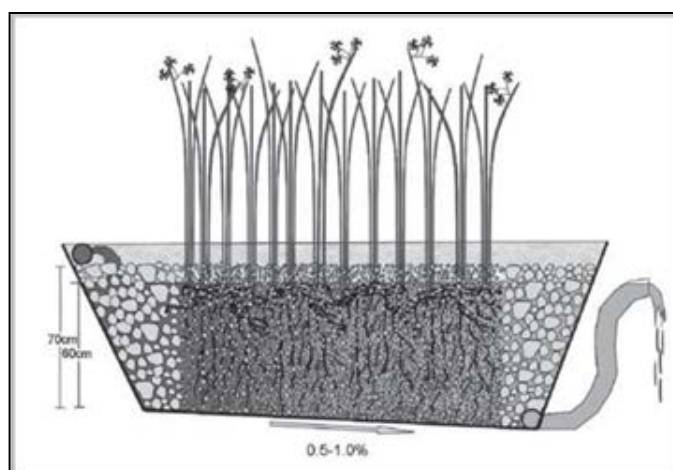


En relación con el costo, que será 30% mayor en relación al del humedal artificial de tipo superficial, se considera que la urgencia de invertir en este sistema de tratamiento dadas las problemáticas previamente mencionadas que están causando graves problemáticas sociales y ambientales para el municipio, justifican la elección. Dentro de los humedales de tipo subsuperficial, se encuentra una clasificación adicional en función de la forma de aplicación de agua al sistema:

a. Horizontal.

En este tipo de humedal de flujo subsuperficial, el agua ingresa en forma permanente. Ésta entra por la parte superior de un extremo y es recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón), que funciona en condiciones anaerobias. La profundidad del lecho varía entre 0,45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0,5% a 1%.

El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal (cuerpo), sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño. El diseño de este sistema consiste en una cama, de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas. Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo [12]. La alimentación se efectúa de forma continua, aunque también pueden funcionar de forma intermitente, si fuese necesario bombear las aguas residuales.



**Figura 18. Esquema Humedal horizontal.**

**Fuente: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).**

b. Vertical.

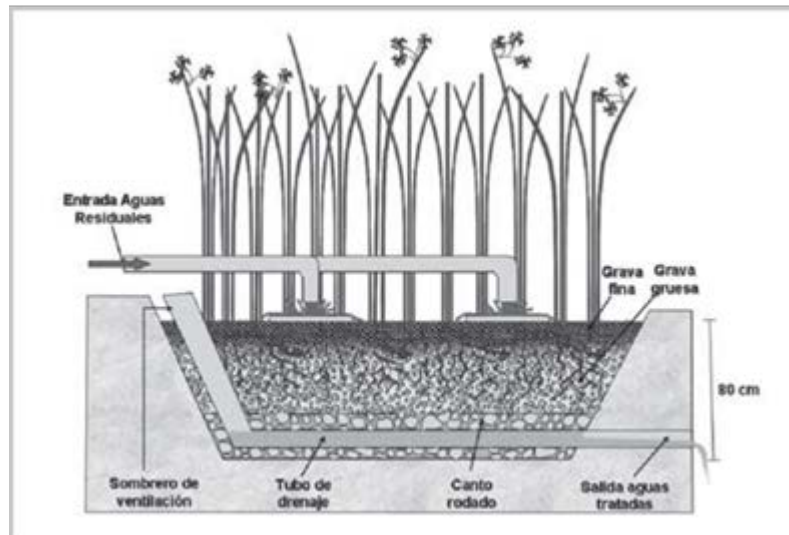
También conocidos como filtros intermitentes, este tipo de humedales reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación de agua. Estos sistemas se cargan intermitentemente, de tal forma que las condiciones de saturación con agua en la cama matriz son seguidas por períodos de insaturación, estimulando el suministro de oxígeno. Este proceso sirve para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias.

Para la distribución del agua sobre la superficie de filtración se recurre tanto al empleo de tuberías perforadas, que descansan sobre el lecho filtrante, como al empleo de tuberías de mayor sección que se apoyan en pivotes repartidos por toda la

superficie. Las aguas circulan verticalmente a través de un sustrato filtrante de arena-gravilla-grava, de 0,5- 0,8 m de espesor, en el que se fija la vegetación.

En el fondo de los humedales una red de drenaje permite la recogida de los efluentes depurados. A esta red de drenaje se conecta un conjunto de conductos, que sobresalen de la capa de áridos, al objeto de incrementar la oxigenación del sustrato filtrante por ventilación natural (efecto chimenea) [13].

Las aguas infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte (arenas, gravas), se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal y la vegetación emergente se planta también en este medio granular. A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo.



**Figura 19. Esquema Humedal Vertical.**

**Fuente: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).**

Al comparar estos dos tipos de sistemas, se observa que los Humedales de Flujo Horizontal operan fundamentalmente en condiciones anaerobias, produciendo efluentes con ausencia de oxígeno disuelto y, por tanto, con un potencial redox negativo [14], es decir, con una probabilidad mayor de generar malos olores. Por su parte, en los humedales de flujo Vertical, pese a operar con cargas superiores, imperan condiciones aerobias, dando lugar a efluentes oxigenados [15] y libres de olores.

A pesar de tener más complejidad en su operación por el funcionamiento discontinuo, la selección del sistema será el de flujo subsuperficial vertical, basado en la eficiencia que este implica en superficies de menores dimensiones, en las condiciones aerobias que permiten que se encuentre libre de olores y en el proceso de nitrificación que éste produce.

### 3.5. Vegetación apropiada

Como se mencionó anteriormente, la vegetación juega el rol central en el proceso de tratamiento de aguas residuales a través de humedales artificiales. El papel de la vegetación en los humedales está determinado principalmente por las raíces y rizomas enterrados. Esto sucede, porque las plantas son organismos foto autótrofos, que recogen energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico.

Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmosfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación [16].

Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y esorrentía de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de aguas bajas.
- Permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono y los nutrientes y los incorporan a los tejidos de las planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de los microorganismos.

Este tipo de vegetación se identifica como macrófitas, y son plantas que están adaptadas a crecer bajo condiciones de suelos saturados por agua, porque tienen desarrollado un sistema de grandes espacios aéreos internos. Estos sistemas internos les permiten la provisión de aire bajo condiciones de suelo saturado con agua desde la atmósfera hacia las raíces y rizomas.

En este sentido, los humedales también se clasifican de acuerdo al tipo de macrófitas que emplean en su funcionamiento. Estas pueden ser:

- Macrófitas de hojas flotantes: Son principalmente angiospermas sobre suelos anegados, cuyos órganos reproductores son flotantes o aéreos. Ejemplos de este tipo de macrófitas son, el jacinto de agua (*Eichhorniacrassipes*) y la lenteja de agua (*Lemnasp*) que son las especies más utilizadas para este sistema.
- Macrófitas sumergidas: Comprenden algunos helechos, numerosos musgos y carófitas y muchas angiospermas. Se encuentran en toda la zona fótica (a la cual llega la luz solar), aunque las angiospermas vasculares sólo viven hasta los 10 m de profundidad aproximadamente. Los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos.
- Macrófitas enraizadas emergentes: Se encuentran en suelos anegados permanente o temporalmente; en general son plantas perennes, con órganos reproductores aéreos.

Para el tipo de humedal seleccionado, las macrófitas que se utilizan son las macrófitas enraizadas emergentes. Entre las propiedades con las que cuentan estas especies, están los efectos físicos como la estabilización de la superficie de los humedales construidos y la prevención de taponamientos de la matriz.

Además, proveen buenas condiciones para la filtración física y una superficie considerablemente grande para el crecimiento microbiano adjunto. Otra de sus propiedades es la transferencia de oxígeno a la rizósfera, aunque las estimaciones sobre la cantidad de esta transferencia de oxígeno varían en un amplio rango. Existe una variedad de plantas, para realizar tratamientos de depuración, sin embargo, de acuerdo con el Manual '*Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*', se selecciona para la presente alternativa, la Tatora (*ScirpusSpp.*)

Esta decisión se justifica en la utilización de este tipo de macrófita en procesos similares en la región, ya que es la especie que se encuentra en mayor proporción en el Valle Central cochabambino. Específicamente, se tiene conocimiento de su existencia en abundancia en las zonas de inundación de la planta de tratamiento de Alba Rancho, en la Laguna de Alalay (lugares con una distancia aproximada del municipio de Mizque de 160km) y otros cauces de agua naturales.

Lo anterior, teniendo en cuenta que si bien existen pequeñas diferencias en la eficiencia de remoción de contaminantes entre las distintas especies vegetales, la recomendación es utilizar la especie de mayor adaptación y disponibilidad en el medio.

### 3.5.1. Caracterización de la Tatora

ÍTEM	CARACTERÍSTICA
Tipo	Helófito.
Condiciones de adaptación	- Saturación de humedad e inundación, siempre que el agua no las cubra completamente. - Soportan una fuerte limitación en la disponibilidad de oxígeno en el suelo.
Visualización	Comprenden una parte debajo del nivel del agua, y otra parte aérea.
Funciones para humedales artificiales	- Sirven de filtro para mejorar los procesos físicos de separación de partículas. - Asimilación directa de nutrientes (en especial y metales, que son retirados del medio e incorporados al tejido vegetal). - Actúan a modo de soporte para el desarrollo de biopelículas de microorganismos, que actúan purificando el agua mediante procesos aerobios de degradación. - Transportan grandes cantidades de oxígeno desde los tallos hasta sus raíces y rizomas, donde es usado por dichos microorganismos.
Clasificación sistemática	- Reino: Plantae. - División: Magnoliophyta. - Clase: Liliopsida. - Orden: Cyperales. - Familia: Cyperaceae. - Género: Scirpus. - Especie: Scirpus californicus tator.
Epidermis	Delgada a fin de reducir la resistencia al paso de gases, agua y nutrientes y tejidos; grandes espacios intercelulares que forman una red de conductos huecos en los que se almacena y circula aire con oxígeno. Esto permite la transferencia de oxígeno desde el aire y órganos fotosintéticos, y desde ahí, hacia las raíces.
Rizomas	Acumulan reservas, con lo que aumentan su volumen, y en épocas favorables las yemas aprovechan esas reservas para germinar.

Tallos	Tienen aerénquimas, que son tejidos con grandes espacios intercelulares llenos de aire, que facilitan la flotación y la llegada de aire a los órganos sumergidos
Reproducción	La reproducción vegetativa es por desarrollo de propágulos vegetativos; o sea, mediante células especializadas en propagar la planta (meristemos), agrupadas en estructuras especiales (rizomas). De esta manera se producen individuos nuevos, pero adaptados al medio ambiente.
Adaptación	<p>Las especies helófitas tienen un gran rango de adaptación, por lo que constituyen las especies dominantes en lugares donde las condiciones restringen las posibilidades de desarrollo de otras especies.</p> <p>Son plantas de climas templados que prosperan en posiciones soleadas, tolerando un amplio rango de pH (4 - 9). La temperatura media óptima para su desarrollo está dentro del intervalo de 16C a 27C, lo cual se adapta a las condiciones climáticas del municipio que varía entre 16C a 18C durante todo el año.</p> <p>Prospera muy bien en medios acuáticos de profundidad somera como lagunas o zonas de inundación. Estos aspectos serán tenidos en cuenta en las condiciones de flujo intermitente a las que se someterá el humedal.</p>
Implantación	<p>Es recomendable que las plantas madres procedan de poblaciones naturales de la zona, a fin de asegurar su adaptación al lugar. Como ya se indicó, se cuenta con esta especie vegetal en la zona.</p> <p>Se implantan individualmente en el sustrato o fango del humedal en primavera o épocas calurosas, porque el frío puede matarlas. No obstante, la zona de implantación cuenta con un clima templado a cálido durante todo el año.</p> <p>Posteriormente, el lecho debe inundarse con agua hasta la superficie o rociarse con frecuencia, pero siempre se debe tener el cuidado de que el nivel del agua no sobrepase la altura de las plantas cortadas.</p>
Operación	La operación básicamente consiste en la cosecha y el deshierbe y varía según el tipo de humedal. En humedales sub-superficiales de flujo vertical como el seleccionado, se debe hacer el deshierbe durante el primer año. Una vez que las plantas están establecidas, esta operación deja de ser necesaria. En época de otoño de cada año se debe segar y evacuar la parte aérea de las plantas. La evacuación permite evitar su acumulación en la superficie de los filtros.
Plagas y enfermedades	Son plantas muy rústicas de las que no se tiene referencias de plagas y enfermedades en su aplicación en humedales artificiales.

#### 4. Conclusiones

Los Humedales Artificiales de Flujo Sub-Superficial podrían considerarse como una de las tecnologías alternativas, para el tratamiento de aguas residuales (grises y negras), mejor aceptadas en zonas rurales y zonas periurbanas de Bolivia. Su reconocimiento en las Guías Técnicas del Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico, así como su capacidad de adaptación para las diferentes zonas del país (Altiplano, Valles o Llanos), refrendan su eficiencia, favorecen su aceptación y a su vez, impulsan una mayor utilización de esta tecnología.

En Bolivia, no existe todavía ninguna planta de tratamiento que cumpla con los parámetros propuestos por el reglamento de la Ley N° 1333, del Medio Ambiente. Donde los

Valores límites para el efluente de una PTAR son: DBO<sub>5</sub> 80mg/l, DQO 250mg/l y coliformes fecales 1000 CF/100ml. A pesar de que los humedales artificiales se acercan a estos parámetros, siguen existiendo ciertos aspectos técnicos a ser investigados y comprobados, con lo cual para este proceso es importante tener en cuenta el enfoque de Gestión integral de los recursos hídricos.

Su eficiencia en la remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos, es función del área superficial y está condicionada a un tratamiento primario de las aguas residuales, en este caso, un canal de desbaste y desarenador estático. Al ser un mecanismo enteramente físico, la remoción de los sólidos es considerada su mejor función.

Los costos de inversión de los Humedales Artificiales de Flujo Sub-Superficial, oscilan entre los 20 y 30U\$S por persona, sin incluir los costos del terreno que es necesario para su implementación. En cuanto a los costos anuales de mantenimiento y operación se calculan en un rango de 2 a 5U\$S por persona. Por último y no menos importante es necesario tener en cuenta los costos asociados a la capacitación y sensibilización de la comunidad, que será el mayor componente para asegurar su sostenibilidad operativa.

La seguridad de las instalaciones es otro punto a destacar, en el caso de los animales de la zona al encontrarse con una vegetación similar a las que utilizan de alimento corren el riesgo de consumirlas y por consecuencia alterar el funcionamiento de los Humedales.

Finalmente, mencionar que la implementación de los Humedales artificiales, por su alta eficiencia en la eliminación de coliformes, ayudará a reducir las tasas de enfermedades causadas por esta bacteria, y en consecuencia se producirá un efecto positivo en la salud pública y bienestar social de la población de Mizque.

## Referencias

[1] Ayres, R.M & Mara, D.D. Análisis de las aguas residuales para su uso en la agricultura. OMS, 1996. Disponible en:

[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/wastewater/labmanual.pdf?ua=1](http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/labmanual.pdf?ua=1)

[2] OXFAM Intermón. Consumo responsable del agua. Disponible en:

<https://blog.oxfamintermon.org/enfermedades-transmitidas-por-el-agua-contaminada/>

[3] Unicef. Data: Monitoring the Situation of Children and Women 2015.

Disponible en:<https://data.unicef.org/topic/child-survival/under-five-mortality/>

[4] Ministerio del Agua - Viceministerio de Servicios Básicos. Guía de Desarrollo Comunitario en proyectos de agua y saneamiento para poblaciones de 2.001 a 10.000 habitantes. La Paz, Bolivia. Julio de 2008. Disponible en:

<http://www.anesapa.org/wp-content/uploads/2014/12/GUIA3.pdf>

[5] Asociación Nacional de Empresas de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado. "Recomendaciones para la elección de plantas de tratamiento de agua residual aptas para Bolivia. La Paz, Bolivia. Marzo, 2012. Disponible en: <http://www.bivica.org/upload/aguas-residuales.pdf>

[6] Ministerio de Medio Ambiente y Agua. La Paz, Bolivia, Octubre de 2013 "Sistematización sobre tratamiento y reúso de aguas residuales".

Disponible en: <http://www.bivica.org/upload/aguas-residuales-reuso.pdf>

[7] Ministerio del Medio Ambiente y Agua. "Guía Técnica de Diseño y Ejecución de Proyectos de Agua y Saneamiento con tecnologías alternativas". Bolivia, 2010. Disponible en: <http://saludpublica.bvsp.org.bo/textocompleto/bvsp/boxp68/guia-tecnica-agua.pdf>

[8] Alianza por el Agua, con la colaboración del Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua – CENTA. "Manual de Depuración de Aguas Residuales Urbanas".2008

[9] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Urbano. Gobierno de España "Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones".2010. Disponible en: [http://www.centa.es/descargas/Manual\\_S.Depuracion.pdf](http://www.centa.es/descargas/Manual_S.Depuracion.pdf)

[10] Kolb, P. Design of a constructed wetland (pilot plant) for the reclamation of the river Besós, Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur, Universität für Bodenkultur. 1998

[11] Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA), Universidad Mayor de San Simón y Departamento de Productos Naturales, Biología Vegetal y Edafología de la Universidad de Barcelona (España). Bolivia, 2010. Disponible en: [http://blogdelagua.com/wp-content/uploads/2013/02/depuracion\\_de\\_aguas\\_residuales\\_por\\_medio\\_de\\_humedales\\_artificiales.pdf](http://blogdelagua.com/wp-content/uploads/2013/02/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf)

[12] Brix, P. Constructed wetlands for pollution control: Processes, performance, design and operation, IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing. 2000

[13] García, M., J.M. Bayona y J. Morató. "Depuración con sistemas naturales: humedales construidos" ponencia presentada en el "IVCongrés Ibèric de Gestió i Planificació de l'Aigua", Tortosa, España. 2004. Disponible en: [http://eflus.com/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=154&Itemid=109](http://eflus.com/index.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=154&Itemid=109)

[14] Cooper, P. Sizing vertical flow and hybrid constructed wetlands systems. The use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment. 1st International Seminar. Dias V. y Vymazal J. (eds.), Instituto Nacional da Água, Lisbon, Portugal. 2003.

[15] Arias, O. Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujos subsuperficial. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental. Tesina, Barcelona. 2004. Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3339>

[16] Lara, B, J.A. Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales, Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña - Instituto Catalán de Tecnología, Barcelona. 1999. Disponible en: <https://sites.google.com/site/humedalesartificiales/>