



**TECNOLOGÍA DE WETLANDS  
CONSTRUIDAS PARA TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES EN PEQUEÑAS  
COMUNIDADES DEL INTERIOR DEL  
PARAGUAY: ESTUDIO DE CASO LA  
CIUDAD DE LOMA PLATA (CHACO)**

**FERNANDO GUSTAVO ORREGO MILESSI**

2018



MINISTERIO DE  
OBRAS PÚBLICA  
Y COMUNICACIONES

FERNANDO GUSTAVO ORREGO MILESSI

TECNOLOGÍA DE WETLANDS CONSTRUIDAS PARA TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES EN PEQUEÑAS COMUNIDADES DEL  
INTERIOR DEL PARAGUAY: ESTUDIO DE CASO LA CIUDAD DE LOMA  
PLATA (CHACO)

Monografía presentada al Curso de  
Especialización en Saneamiento y Recursos  
Hídricos de la Escuela de Ingeniería de São  
Carlos de la Universidad de São Paulo como  
parte de los requisitos para la obtención del  
título de Especialista en Saneamiento y  
Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Davi Gasparini  
Fernandes Cunha

São Carlos

2018

AUTORIZO LA REPRODUCCIÓN Y DIVULGACIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE TRABAJO, POR CUALQUIER MEDIO CONVENCIONAL O ELECTRÓNICO, PARA FINES DE ESTUDIO E INVESTIGACIÓN, DESDE QUE SE CITE LA FUENTE.

Ficha catalográfica preparada por la Sección de Atendimento al  
Usuario del Servicio de la Biblioteca  
"Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes" de la EESC/USP

075p

Orrego Milessi, Fernando Gustavo

Potencialidade de la utilización de tecnologia wetlands construídas para tratamento de aguas residuales em pequenas comunidades em el interior del Paraguay : estudo de caso em la ciudad de Loma Plata (Chaco Paraguayo) / Fernando Gustavo Orrego Milessi; orientador Davi Gasparini Fernandes Cunha. -- São Carlos, SP, 2018.

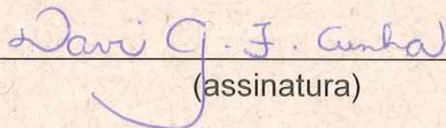
Monografía (Especialización en Ingeniería de Saneamiento y Recursos Hídricos) -- Escuela de Ingeniería de São Carlos de la Universidad de São Paulo.

1. Tratamiento de aguas residuales. 2. Zonas rurales del Paraguay. 3. Wetlands construídas. 4. Macrofitas acuáticas. I. Cunha, Davi Gasparini Fernandes.  
II. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Candidato:** Fernando Gustavo Orrego Milesi**Título do TCC:** Potencialidad de la utilización de tecnología wetlands construidas para tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades en el interior del Paraguay. Subtítulo: Estudio de caso en la ciudad de Loma Plata (Chaco Paraguayo).**Data de defesa:** 07 de dezembro de 2018

Comissão Julgadora	Resultado
Prof. Dr. Davi Gasparini Fernandes Cunha (Orientador)	APROVADO
Instituição: Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Hidráulica e Saneamento	
Prof. Dr. Tadeu Fabrício Malheiros	APROVADO
Instituição: Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Hidráulica e Saneamento	

Presidente da Banca: **Prof. Dr. Davi Gasparini Fernandes Cunha**  
(assinatura)

## DEDICATORIA

*A minha esposa Romina, minha filha  
Lucia e minha mãe Zully com todo  
carinho e pelo apoio incondicional.*

## AGRADECIMENTOS

A mi esposa Romina y a mi hija Lucia por comprenderme y darme la oportunidad de capacitarme a pesar de la distancia.

A mi mamá Zully por el apoyo incondicional durante toda mi formación profesional de no ser por ella no estaría aquí, y a mi papá Gustavo que me da fuerza desde el cielo.

A todos los profesores de esta especialización que dieron el máximo esfuerzo y la paciencia para que aprendamos y llevemos el máximo de conocimientos.

Al Profesor Dr. Davi Gasparini por haber aceptado mi pedido de orientación y haber despertado interés en profundizar lo aprendido en clases, también por la orientación y enseñanza para la realización de esta monografía.

A MSc. Nicolás Finkler por la orientación como co-orientador y guía para la realización del trabajo, por su amabilidad y exigencia.

A la República del Paraguay y al Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones que hicieron posible este proyecto de formación para sus funcionarios en busca de personal más calificado.

“Las próximas guerras del siglo XXI serán  
provocadas por la falta de agua”

*Ismail Serageldin*

## RESUMEN

Orrego Milessi, Fernando Gustavo. Título: Tecnología wetlands construidas para tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades del interior del Paraguay. Subtítulo: Estudio de caso la ciudad de Loma Plata (Chaco) 2018. 67 p. Monografía (Trabajo de Conclusión de Curso) – Escuela de Ingeniería de São Carlos, Universidad de São Paulo, São Carlos, 2018.

La falta de tratamiento de aguas residuales es un problema de saneamiento básico muy común en los países subdesarrollados como Paraguay. Esta situación se agrava en zonas alejadas o rurales de baja renta y con déficit de personal calificado para la operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales, inviabilizando su implantación. Por esta razón se buscó alternativas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales que atiendan mejor la realidad de las pequeñas comunidades. En este trabajo se presentó la tecnología de wetlands construidas como alternativa para el tratamiento de aguas residuales el cual se caracteriza por ser un sistema natural que atiende aspectos que caracterizan a estas pequeñas comunidades. También fue proyectado un tratamiento previo de fosa séptica para ayudar en la reducción de materia orgánica y minimizar problemas en los wetlands. El dimensionamiento consistió en wetlands construidos que puedan atender a diferentes conjuntos habitacionales de entre 10 a 50 personas de la ciudad de Loma Plata (Chaco Paraguayo) dependiendo de la disponibilidad de espacio con que se cuenta ya que a medida que aumenta las personas atendidas aumenta el área superficial necesaria para su implantación. Fue estimado un costo preliminar de implementación para atender a una población de 50 personas el cual arroja un valor de Gs 7.894.404 lo que conlleva a un prorrateo de Gs 157.890 por persona lo que representa un costo accesible para poblaciones con baja renta que podrían ser subsidiado por el gobierno, no obstante carece de otros costos como operación y mantenimiento. Es importante mencionar que se necesitó la sensibilización, transmisión de información y de la colaboración de la población ya que es un sistema descentralizado que será construido y operado dentro de la propiedad del usuario. Este sistema también apporto conocimiento en el área educacional esclareciendo la importancia en el tratamiento de las aguas residuales y la prevención del medio ambiente.

Palabra clave: 1. Tratamiento de aguas residuales. 2. Zonas rurales del Paraguay. 3. Wetlands Construidas. 4. Macrofitas acuáticas.

## RESUMO

Orrego Milessi, Fernando Gustavo. Título: Tecnologia de zonas úmidas construída para tratamento de águas residuárias em pequenas comunidades no interior do Paraguai. Subtítulo: Estudo de caso da cidade de Loma Plata (Chaco) 2018. 67 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A falta de tratamento de águas residuais é um problema de saneamento básico muito comum em países subdesenvolvidos como o Paraguai. Esta situação é pior em áreas remotas ou rurais de baixa renda com déficit qualificado para a operação de sistemas de tratamento de águas residuais implantação inviável convencional. Por esse motivo, buscou-se alternativas tecnológicas para o tratamento de efluentes que melhor atendessem a realidade das pequenas comunidades. Este artigo descreve a tecnologia como um alagados construídos alternativos para o tratamento de águas residuais que é caracterizada como um sistema natural que atende aspectos que caracterizam estas pequenas comunidades foi apresentada. Um tratamento prévio de fossas sépticas também foi planejado para ajudar na redução de matéria orgânica e minimizar problemas nas zonas úmidas. Ele dimensionamento consistia de wetlands construídos que podem atender a diferentes projetos habitacionais entre 10 a 50 pessoas na cidade de Loma Plata (Chaco Paraguai), dependendo da disponibilidade de espaço com que conta, porque à medida que mais pessoas atendidas aumenta área de superfície necessária para a sua implantação. Foi um custo preliminar estimado de implementação para atender a uma população de 50 pessoas, que deu um valor de  $\text{G} \$ 7.894.404$  que leva a um rateio de  $\text{G} \$ 157.890$  por pessoa representando acessível para populações de baixa renda Eles poderiam ser subsidiados pelo governo, mas faltam outros custos, como operação e manutenção. É digno de nota que a consciência, a transmissão de informações e colaboração da população, pois é um sistema descentralizado que será construído e operado dentro da propriedade do usuário foi necessário. Esse sistema também contribuiu com conhecimentos na área educacional, esclarecendo a importância do tratamento de efluentes e a prevenção do meio ambiente.

Palavra-chave: 1. Tratamento de águas residuais. 2. Áreas rurais do Paraguai. 3. Wetlands construídos. 4. Macrófitas aquáticas.

## ABSTRACT

Orrego Milessi, Fernando Gustavo. Title: Wetlands technology built for wastewater treatment in small communities in the interior of Paraguay. Subtitle: Case study the city of Loma Plata (Chaco) 2018. 67 p. Monograph (Course Completion Work) - School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2018.

The lack of wastewater treatment is a problem of basic sanitation very common in underdeveloped countries like Paraguay. This situation is aggravated in remote or rural areas with low income and a shortage of qualified personnel for the operation of conventional wastewater treatment systems, making their implementation unfeasible. For this reason, technological alternatives for the treatment of wastewater that better address the reality of small communities were sought. In this work, wetlands technology was presented as an alternative for wastewater treatment, which is characterized as a natural system that addresses aspects that characterize these small communities. A previous septic tank treatment was also planned to help in the reduction of organic matter and minimize problems in the wetlands. The dimensioning consisted of constructed wetlands that can serve different housing groups of between 10 and 50 people from the city of Loma Plata (Chaco Paraguayo) depending on the availability of space that is available as the number of people served increases. surface area necessary for its implantation. It was estimated a preliminary implementation cost to serve a population of 50 people which gave a value of 7. s 7,894,404 which leads to a proration of G s 157,890 per person, which represents an affordable cost for low income populations. They could be subsidized by the government, however, they lack other costs such as operation and maintenance. It is important to mention that the awareness, transmission of information and the collaboration of the population was needed since it is a decentralized system that will be built and operated within the property of the user. This system also contributed knowledge in the educational area clarifying the importance in the treatment of wastewater and the prevention of the environment.

Keyword: 1. Wastewater treatment. 2. Rural areas of Paraguay. 3. Built Wetlands. 4. Aquatic macrophytes.

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Clasificación de wetlands construidos.....	25
Figura 2. Sistema de wetlands construido de flujo superficial.....	26
Figura 3. Sistema de wetlands construido de flujo subsuperficial horizontal.....	27
Figura 4. Esquema de sistema de wetlands construido de flujo subsuperficial vertical .....	28
Figura 5. Principales grupos de macrofitas acuáticas .....	32
Figura 6. Localización de la ciudad de Loma Plata .....	36
Figura 7. Vista aérea de la ciudad de Loma Plata .....	37
Figura 8. Imagen los principales accesos a la ciudad y lotes prediales.....	37
Figura 9. Imagen satelital del centro de la ciudad de Loma Plata.....	38
Figura 10. Mapa de suelos del Paraguay.....	39
Figura 11. Mapa de precipitaciones del Chaco Paraguayo .....	40
Figura 12. Actual sistema de abastecimiento de agua de las viviendas de la ciudad de Loma Plata (recolección de agua de lluvia en aljibes). .....	41
Figura 13. En proyecto Acueducto y planta de tratamiento de agua potable para la ciudad de Loma Plata .....	41
Figura 14. Porcentaje de las macrofitas más utilizadas.....	44
Figura 15. Macrófitas acuáticas typha domingensis .....	44
Figura 16. Costos de construcción del sistema de tratamiento para 10, 30 y 50 habitantes ....	60
Figura 17. Vivienda donde se generan las aguas residuales domiciliarias .....	61
Figura 18. Fosa séptica domiciliaria .....	62
Figura 19. Sistema de Wetlands construido de flujo subsuperficial horizontal.....	62
Figura 20. Reúso del agua residual tratada por wetlands construidos .....	63

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Enfermedades transmitidas por el agua.....	17
Cuadro 2. Disposición final de las aguas residuales o excretas .....	21
Cuadro 3. Sistemas de tratamiento de aguas residuales y valores teóricos de eficiencia y costos.....	22
Cuadro 4. Mecanismos de remoción de contaminantes en sistemas de tratamiento basados en macrofitas acuáticas .....	30
Cuadro 5. Ventajas y desventajas en la utilización de wetlands construidos.....	30
Cuadro 6. Eficiencias medias obtenidas en sistemas de wetlands construidos.....	42
Cuadro 7. Granulometría de los principales materiales soportes para wetlands construidos ..	45
Cuadro 8. Composición típica del agua residual domestica bruta .....	46
Cuadro 9. Valores máximos admisibles de sustancias para lanzamiento .....	47
Cuadro 10. Valores de constante de decaimiento y coeficiente de temperatura para sistema de WCFSS dependiendo del contaminante a ser removido .....	48
Cuadro 11. Clasificación de consumo per cápita de agua en predios .....	51
Cuadro 12. Calculo y valores adoptados para dimensionamiento de fosa séptica.....	51
Cuadro 13. Resultados del dimensionamiento de wetlands construidos (WCFSSH).....	53
Cuadro 14. Materiales y costos preliminares para la implementación (WCFSSH) caso 10 hab. ....	58
Cuadro 15. Materiales y costos preliminares para la implementación (WCFSSH) caso 30 hab. ....	59
Cuadro 16. Materiales y costos preliminares para la implementación (WCFSSH) caso 50 hab. ....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

STP	–	Secretaría técnica de Planificación
DGEEC	–	Dirección General de Estadística Encuesta y Censo
ESSAP	–	Empresa de Servicios Sanitarios del Paraguay
IMTA	–	Instituto Mexicano de Tecnología Ambiental
MAG	–	Ministerio de Agricultura y Ganadería
MOPC	–	Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones
DGCP	–	Dirección General de Contrataciones Públicas
NBR	–	Norma técnica Brasileira
ABNT	–	Asociación Brasileira de Normas Técnicas
DBO <sub>5</sub>	–	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	–	Demanda Química de Oxígeno
SEAM	–	Secretaría del Ambiente Paraguay
WC	–	Wetlands Construido
WCFSS	–	Wetlands Construido de Flujo Subsuperficial

## LISTA DE SÍMBOLOS

US\$	Moneda Dólares Americanos
%	Porcentaje
m	Metro
mm	Milímetro
cm	Centímetro
m <sup>2</sup>	Metro cuadrado
PH	Potencial de Hidrogeno
C/N	Relación Carbono/Nitrógeno
Km	Kilometro
Msnm	Metros sobre el nivel del mar
Km <sup>2</sup>	Kilómetro cuadrado
°C	Grado centígrado
₡	Moneda Guaraníes
m <sup>3</sup>	Metro cubico
m <sup>3</sup> /d	Metro cubico por día
mg/L	Miligramos por Litro
N°/100ml	Numero por 100 mililitros
µg/L	Microgramos por Litro
d <sup>-1</sup>	Unidad por día
L	Litro
Kg	Kilogramo

## INDICE

CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	17
1.1 Objetivo General .....	19
1.2 Objetivos Específicos.....	19
CAPÍTULO 2 – REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	20
2.1 Infraestructura de saneamiento para minimización de impactos ambientales negativos sobre la naturaleza.....	20
2.2 Situación actual del saneamiento a nivel global .....	20
2.3 Situación actual en el saneamiento en Paraguay.....	21
2.4 Saneamiento en pequeñas comunidades – foco en tratamiento de aguas residuales .....	22
2.5 Wetlands para tratamiento de aguas residuales.....	23
2.6 Utilización de wetlands construidas (humedales artificiales) para tratamiento de efluentes domiciliarios .....	24
2.7 Clasificación de Wetlands construidos .....	25
2.7.1 Sistema de flujo libre o superficial .....	26
2.7.2 Sistema de flujo subsuperficial .....	26
2.8 Componentes y factores que influyen en el desempeño de los Wetlands de flujo subsuperficial .....	28
2.9 Mecanismos de remoción de contaminantes de los wetlands construidos.....	30
2.10 Ventajas y desventajas en la utilización de wetlands construidos para tratamiento de aguas residuales.....	30
2.11 Evaluación de las macrófitas acuáticas que mejor se adapten al medio ambiente y proporcionen mejores resultados en la remoción de contaminantes .....	32
2.12 Evaluación de utilización de la biomasa generada en las wetlands .....	33
CAPÍTULO 3 – MÉTODOS.....	35
3.1 Metodología de estudio.....	35
3.2 Descripción del área de estudio (Ciudad de Loma Plata) .....	35
3.3 Características físicas del suelo chaqueño (Loma Plata) .....	38
3.4 Precipitaciones (lluvias) de la ciudad de Loma Plata.....	39
3.5 Sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Loma Plata.....	40
3.6 Evaluación y dimensionamiento de tratamiento preliminar .....	42
3.7 Elección del tipo de wetlands construida según su eficiencia.....	42

3.8 Elección del tipo de macrofitas a ser utilizada en los wetlands .....	43
3.9 Material soporte y filtrante.....	45
3.10 Dimensionamiento de los wetlands construidos para la ciudad de Loma Plata.....	46
3.11 Eficiencia deseada según padrón de lanzamiento .....	46
3.12 Dimensionamiento del sistema de tratamiento de efluentes por Wetlands construidos ..	47
3.13 Estimativa preliminar de costos de construcción .....	50
<b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS Y DISCUSIONES .....</b>	<b>51</b>
4.1 Calculo de contribución per cápita de agua residual.....	51
4.2 Calculo de dimensionamiento de la fosa séptica.....	51
4.3 Calculo de dimensionamiento del wetlands construido .....	52
4.4 Operación y mantenimiento de wetlands construidos.....	55
4.4.1 Aspectos importantes para su implementación .....	55
4.4.2 Consideraciones para la operación de wetlands construidos .....	56
4.4.3 Posibles complicaciones y soluciones.....	57
4.4.4 Manejo de las macrófitas acuáticas.....	57
4.5 Estimativa preliminar de costos .....	58
4.6 Flujograma del sistema de tratamiento por wetlands construidos (WCFSSH).....	61
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>64</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>65</b>

## CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La realidad del saneamiento básico<sup>1</sup> en Paraguay, así como en mucho de los países en desarrollo es limitado, a pesar de contar con servicios básicos de abastecimiento de agua, recolección de residuos sólidos, alcantarillado sanitario, tratamiento de aguas residuales y drenajes pluviales en la capital y área metropolitana, como también en algunas ciudades importantes del interior del país. Esta situación se agrava en zonas alejas o rurales donde el déficit de inversiones es aún mayor, acarreando problemas serios como diseminación de enfermedades, proliferación de vectores y degradación del medio ambiente (STP, 2014).

Cuadro 1. Enfermedades transmitidas por el agua.

<b>Enfermedades transmitidas por el agua</b>	
Las enfermedades debidas a la ingestión de agua contaminada por microorganismos y productos químicos.	La diarrea, la arsenicosis y la fluorosis.
Las enfermedades que tienen un organismo causante que está presente en el agua como parte de su ciclo vital.	La esquistosomiasis.
Las enfermedades transmitidas por el suelo que se deben a las deficiencias de saneamiento e higiene.	Las helmintiasis
Las enfermedades que transmiten vectores que se reproducen en el agua.	El paludismo y el dengue.
Las enfermedades que son causadas por aerosoles que contienen determinados microorganismos.	La legionelosis.

Fuente: [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/diseases-risks/diseases/es/](https://www.who.int/water_sanitation_health/diseases-risks/diseases/es/)

En este contexto, el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales por procesos convencionales es el menos favorecido debido al alto costo y por la complejidad que estos representan para su funcionamiento (Philippi et al. 2007). Por ello se buscan alternativas de tratamiento de efluentes como los llamados Wetlands Construidos que son una opción viable

<sup>1</sup> Nota: El saneamiento básico en Paraguay incluye el alcantarillado sanitario y el tratamiento de las aguas negras no así el tratamiento del agua potable ni los residuos sólidos.

de bajo costo de implantación y operación y poseen buena eficiencia en el tratamiento del agua residual (Philippi et al. 2007). Por otra parte, el empleo de la tecnología evita la utilización de productos químicos, viabilizando la posibilidad de reusó del agua tratada para irrigación o como armonización y belleza paisajística en el ambiente que es inserido.

Los wetlands construidos también llamados humedales artificiales, zonas de raíces, lechos cultivados, alagados construidos o root zone, tienen como objetivo el tratamiento de aguas residuales, formando ecosistemas artificiales con base en procesos naturales de depuración y llevándose a cabo complejos procesos físicos, químicos y biológicos. El sistema está conformado básicamente por tres elementos: el suelo, los microorganismos y las plantas. La remoción de contaminantes ocurre principalmente a través de la filtración y depuración de la materia orgánica por los microorganismos formadores del biofilme adheridos a las raíces y al sustrato presente en el sistema (Sezerino, 2006).

Fue propuesto en este estudio la potencialidad de utilizar esta tecnología de tratamiento de aguas residuales para la ciudad de Loma Plata, ubicada en el chaco Paraguayo el cual posee diferentes características de una ciudad rural<sup>2</sup> y poseer comunidades pequeñas dispersas, y debido a la ausencia de cualquier forma de tratamiento de las aguas residuales en la localidad. Fueron utilizados datos e informaciones recopilados necesarios de diferentes órganos investigadores para el dimensionamiento de wetlands construidos para atender a viviendas unifamiliares como también conjuntos habitacionales de hasta 50 personas en toda la ciudad. También fue dimensionado un tratamiento previo de fosa séptica para mejorar y ayudar al tratamiento dentro del humedal artificial.

Gracias a las innumerables investigaciones realizadas en diferentes países como el Brasil, existe una variedad de informaciones que facilitan el dimensionamiento de los wetlands construidos como por ejemplo la porosidad del material soporte, el área superficial del wetlands, el tiempo de detención hidráulica, el tipo de macrófitas a ser utilizado, etc. Todo ello asegura el buen funcionamiento del sistema. Otros datos importantes para el dimensionamiento son la caracterización de las aguas residuales a tratar y los patrones de lanzamiento al cuerpo hídrico, con los cuales se hace posible estimar la eficiencia que debemos alcanzar.

También evaluamos los costos que conllevan a su implantación con el fin de justificar y recomendar su utilización en zonas alejas o rurales de baja renta y con limitado personal técnico calificado para su operación.

---

<sup>2</sup> Nota: Entiéndase por comunidad rural aquella que se encuentra alejada de zonas urbanas con déficit infraestructura como caminos pavimentados, drenajes urbanos, abastecimiento de agua, alcantarillado sanitario, etc.

## **1.1 Objetivo General**

Evaluar la potencialidad de utilización de la tecnología de wetlands construidos en la ciudad de Loma Pata, Paraguay, como alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales domésticas donde será atendida de forma descentralizada toda la población dimensionando sistemas de tratamiento para 10, 30 y 50 personas.

## **1.2 Objetivos Específicos**

- Recopilación de datos e informaciones bibliográficas de la literatura con el fin de dar soporte teórico a la investigación.
- Dimensionamiento del sistema de wetlands construidos y del sistema previo de tratamiento.
- Análisis preliminar de los costos de implementación.

## **CAPÍTULO 2 – REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Infraestructura de saneamiento para minimización de impactos ambientales negativos sobre la naturaleza**

La infraestructura de saneamiento básico en actualidad cumple un papel muy importante para la salud pública y el medio ambiente, en especial en zonas urbanas por tener poblaciones mayores y adensadas. Según estudios realizados por los organismos internacionales por cada 1 US\$ que se invierte en saneamiento conlleva un beneficio de 5,5 US\$ en retorno para la sociedad (UNESCO, 2017).

El rápido crecimiento poblacional mundial y las actividades antrópicas como captaciones excesivas de agua, contaminación de los cuerpos receptores, nulo tratamiento de aguas residuales afectan negativamente al medio ambiente por ello es necesario pensar en medidas que puedan minimizar o neutralizar estos problemas ya que de ello depende la vida y la salud de los seres humanos.

### **2.2 Situación actual del saneamiento a nivel global**

El vertido de aguas residuales es una práctica común que se sigue realizando en muchos países en desarrollo por no contar con la infraestructura necesaria, capacidades técnicas e institucionales y el financiamiento propio para llevar a cabo estos proyectos. En los países de ingresos altos se tratan cerca del 70% de las aguas residuales e industriales que son generadas, mientras que en los países de ingresos bajos apenas se alcanza un 8% de algún tratamiento de las aguas residuales lo que denota una diferencia significativa (UNESCO, 2017). Con estas estimaciones podemos sustentar que casi el 80 % de las aguas residuales son vertidas al medio ambiente sin ningún tipo de tratamiento. Cabe mencionar que este porcentaje está concentrado principalmente en zonas rurales donde hay escasos o situaciones precarias de saneamiento. Por otra parte, tenemos a los de alto ingresos que realizan tratamientos avanzados de aguas residuales, con el fin de buscar una alternativa de reúso de los recursos debido a la escasez hídrica (UNESCO, 2017).

### 2.3 Situación actual en el saneamiento en Paraguay

Actualmente en Paraguay el 85 % de los hogares cuentan con sistema de agua apta para el consumo (aguas en buenas condiciones), mientras que el 63 % posee agua tratada por medios convencionales en plantas de tratamiento y distribuidos en red de abastecimiento. Por otro lado el 79 % posee infraestructura mejorada de agua potable, saneamiento y recolección de residuos sólidos. Mientras que solo el 8,6 % cuenta con alcantarillado sanitario en todo el territorio nacional el cual puedes ver en el (Cuadro 1). El sistema de agua y saneamiento ha sufrido transformaciones estructurales en las últimas décadas para atender la demanda en zonas urbanas, periurbanas y también en las zonas rurales sin acceso a agua para consumo humano y sin alternativas de saneamiento para la disposición de aguas residuales y excretas (STP, 2014).

Cuadro 2. Disposición final de las aguas residuales o excretas

Disposición de las agua residuales o excretas	Total País (%)	Área urbana (%)	Área rural (%)
Hoyo o pozo <sup>3</sup>	38,0	12,7	98,9
Pozo ciego	52,4	71,0	0,0
Red pública (alcantarillado sanitario)	8,6	15,2	0,0
Superficie de la tierra, río, arroyo, etc.	1,0	1,1	1,1
<b>Total</b>	100	100	100

Fuente (DGEEC, 2002).

El déficit de saneamiento afecta principalmente a las zonas marginales periurbanas, y en áreas rurales de poblaciones en situación de pobreza, las comunidades dispersas, los asentamientos y las poblaciones indígenas. La falta de esta infraestructura conlleva a que la población disponga de forma inadecuada y lance sus aguas residuales domésticas a la calle o a los cuerpos hídricos, provocando consecuencias adversas al medio ambiente y generando problemas de salud pública como epidemias y enfermedades transmisibles por el agua (STP, 2014).

Respecto al alcantarillado sanitario, la baja cobertura es un problema crítico en Asunción y su área metropolitana. Por ejemplo, solo un 33% de la población está conectada a este servicio, por lo que es prácticamente inexistente el adecuado manejo de aguas residuales. Cada día, 2,9 millones de metros cúbicos de aguas residuales sin tratar son vertidas al Río Paraguay y sólo 11% de los desagües cloacales tienen un tratamiento antes de llegar al río.

<sup>3</sup> Pozo: Agujero en el suelo de poca profundidad sin ningún tipo de impermeabilización.

Estas aguas residuales sin tratar se infiltran en acuíferos poco profundos (aquellos que muchas familias utilizan para la provisión de agua) o son directamente descargadas en las calles, afectando seriamente el medio ambiente y la salud de la población (ESSAP, 2017).

#### 2.4 Saneamiento en pequeñas comunidades – foco en tratamiento de aguas residuales

La falta de tratamiento de aguas residuales es uno de los mayores problemas que enfrenta la población en general, por ende este problema se agrava en pequeñas comunidades<sup>4</sup>, alejadas y de baja renta como por ejemplo asentamientos indígenas y pueblos aislados. Por ello se busca una alternativa de tratamiento de aguas residuales domesticas que sea sustentable, simple y barata (costo de implementación, operación y mantenimiento bajo), y pueda atender de forma eficiente el déficit de infraestructura sanitaria (Cuadro 2).

Cuadro 3. Sistemas de tratamiento de aguas residuales y valores teóricos de eficiencia y costos.

Sistemas de tratamiento de aguas residuales	DBO (%)	SS (%)	N Total (%)	P Total (%)	Costos de implantación Gs/hab	Costos de operación y mantenimiento Gs/hab.año
Fosa séptica	30-35	55-65	< 30	< 35	40.000-50.000	3.000-5000
Lagunas de estabilización LA+LF+LM	80-85	73-83	50-65	> 50	80.000-160.000	4.000-8.000
Escurrimiento Superficial en el suelo	80-90	80-93	< 65	< 35	64.000-128.000	3.200-6.400
Wetlands construidos	80-90	87-93	< 60	< 35	80.000-128.000	4.000-6400
Fosa séptica + Filtro anaeróbico	80-85	80-90	< 60	< 35	128.000-208.000	9.600-16.000
Lodo Activados convencionales	85-93	87-93	< 60	< 35	112.000-176.000	11.200-19.200

Fuente: Adaptado de Von Sperling (2005).

Cada sistema tiene ventajas y desventajas en relación a la eficiencia que puede alcanzar y también a aspectos relacionados a los costos de operación y mantenimiento, por eso es importante evaluar cuál es el más conveniente de acuerdo a la disponibilidad de recursos.

<sup>4</sup> Pequeñas comunidades son conjuntos de entre 5.000 a 10.000 habitantes.

## 2.5 Wetlands para tratamiento de aguas residuales

Una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales son los wetlands que pueden ser naturales o artificiales. Ambos poseen las mismas características pero la diferencia radica en que los wetlands artificiales son dimensionadas de modo a mejorar y aumentar la eficiencia del tratamiento.

Según Mitsch (1993), los wetlands naturales son áreas inundadas (esterales) que están compuestas por un ecosistema natural cubierta por agua de poca profundidad que ofrece buenas condiciones para el crecimiento de macrofitas acuáticas. Los wetlands naturales también son utilizados para tratamiento de aguas residuales por ser muy simples y fáciles de proyectarlos con relación a los wetlands construidos. En los wetlands naturales los parámetros de proyecto más importante son el caudal y la carga contaminante de esta puede soportar sin que lo afecte negativamente. Desde el punto de vista de sus componentes funcionan de la misma forma que los wetlands construidos con sistema de entrada del afluente, área sumergida del wetlands, vegetación natural, y sistema de salida del efluente tratado (Toniato, 2005).

La desventaja en los wetlands naturales es que no se puede controlar el flujo de efluente que entra al humedal y esto puede provocar una reducción en la eficiencia de remoción de los contaminantes con la variación del caudal afluente. Esto ocurre debido a que el agua recorre caminos preferenciales disminuyendo el tiempo de retención hidráulica que el agua debe permanecer para que pueda realizar la descontaminación del mismo.

Una alternativa para las wetlands naturales en el tratamiento de aguas residuales fue desarrollada en Alemania en la década de 1970, las llamadas wetlands construidas o humedales artificiales, cuyo funcionamiento es similar a otros procesos de tratamiento porque en ella también ocurren los mismos procesos físicos y biológicos. Del punto de vista constructivo tiene semejanza con los filtros de arena, solo que para este caso se incorpora un elemento llamado eco-tecnología, añadiendo plantas que se encargan de la descontaminación de las aguas residuales.

La idea de buscar tecnologías económicas y de fácil operación para la descontaminación de las aguas residuales en comunidades pequeñas y alejadas viene a que la población es de baja renta, tienen déficit de personal capacitado para la operación y mantenimiento, como para la construcción de plantas de tratamiento convencionales (Van Kaick, 2002). El objetivo principal de los wetlands construidos es de mejorar la calidad del agua residual antes de ser lanzado al medio ambiente como sistema alternativo de tratamiento secundario o terciario removiendo contaminantes como nutrientes, materia orgánica, DBO y DQO, etc. (Salati, 2011).

En esa tecnología, se recomienda que las aguas residuales pasen primeramente por un tratamiento preliminar (retención de sólidos groseros, caja de arena, etc.) como una fosa séptica que ayuda a bajar la carga afluyente al wetlands construido y evitar que se tranquen sólidos en las tuberías (Van Kaick, 2002). Los wetlands artificiales son proyectados bajo criterios de ingeniería y las técnicas para su construcción varían de acuerdo a los niveles de eficiencia que se necesiten, área disponible para su construcción, recursos financieros e interés paisajístico (Salati, 2009; Sezerino, 2006).

## **2.6 Utilización de wetlands construidas (humedales artificiales) para tratamiento de efluentes domiciliarios**

Los wetlands construidos o humedales artificiales son construidos de forma controlada para producir mecanismos de eliminación de contaminantes presentes en las agua residuales que se producen en los hogares. Su importancia radica en que son sistemas considerablemente más económicos que los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales (IMTA<sup>5</sup>, 2015).

En los procesos de depuración se utilizan plantas acuáticas que se encargan de realización de los procesos naturales que son de tipo microbiológico, biológico, físico y químico. Estos procesos implican la asimilación y adsorción de ciertos componentes del agua residual por parte de estas plantas, la degradación biológica de la materia orgánica y nutrientes por las bacterias, plantas y partículas de detritos presentes en el medio acuático, la sedimentación-descomposición de sólidos, y por último la filtración de los sólidos a través del suelo de los humedales (Curt, 2005; Orozco et al. 2008).

El tratamiento de aguas residuales por wetlands construidos se basan en los principios de un sistema natural porque en ella ocurre los mismos procesos naturales, con la diferencia que es una intervención del hombre para crear las mejores condiciones y para acelerar en proceso de depuración, a pesar de ello se lo sigue catalogando como sistemas naturales de tratamiento (Romero et al. 2009).

---

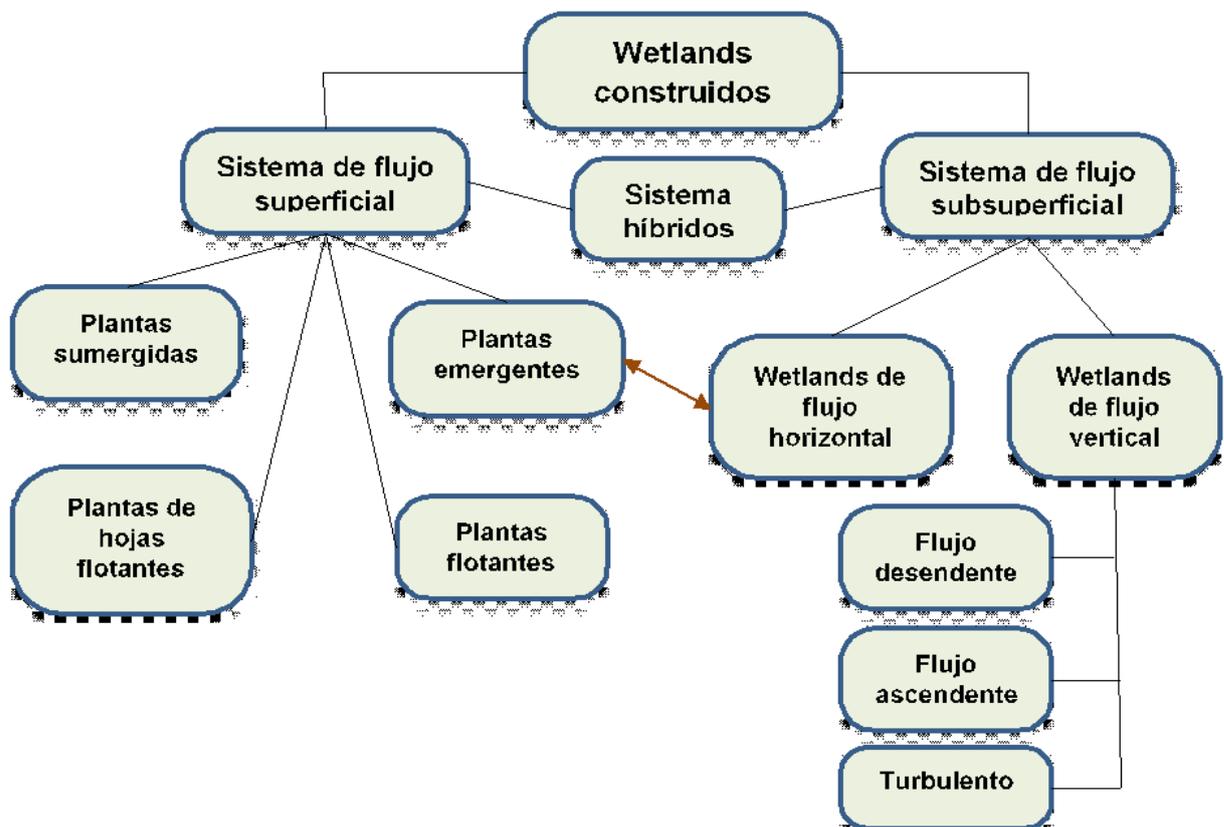
<sup>5</sup> IMTA: Instituto Mexicano de tecnología ambiental.

## 2.7 Clasificación de Wetlands construidos

Existen dos tipos de sistemas de humedales artificiales desarrollados para tratamiento de aguas residuales: sistema de flujo libre (SFL) o superficial y sistemas de flujo subsuperficial (SFS) (Figura 1). En los casos en que se emplean para proporcionar tratamiento secundario o avanzado, los SFL suelen consistir en balsas o canales paralelos con la superficie del agua expuesta a la atmosfera y el fondo constituido por suelo relativamente impermeable o con una barrera subsuperficial, vegetación emergente, y niveles de agua poco profundos entre 0,1 a 0,6 m de profundidad (IMTA, 2015).

Los humedales también pueden ser clasificados por el tipo de macrofitas en crecimiento. Por otra parte también pueden ser combinados entre sí los diferentes tipos de wetlands construidos formando un sistema híbrido con el fin de sacar la mayor ventaja de cada sistema. Para aplicaciones urbanas y rurales el sistema de flujo subsuperficial (SFS) es el más apropiado y utilizado debido a su mayor eficiencia en el tratamiento de aguas residuales y por necesitar menor área de implementación (IMTA, 2015).

Figura 1. Clasificación de wetlands construidos

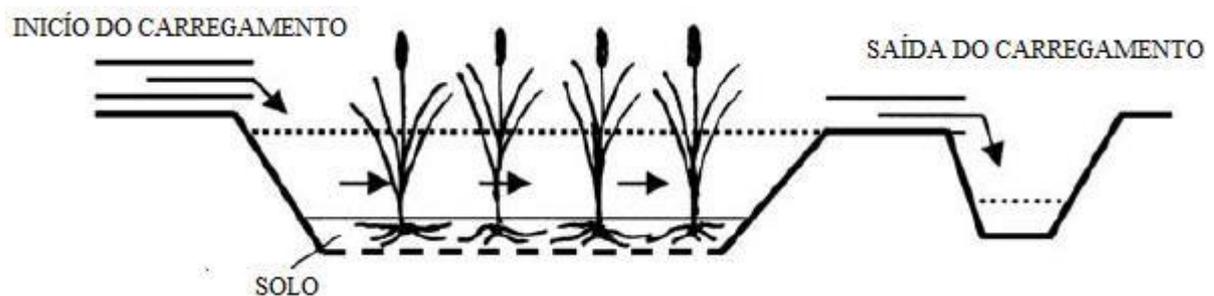


Fuente: Adaptado de IMTA (2015)

### 2.7.1 Sistema de flujo libre o superficial

Los sistemas de flujo superficial (Figura 2) son aquellos donde el agua residual circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y están expuestas directamente a la atmósfera. Este tipo de wetlands es una modificación de las lagunas convencionales de estabilización, implementando plantas para ayudar a la depuración y caracterizados por la baja profundidad de no más de 0,6 m.

Figura 2. Sistema de wetlands construido de flujo superficial



Fuente: Análisis de los modelos de diseños de los sistemas naturales de depuración. Fuente: Blázquez (2016).

Uno de los potenciales problemas de estos sistemas son los vectores (moscas y mosquitos) y olores que se pueden llegar a generar debido a que el agua está en contacto directo con la atmósfera, recomendándose su implementación para tratamiento de descontaminación final como tratamiento secundario o terciario. En términos de paisajismo es muy recomendable debido a su capacidad de albergar distintas especies de peces, aves, anfibios, etc. Pueden construirse en lugares turísticos como también en lugares de estudios científicos de diferentes disciplinas por las complejas interacciones biológicas (IMTA, 2015).

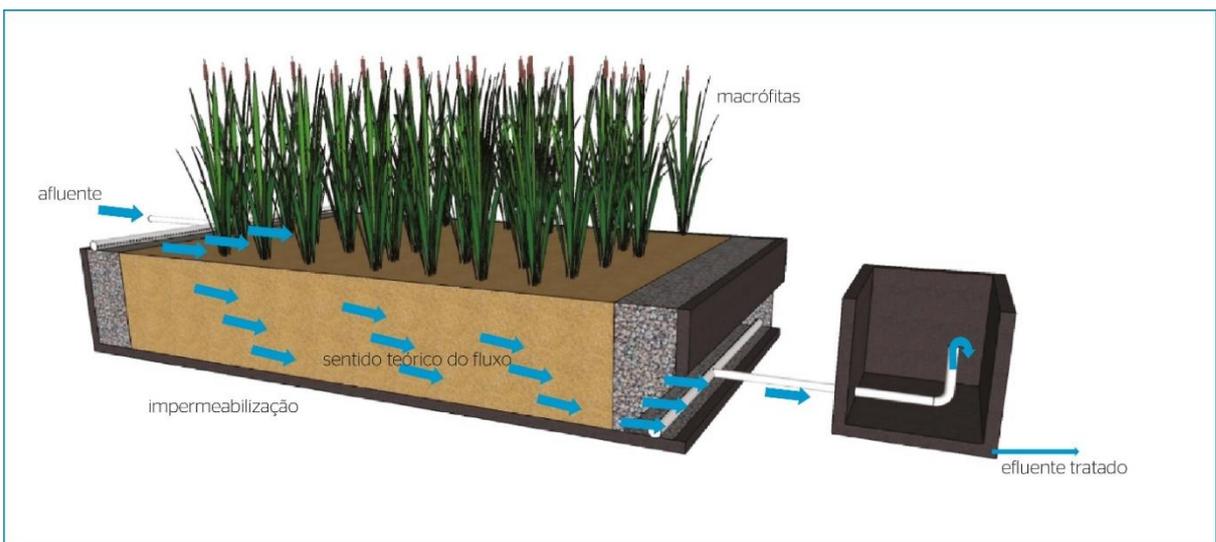
### 2.7.2 Sistema de flujo subsuperficial

En estos sistemas la diferencia radica en que el flujo de agua está por debajo de la superficie del terreno a través de una capa de arena y grava que actúan también como un filtro y soporte para los rizomas y raíces de las plantas que penetran hasta el fondo de la capa granular para absorber los contaminantes del agua. La profundidad oscila entre 0,6 a 1,5 m dependiendo del caudal y la eficiencia que se quiere alcanzar. Este sistema es recomendado para tratamientos primario de aguas residuales debido a que la circulación del agua se produce

sin contacto con la atmósfera evitando que se generen vectores o malos olores (IMTA, 2015). Los wetlands de flujo subsuperficial pueden ser de dos formas en función de la forma de aplicación del agua al sistema: wetlands de flujo subsuperficial horizontal o wetlands de flujo subsuperficial vertical.

Los wetlands de flujo subsuperficial horizontal (Figura 3) son los sistemas más utilizados en Europa. Su diseño por lo general consiste en una camada de tierra, arena y grava plantada sobre ella macrofitas acuáticas en su mayoría caña común o carrizo (*Phragmites australis*). Bajo todas las camadas, es colocada una membrana impermeable para evitar filtraciones al suelo. El agua ingresa de forma permanente en la parte superior de uno de los extremos y es recogida por un tubo de drenaje localizada en la parte inferior opuesta a la entrada. El agua se trata a medida de que fluye lateralmente a través del medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho varía entre 0,30 a 1 m y con una pendiente de 0,5 a 1 %. En la recolección del efluente se utilizan tubos cribados rodeados con grava de igual tamaño que la utilizada en la entrada del afluyente con diámetro de 50 a 100 mm de granulometría. En las áreas donde se encuentran las plantas se utilizan una grava más fina entorno de 3 a 32 mm de granulometría. Es fundamental que el nivel de agua residual que ingresa al wetlands mantenga un nivel inferior a la superficie de 5 a 10 cm por lo menos, esto se logra regulando el nivel de la tubería de salida (Kolb, 1998; IMTA, 2015).

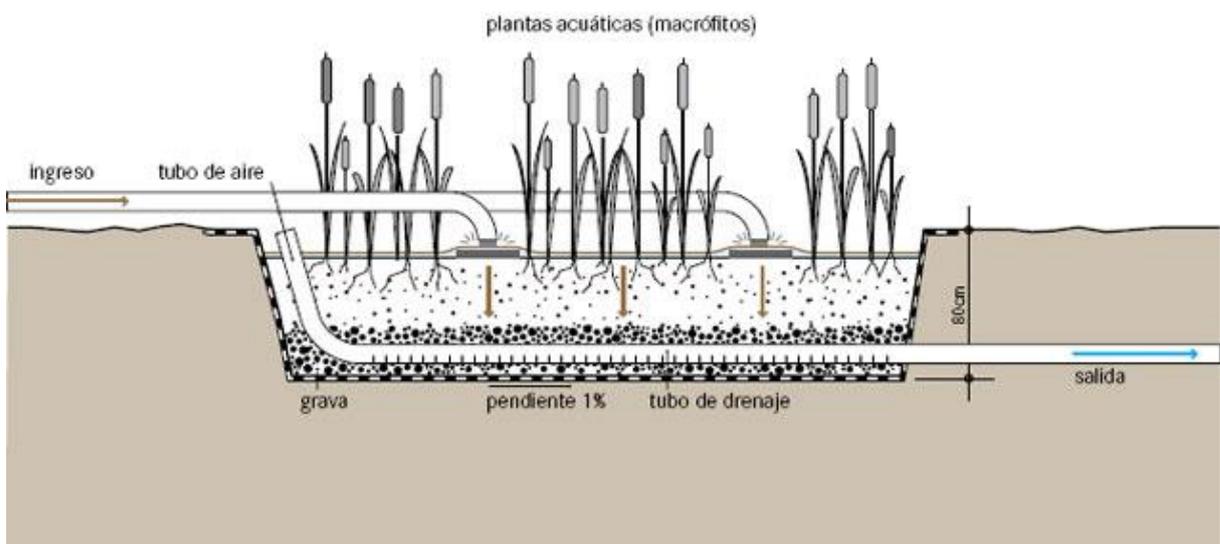
Figura 3. Sistema de wetlands construido de flujo subsuperficial horizontal



Fuente: Pelissari. 2013

Los sistemas de flujo subsuperficial verticales (Figura 4) son cargados con las aguas residuales de forma intermitente, también conocidos como filtros intermitentes. Con esto se controla la saturación del medio filtrante con periodos de instauración, estimulando el suministro de oxígeno al agua tratada. Este tipo de wetlands recibe las aguas residuales a ser tratada de arriba hacia abajo a través de un sistema de tuberías que distribuyen el agua de forma uniforme en toda la superficie del humedal. Las aguas residuales infiltran a través del sustrato inerte generalmente arena y grava y se recoge a través de tuberías que se encuentran el fondo del humedal. La vegetación emergente se localizan en la parte superior (medio granular) promoviendo y estimulando al máximo las condiciones aerobias.

Figura 4. Esquema de sistema de wetlands construido de flujo subsuperficial vertical



Fuente: <http://alianzaporelagua.org>

## 2.8 Componentes y factores que influyen en el desempeño de los Wetlands de flujo subsuperficial

Los wetlands construidos de flujo subsuperficial son sistemas ecológicos que combinan procesos físicos, químicos y biológicos en un sistema proyectado y gestionado, por lo tanto se necesita de conocimientos básicos para comprensión de sus componentes. Están constituidos básicamente por cuatro partes: el agua residual (cloaca domiciliaria), el sustrato (materias

filtrante arena y grava), vegetación (macrofitas acuáticas), y microorganismos (Barros Barreto, 2016).

- **Aguas residuales:** son las aguas residuales que ingresan a los wetlands y pueden ser provenientes del uso doméstico, industrial o mezcla, como también de drenajes de aguas pluviales (Barros Barreto, 2016).

- **Sustrato (medio granular):** en los humedales artificiales está formado por el suelo como arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación. Su principal característica debe ser la permeabilidad para dejar pasar el agua a través de él, obligatoriamente se debe utilizar gravas con 5 mm de granulometría y pocos finos. El sustrato es el responsable directo de la remoción de sustancias contaminantes de las aguas residuales mediante la interacción de procesos físicos y químicos. Por otra parte el sustrato influye también en el tiempo de retención hidráulica del efluente a ser tratado. Cuanto menor la granulometría del sustrato, mayor el tiempo de permanencia en el sistema por ende mejor eficiencia, mientras que cuanto mayor es la granulometría menor el tiempo de permanencia por ende, menor eficiencia. Finalmente la función del medio granular es muy importante debido a que actúa en la eliminación de contaminantes y como de soporte para las plantas y colonias de microorganismos que llevan a cabo la actividad biodegradadora (Barros Barreto, 2016).

- **Vegetación:** el papel fundamental de las plantas en los humedales está en las raíces y rizomas enterrados donde las plantas, al ser organismos foto autótrofos, tienen la capacidad de recoger la energía solar y transformar el carbono inorgánico del sustrato en carbono orgánico. Las macrofitas acuáticas tienen la capacidad de transferir el oxígeno recogido de la atmósfera a través de las hojas, tallos y finalmente llegando a las raíces, de ahí se crean regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para la degradación de la materia orgánica y nutrientes (Arias, 2004).

- **Microorganismos:** la función principal de los microorganismos es realizar el tratamiento biológico. Estos microorganismos son colonias aerobias y se encuentran en la parte superior del humedal donde las raíces liberan el oxígeno de la atmósfera. También existen microorganismos anaerobios que se encuentran en las zonas más bajas del humedal que también se encargan de la degradación de la materia orgánica y nutriente. Los principales microorganismos presentes en la biopelícula o rizosfera de los humedales son: bacterias, levaduras, hongos y protozoarios (Arias, 2004).

## 2.9 Mecanismos de remoción de contaminantes de los wetlands construidos

En los wetlands construidos se desarrollan diferentes mecanismos de remoción de contaminantes de las aguas residuales (Cuadro 4), entre ellos existen procesos biológicos, químicos y físicos que tienen influencias e interacciones bastante complejas (Delgadillo et al., 2010).

Cuadro 4. Mecanismos de remoción de contaminantes en sistemas de tratamiento basados en macrofitas acuáticas

Parámetro evaluado	Mecanismos de remoción
<b>Sólidos suspendidos (SS)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sedimentación/ filtración</li> </ul>
<b>DBO<sub>5,20</sub></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradación microbiana (anaeróbica y aeróbica)</li> <li>• Sedimentación (acumulación de material orgánico/ lodo en la superficie del sedimento)</li> </ul>
<b>Nitrógeno amoniacal</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amonificación seguida de nitrificación y desnitrificación</li> <li>• Captación por la planta</li> </ul>
<b>Patógenos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sedimentación/ filtración</li> <li>• Declinación</li> <li>• Radiación ultravioleta</li> <li>• Excreción de antibióticos por las raíces de las macrófitas</li> </ul>

Fuente: IMTA (2015).

## 2.10 Ventajas y desventajas en la utilización de wetlands construidos para tratamiento de aguas residuales

Cuadro 5. Ventajas y desventajas en la utilización de wetlands construidos

(Continúa)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>· Logran el tratamiento de efluentes sin modificar prácticamente el estado natural donde se encuentran instalados.</li> <li>· Necesitan muy poca energía para su funcionamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Requieren grandes extensiones de tierra para su instalación y funcionamiento.</li> <li>· Son sensibles a cambios de clima pudiendo ser afectada la eficiencia del sistema de tratamiento, en especial en invierno.</li> </ul>

(Continuación)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>· Son una alternativa de bajo costo.</li> <li>· Son de bajo costo de operación y mantenimiento.</li> <li>· Fácil mantenimiento no requieren de personal especializado para su operación.</li> <li>· Sirven de hábitat para numerosas especies de animales y plantas.</li> <li>· Aumenta la posibilidad de reutilización del agua para otros usos.</li> <li>· Su operación genera muy pocos residuos en comparación con otros sistemas de tratamientos biológicos.</li> <li>· Son muy aplicables para tratar aguas residuales de casas aisladas, áreas rurales, hoteles, urbanizaciones pequeñas.</li> <li>· Producen casi nada de malos olores debido a que las raíces funcionan como filtros.</li> <li>· Alta producción de biomasa que puede ser utilizada como alimento para animales, reaprovechamiento energético, y bio-fertilizante.</li> <li>· Reduce considerablemente patógenos sin utilización de productos químicos.</li> <li>· Remueve satisfactoriamente materia orgánica, sólidos suspendidos y nutrientes como nitrógeno y fósforo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Necesitan estar siempre en funcionamiento no pueden estar secos debido a las plantas acuáticas.</li> <li>· En caso de tener en las aguas residuales con metales pesados y sustancias toxicas como el amonio y los pesticidas, las plantas lo absorberían teniendo una operación adicional de disposición final lo que representaría un obstáculo para su implementación.</li> <li>· No pueden ser utilizados directamente con aguas residuales de altas cargas orgánicas, sólidos suspendidos, requieren de sistemas de pre-tratamiento como fosas sépticas o decantadores.</li> <li>· Pueden causar problemas de vectores.</li> <li>· Requiere un periodo para su buen funcionamiento hasta que las plantas estén bien establecidas.</li> <li>· Eficiencias variables de acuerdo a las estaciones del año.</li> </ul>

(Conclusión). Fuente: Manual de implementación de humedales para tratamiento. CONACYT. (Barros Barreto. 2016).

Es importante evaluar las ventajas y desventajas con el fin de visualizar si es viable su puesta en marcha y si se cuenta con los recursos para su implementación.

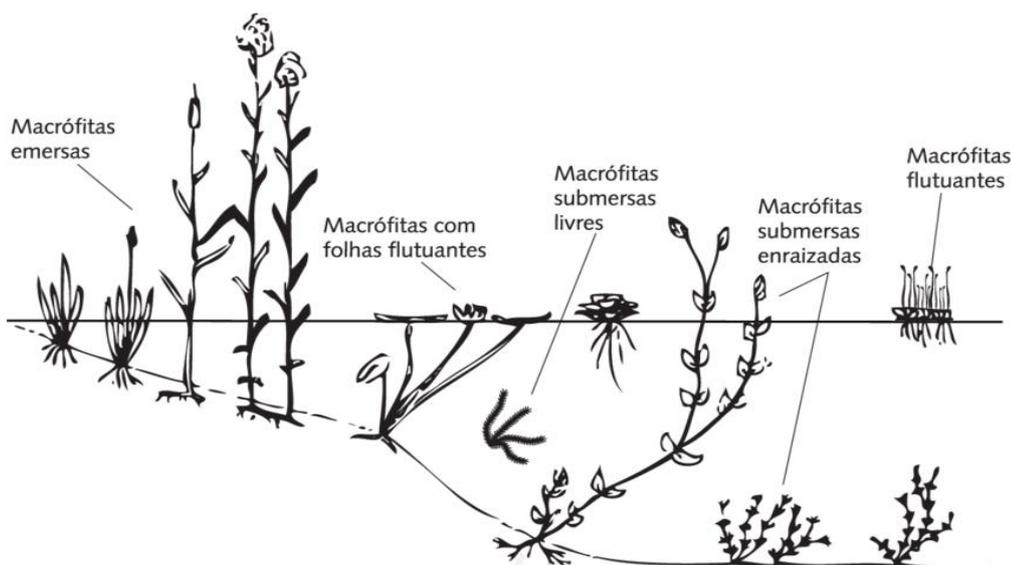
Como podemos ver en la tabla las ventajas son mayores que las desventajas para su implementación en el ámbito de las pequeñas comunidades. Estas desventajas no inviabilizan su utilización o pueden ser mitigadas de alguna forma para mantener una buena eficiencia de funcionamiento.

### 2.11 Evaluación de las macrófitas acuáticas que mejor se adapten al medio ambiente y proporcionen mejores resultados en la remoción de contaminantes

Las macrófitas acuáticas son vegetales visibles a simple vista que flotan o permanecen total o parcialmente sumergidas en ambientes de aguas dulce o salobre. Las plantas desempeñan un importante papel en el tratamiento en las wetlands construidas. Entre las principales atribuciones se destacan: promueven área superficial para la adherencia de los microorganismos en las raíces, liberación de oxígeno para el material filtrante, prevención en la colmatación del material filtrante, embellecimiento paisajístico, y extracción de nutrientes (Benassi et al., 2018).

Las macrófitas acuáticas pueden ser clasificadas en tres principales grupos: emergentes, libres fluctuantes, sumergidas (Figura 5).

Figura 5. Principales grupos de macrófitas acuáticas



Fuente: IMTA (2015)

- Macrofitas acuáticas emergentes: enraizadas y hojas fuera del agua entre ellas (caña de agua, enea, junco y papiro brasileño).
- Macrofitas acuáticas fluctuantes: Fluctúan sobre la superficie del cuerpo hídrico (aguapé, lechuga de agua y helecho acuático).
- Macrofitas acuáticas sumergidas: enraizadas y con las hojas sumergidas (Elódea, Cabomba); macrofitas libres fluctúan o están presas a otras plantas acuáticas o tallos (utricularia).

Las especies más utilizadas en el tratamiento de efluentes son del genero *Phragmites australis* (caña de agua); *Typha* spp. (taboa); *Eleocharis* spp. *Phragmites australis* (Junco); *Cyperus papyrus* spp. (papiro brasileño); *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua, aguapè, baronesa, reina de los lagos); etc.

Cabe destacar que para escoger la especie adecuada de macrófitas acuáticas, es necesario considerar algunos factores como:

- Principales contaminantes que se desea extraer del agua residual.
- Tipo de wetlands construida a ser utilizada.
- Condiciones climáticas de la región y la adaptabilidad de la especie acuática.
- Disponibilidad de plantas en la zona de instalación del wetlands.
- Características físico-químicas del efluente a ser tratado.

Para los sistemas de flujo subsuperficial se recomienda que sean plantados inicialmente de 10 a 20 individuos por m<sup>2</sup> distribuidos a lo largo de todo el lecho de arena de las wetlands. Mientras que la los de flujo superficial se recomienda que las macrófitas ocupen apenas el 50 % del área superficial del lecho del wetlands construido. Es importante decir que las macrófitas acuáticas demandan mantenimiento como podas, extracción de yuyos dañinos y hojas desprendidas ajenas a las macrófitas, a fin de garantizar la eficiencia del sistema y evitar la devolución de nutrientes y materia orgánica al agua en tratamiento (Benassi et al., 2018).

## **2.12 Evaluación de utilización de la biomasa generada en las wetlands**

Una de las opciones de utilización de la biomasa producida en los wetlands es el compostaje de las macrófitas acuáticas. Este compostaje tiene gran valor para recuperación de suelos degradados por otra parte existe poca información acerca de las características químicas de los vegetales y de la seguridad ambiental que se necesita para el manejo y descarte de este subproducto.

Los materiales vegetales tienen la capacidad de almacenar buena cantidad de nutrientes, y estos nutrientes son liberados al medio por medio de la descomposición de la biomasa. Esta descomposición es controlado por la actividad microbiana de oxidación y la oxidación de la masa heterogénea de la materia orgánica en su estado sólido y húmedo, pasando por las siguientes fases: Fito toxicidad, bio-estabilización y humidificación.

De esta descomposición del material vegetal se pueden extraer o recuperar compuestos como: sales minerales, que contienen nutrientes para las raíces de las plantas, y humus, que es un buen acondicionador y mejorador de las condiciones físicas, físico-químicas y biológicas del suelo. Con esto se busca disminuir la cantidad de residuos sólidos generados en los wetlands, la producción de un producto estable además de la recuperación de residuos orgánicos que tienen un valor intrínseco y que no se puede perder.

Para la aplicación del abono orgánico en suelos agrícolas, se recomienda que el compostaje este bien estabilizado y curado porque presenta características de Fito-toxicidad, o sea que el compuesto tenga un pH por encima de 6,5 y relación C/N debajo de 18. En relación al tiempo que llevar la completa maduración o estabilización del compuesto orgánico no debe ser menor a 8 semanas, lo recomendable sería de 90 a 120 días para asegurar (Benassi et al, 2018).

En la práctica cotidiana, otra forma de aprovechar básicamente la totora (Junco) es como fibra de amarre para los cultivos de vid y tomate. También tiene otros usos o aplicaciones: algunos señalan su uso como forraje para alimentación animal pero esta práctica no es recomendable debido a la falta de información si es acta o no para tal fin, también como material para la construcción de sombras, techos y trenzados para amarrar. Otros usos más elaborados de la totora es la fabricación artesanal de sombreros, roperos, esteras y canastas. El conocimiento necesario sobre el uso de la totora comprende las fases de ubicación del totoral, la cosecha, el secado, la preparación de mazos, el almacenado, remojo, rallado y amarre. Por lo tanto su utilización es masiva por ser una materia prima abundante, de bajo costo y fácil de trabajar (Campos. O. 2018).

## **CAPÍTULO 3 – MÉTODOS**

### **3.1 Metodología de estudio**

La metodología adoptada en el desarrollo del proyecto se trata de una investigación bibliográfica de estudios realizados por investigadores encontrados en libros, tesis, manuales, revistas, monografías, etc. El estudio fue realizado por medio de las siguientes etapas:

1. Levantamiento bibliográfico preliminar para dilucidar los conceptos y aplicaciones de los wetlands construidos, lectura profunda de los materiales, organización de los temas para la realización de la revisión bibliográfica.
2. Análisis crítica sobre la implementación de wetlands construidos a través de informaciones de artículos científicos y especialistas que ya trabajaron con este tipo de ecotecnología.
3. Análisis y propuesta de viabilidad técnica operacional, económica y ambiental de implantación de wetlands construidos en áreas rurales.
4. Dimensionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales que atienda conjuntos de comunidades descentralizadas de 10 a 50 habitantes de la ciudad de Loma Plata (Chaco).

### **3.2 Descripción del área de estudio (Ciudad de Loma Plata)**

El área de estudio (Figura 6) se encuentra localizada en el departamento de Boquerón en la región occidental del Paraguay (chaco Paraguayo), a unos 450 km de la capital y está formada por una de las colonias menonitas más grandes en la región. La ciudad se encuentra a 133 metros sobre nivel del mar (msnm) y posee un área superficial de 1.787 km<sup>2</sup>. La población es de 16.460 habitantes censados en el último censo realizado por la Dirección General de Estadística Encuesta y Censo (DGEEC, 2017).

Es la primera colonia de inmigrantes menonitas de la región fundada en el año de 1927, y está constituida por 101 aldeas que conforman la colonia distribuidas en toda su extensión, y con distintas cantidades de habitantes en cada aldea.

La región cuenta con un clima bastante oscilante y severo. En verano la temperatura ronda los 44°C y en invierno ronda los 0°C, mientras que la media ronda los 26°C. La región se caracteriza por periodos de sequías extensos y lluvias intensas en sus respectivas épocas (DGEEC, 2015).

Figura 6. Localización de la ciudad de Loma Plata



Fuente Google Maps (2018).

En cuanto a salud, la municipalidad cuenta con uno de los 4 hospitales en todo el departamento de Boquerón con el que se atiende a todos los pobladores de la región. Por otra parte en cuanto a su economía, los pobladores se dedican a la agricultura, ganadería e industria que están organizadas en sociedad de cooperativas colonizadoras. Cuenta con una importante industria de lácteos haciendo que la población permanezca cerca de la fábrica ubicada en el centro de la ciudad, cuya población es alrededor de 5000 personas (DGEEC, 2015). En cuanto a la agricultura, los rubros producidos son: algodón, maní, sésamo, tomate, locote, mamón, también experimentan con pasturas y forrajes tolerables al suelo, clima y factores que favorezcan la producción para engorde de ganado. Los pobladores también trabajan con plantas ornamentales, frutales y árboles nativos para la reforestación del chaco. El presupuesto anual de la ciudad en el 2016 es de 3.701.000.000 Gs. (673.000 US\$ aprox.) según el (Ministerio de Hacienda. (UDM). Enero a Diciembre. 2016. pág. 5); es muy reducido atendiendo a que es una ciudad rural que cuenta con apenas energía eléctrica y abastecimiento de agua, y recolección de residuos sólidos en la zona céntrica de la ciudad, mientras que no cuenta con alcantarillado

sanitario y escasos desagües pluviales. Los caminos en su mayoría son ripiados y de tierra y la ciudad posee muy poca declividad siendo plana en casi toda su extensión (Figura 7).

Figura 7. Vista aérea de la ciudad de Loma Plata



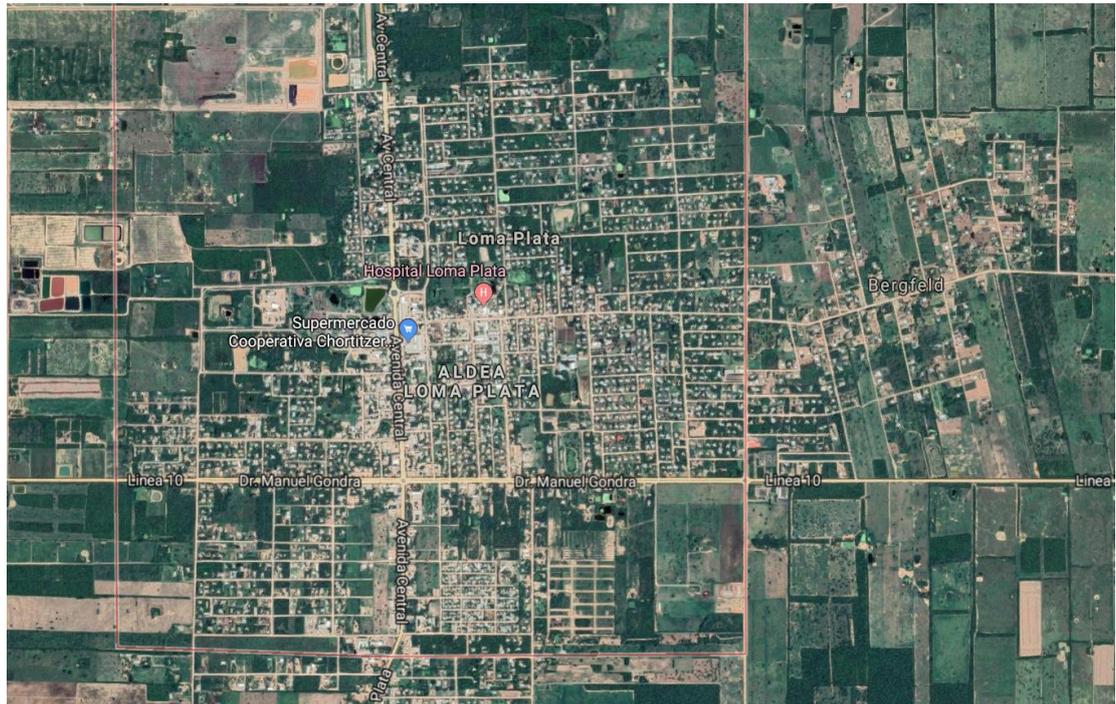
Fuente: Diario La Nación (2 de octubre de 2016)

Figura 8. Imagen los principales accesos a la ciudad y lotes prediales



Fuente: Propia del autor.

Figura 9. Imagen satelital del centro de la ciudad de Loma Plata.



Fuente: Adaptado de Google Maps.

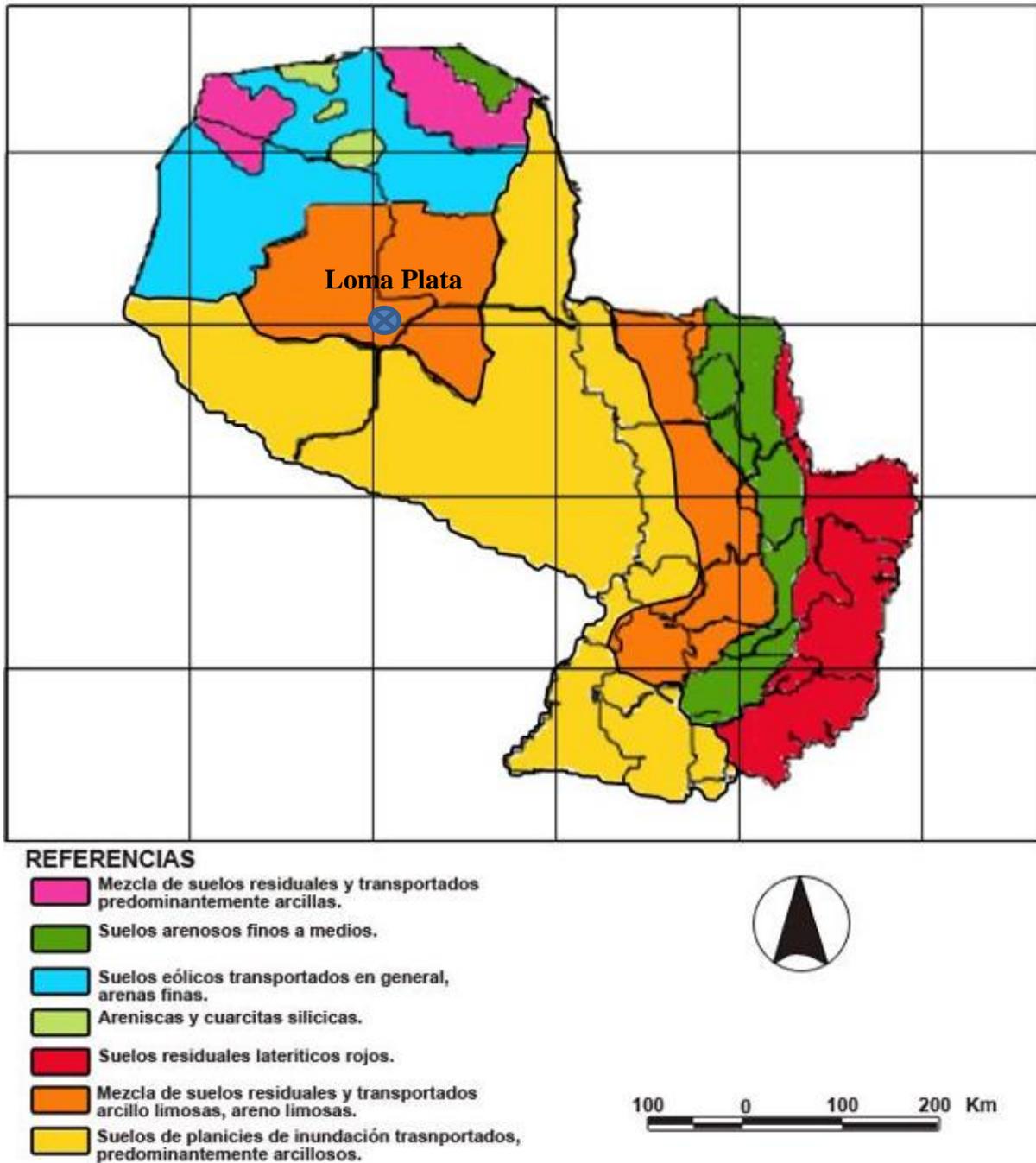
### 3.3 Características físicas del suelo chaqueño (Loma Plata)

Los conocimientos geológicos referentes al Chaco Paraguayo y sobre todo a la cobertura de sedimentos sueltos más recientes, son todavía muy escasos. Esto se explica por la infraestructura poco desarrollada y por la situación geológica en la que se encuentra, porque aproximadamente 80 a 90% de la superficie se compone de sedimentos finos cuaternarios y eventualmente terciarios, varias veces re depositados y encontrados generalmente cubiertos por vegetación más o menos densa (Servant y Fontes, 1978).

Los sedimentos del Tardiglacial/Holoceno inferior se encuentran en gran parte del Chaco. Estos son arcillas limosas y limo de origen fluvial que muestran huellas de paleocanales depositados en la fase de TAUCA (Servant y Fontes, 1978).

Como se ve en la (figura 10) los diferentes tipos de suelos del Paraguay la ciudad de Loma Plata se encuentra sobre una mezcla de suelos residuales y transportados arcillo limosas, areno limosas, haciendo de ella prácticamente un talco impermeable. Lo que favorece en la poca inversión para impermeabilizar sistemas de wetlands construidos.

Figura 10. Mapa de suelos del Paraguay



Fuente: Geología del Paraguay 2018

### 3.4 Precipitaciones (lluvias) de la ciudad de Loma Plata

En el chaco paraguayo se presentan tres zonas climáticas. Es importante entender esta variabilidad de las lluvias, ya que es la principal fuente de agua dulce de la región. La región donde se encuentra la ciudad de Loma Plata se caracteriza por ser semiárido, mega térmico,

según clasificación climática de Thornthwaite, basada en volúmenes de precipitaciones y evapotranspiraciones. La condición semiárida es un claro déficit de estaciones prolongadas de lluvias en la región. Por otro lado, la humedad relativa de la región semiárida esta entre 33-67%. La ciudad de Loma Plata se encuentra en los límites de la región con precipitaciones de 800 a 1000 mm por año (Figura 11). Estas precipitaciones generalmente ocurren todas un una temporada corta haciendo que sean largos los periodos de sequias.

Figura 11. Mapa de precipitaciones del Chaco Paraguayo



Fuente: Atlas geográfico del Paraguay 2009 (adaptado).

### 3.5 Sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Loma Plata

Debido al poco acceso de agua potable de buena calidad para los pobladores de la ciudad, fue proyectado un acueducto que conduce agua tratada de buenas condiciones desde el río Paraguay en la ciudad de Carmelo Peralta hasta la ciudad de Loma Plata, recorriendo una distancia de 202 km hasta el chaco central donde es almacenada en reservorios de 2.500 m<sup>3</sup>

(Figura 13). La planta de tratamiento de agua posee una capacidad de tratar 13.000 m<sup>3</sup>/día, destinada exclusivamente al consumo humano, no pudiendo ser utilizada para otros fines.

En la actualidad se retiene el agua de lluvia en aljibes enterrados en el suelo que son conducidos por los techos de las casas y canaletas para su posterior utilización como se ve en la (figura 12).

Figura 12. Actual sistema de abastecimiento de agua de las viviendas de la ciudad de Loma Plata (recolección de agua de lluvia en aljibes).



Fuente propia del autor.

Figura 13. En proyecto Acueducto y planta de tratamiento de agua potable para la ciudad de Loma Plata



Fuente: (MOPC, 2016; DGCP, 2016)

### 3.6 Evaluación y dimensionamiento de tratamiento preliminar

Los sistemas de wetlands comúnmente requieren un tratamiento preliminar de las aguas residuales, como forma de disminuir la carga contaminante y evitar problemas de taponamiento del sistema de tratamiento. Para este trabajo proyectaremos el volumen (Ecuación 1) de la fosa séptica mediante según la NBR 7229 (ABNT, 1993).

$$V = 1000 + N (C T + K L_f) \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

V = Volumen útil en litros (L)

N = Número de personas o unidades de contribución (unid.)

C = contribución retornada en forma de aguas residuales (L/persona x día)

T = Tiempo de detención (días)

K = Tasa de acumulación de lodo digerido, equivale al tiempo de acumulación del lodo (días)

L<sub>f</sub> = Contribución del lodo fresco (L/persona x día)

### 3.7 Elección del tipo de wetlands construida según su eficiencia

En relación a la remoción de contaminantes en los sistemas de wetlands construidos se han obtenidos buenos resultados en estudios diversos con diferentes tipos de sistemas (Benassi et al., 2018; Machado, 2017). En Brasil, por ejemplo, se hicieron estudios comparativos en relación con los porcentajes de reducción de nitrógeno, fósforo, demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) con las diferentes configuraciones en el tipo de flujo de los wetlands construidos (Cuadro 5).

Cuadro 6. Eficiencias medias obtenidas en sistemas de wetlands construidos

Continúa

Tipo de wetlands construido	Contaminante	Reducción media (%)
Wetlands construido de flujo superficial (WCFS)	Fósforo (P)	85,0
	Nitrógeno (N)	< 10,0
	Demanda biológica de oxígeno (DBO)	31,0
	Demanda química de oxígeno (BQO)	< 20,0

Continuación

Tipo de wetlands construido	Contaminante	Reducción media (%)
Wetlands construido de flujo horizontal (WCFH)	Fósforo (P)	51,5
	Nitrógeno (N)	30,0
	Demanda biológica de oxígeno (DBO)	81,5
	Demanda química de oxígeno (BQO)	76,5
Wetlands construido de flujo vertical (WCFV)	Fósforo (P)	60,0
	Nitrógeno (N)	45,0
	Demanda biológica de oxígeno (DBO)	59,0
	Demanda química de oxígeno (BQO)	63,5

Conclusión. Fuente: Benassi et al, (2018); Machado (2017).

Para este proyecto fue adoptado el wetlands construido de flujo horizontal debido a que presenta mejores eficiencias para el tipo de contaminantes que queremos remover del agua.

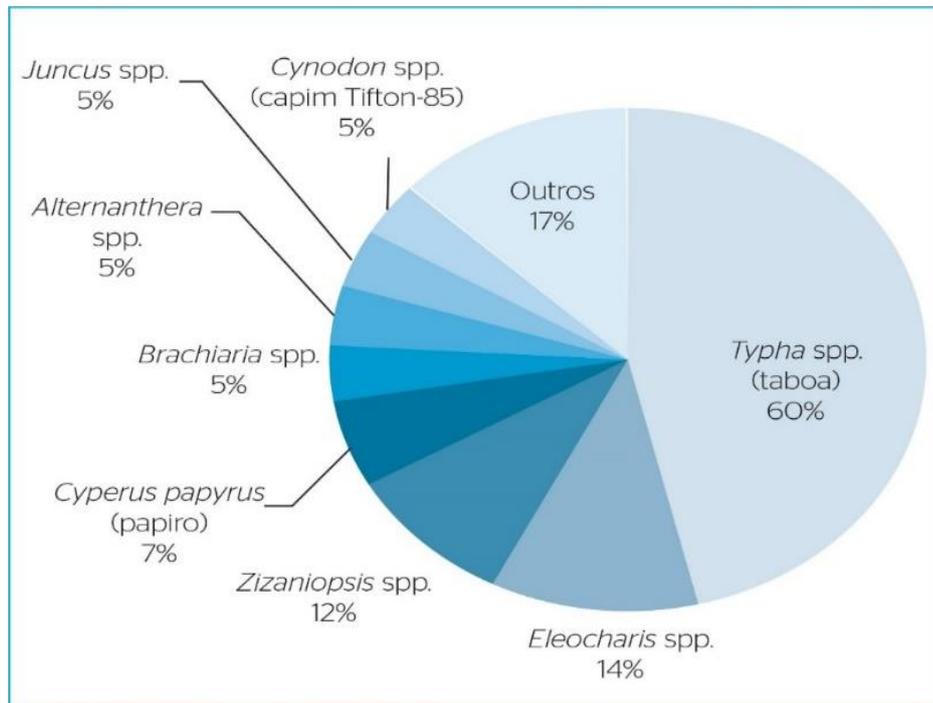
### 3.8 Elección del tipo de macrofitas a ser utilizada en los wetlands

Diversas macrófitas se emplean en el diseño de los wetlands construidos. Su elección está relacionada a la tolerancia de la planta en soportar ambientes saturados de aguas residuales, su potencial de crecimiento en presencia de estos contaminantes y el potencial de esas plantas de sobrevivir en las áreas donde el sistema de tratamiento será implantado, pues así las macrófitas estarán adaptadas a las condiciones climáticas locales.

La penetración de las raíces de las macrófitas en el material filtrante de los wetlands también es un parámetro de relevancia en su aplicación en el tratamiento de efluentes, pues esa movilidad promueve buenas condiciones para el proceso físico de filtración, aumenta el área disponible para la adherencia de microorganismos y aumenta la aeración de la rizosfera (BRIX, 1997).

Las especies más utilizadas en Brasil son los del genero *Phragmites australis* (cañizo de agua), *Typha spp.* (taboa), *Eleocharis spp.*; y *Juncos spp.* (junco), *cyperus papyrus spp.* (papiro brasileño), *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua, aguape, baronesa, reina de los lagos), *Pistia stratiotes* (lechuga de agua), etc. (Benassi 2018). Para este caso se adoptara la utilizada en el manual denominado “Utilización de humedales artificiales como sistema de biodepuración de efluentes domiciliarios en el área de influencia del lago Ypacarai” financiado por el CONACYT y proyectado por (Barros Barreto. 2016). Que es *Typha domingensis* (Figura 15).

Figura 14. Porcentaje de las macrofitas más utilizadas



Fuente Brix, (1997)

Figura 15. Macrófitas acuáticas *typha domingensis*



Fuente: propia del autor

### 3.9 Material soporte y filtrante

El material soporte o sustrato es también conocido como material filtrante, ya que su funcionamiento es de tipo doble, pues sirve de soporte para las raíces de las macrofitas como de filtro para la retención de sólidos de las aguas residuales. El material filtrante cumple un papel importante ya que en ella se llevan a cabo la mayoría de los procesos químicos y biológicos responsables de la mejoría en la calidad del agua tratada.

La elección del material soporte debe estar ligada a la finalidad del tratamiento, que eficiencia queremos alcanzar o cuales son los patrones de calidad que el agua debe alcanzar para poder ser lanzado al cuerpo hídrico. Este material está condicionado a su capacidad de mantener buenas condiciones de flujo a lo largo del tiempo, para promover la absorción de compuestos inorgánicos, como nitrógeno amoniacal y orto fosfatos.

En los wetlands construidos pueden ser utilizados diferentes tipos de materiales tales como: arenas, suelos naturales, piedras, grava, ascuas, conchas, neumáticos picados, fibra de coco, entre otros en diferentes granulometrías. A fin de garantizar la conductividad hidráulica y evitar que se colmate el material filtrante creando buenas condiciones de flujo estaremos alargando la vida útil del sistema. Por tanto fue utilizado las recomendaciones del manual de sistemas de wetlands construidos para el tratamiento de aguas residuales (Benassi. 2018) de los materiales más utilizados para los wetlands construidos que son: arena, piedra triturada y grava en diferentes granulometrías (Cuadro 7).

Cuadro 7. Granulometría de los principales materiales soportes para wetlands construidos

Material soporte	Granulometría (mm)
Arena	0,6 a 2
Piedra triturada tipo 1	9,5 a 19
Piedra triturada tipo 2	19 a 25
Grava	2 a 60

Fuente NBR 6502/1995; NBR 7211/2009 (ABNT, 1995; 2009)

Cabe destacar que la colocación del material filtrante es muy importante para evitar que ocurra taponamiento de las tuberías. Así se recomienda colocar materiales de mayor granulometría en las entradas y salidas de las aguas residuales como también cercanas a las tuberías.

### 3.10 Dimensionamiento de los wetlands construidos para la ciudad de Loma Plata

Para el dimensionamiento fue utilizado wetlands construidos de flujo horizontal por poseer mejor eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domiciliarias. Las características de las aguas residuales para el dimensionamiento se describen en el (Cuadro 8) que están en función de la concentración de cada contaminante, adoptaremos para el cálculo solo la demanda bioquímica de oxígeno (BDO<sub>5, 20</sub>) resaltado en el cuadro.

Cuadro 8. Composición típica del agua residual domestica bruta

Contaminantes	Unidades	Concentraciones		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales ST	mg/L	350	720	1200
Disueltos totales SDT	mg/L	250	500	850
Fijos	mg/L	145	300	525
Volátiles	mg/L	105	200	325
Sólidos en suspensión SS	mg/L	100	220	350
Fijos	mg/L	20	55	75
Volátiles	mg/L	80	165	275
Sólidos sedimentables	ml/L	5	10	20
<b>Demanda bioquímica de oxígeno DBO<sub>5,20</sub></b>	<b>mg/L</b>	<b>110</b>	<b>220</b>	<b>400</b>
Carbono orgánico total COT	mg/L	80	160	290
Demanda química de oxígeno DQO	mg/L	250	500	1000
Nitrógeno total en forma N	mg/L	20	40	85
Orgánico	mg/L	8	15	35
Amoníaco libre	mg/L	12	25	50
Nitritos y Nitratos	mg/L	0	0	0
Fosforo total en forma P	mg/L	4	8	15
Orgánico	mg/L	1	3	5
Inorgánico	mg/L	3	5	10
Cloruros	mg/L	30	50	100
Sulfato	mg/L	20	30	50
Alcalinidad como CaCO <sub>3</sub>	mg/L	50	100	200
Grasa	mg/L	50	100	150
Coliformes totales	Nº/100ml	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup>
Compuestos orgánicos volátiles	µg/L	<100	100-400	>400

Fuente: Metcalf-Eddy (1991)

### 3.11 Eficiencia deseada según padrón de lanzamiento

La eficiencia que se desea alcanzar es la que está en la Resolución N° 222/02 de la Secretaria del Medio Ambiente (SEAM, 2002). Según el Art. 7°, los efluentes de cualquier fuente poluidora solamente podrán ser lanzados, directa o indirectamente, en los cuerpos de las

aguas obedeciendo las siguientes condiciones y los criterios establecidos en la clasificación del cuerpo receptor (Cuadro 9).

- a) pH entre 5 a 9
- b) DBO<sub>5,20</sub> inferior a 50 mg/L
- c) DQO, inferior a 150 mg/L
- d) Temperatura, inferior a 40° C, siendo que elevación de temperatura del cuerpo receptor no deberá exceder a 3 °C
- e) Materias sedimentables, hasta 1 mg/L en test de 1 hora como Imhoff
- f) régimen de lanzamiento con caudal máximo de hasta 1,5 veces a razón media del periodo crítico
- g) Aceites y grasas
  - aceites minerales hasta 20 mg/L
  - aceites vegetales e grasas animal hasta 50 mg/L
- h) ausencia de materias flotantes
- i) valores máximos admisibles en las siguientes sustancias (mg/L)

Cuadro 9. Valores máximos admisibles de sustancias para lanzamiento

Sustancia	mg/L	Sustancia	mg/L
Amonio	5,0 N	Índice de Fenoles	0,5 C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH
Arsénico	0,5 As	Fierro Soluble	15 mg/l Fe
Bario	5,0 Ba	Manganeso soluble	1,0 Mn
Boro	5,0 Bo	Mercurio total	0,01 Hg
Cadmio	0,2 Cd	Níquel	2,0 Ni
Cianatos	0,2 CN	Plata	0,1 Ag
Plomo	0,5 Pb	Selenio	0,05 S
Cobre	1,0	Sulfatos	0,05 Se
Cromo Hexavalente	0,5 Cr	Zinc	5,0 Zn
Cromo Trivalente	2,0 Cr	Nitrógeno Total	40 N
Estaño	4,0 Sn	Fosforo total	4 P
Coliformes fecales	4000 NMP/100ml		

Fuente: SEAM (2002)

### 3.12 Dimensionamiento del sistema de tratamiento de efluentes por Wetlands construidos

El cálculo de la porosidad del lecho del wetlands construido se lleva a cabo en base a la porosidad del material soporte. Esta puede ser determinada de acuerdo con la Ecuación 2:

$$P = \frac{V_t - V_s}{V_t}$$

Ecuación (2)

Donde:

P = Porosidad del lecho del wetlands construido (%)

V<sub>t</sub> = Volumen útil total de lecho del wetlands construido (m<sup>3</sup>)

V<sub>s</sub> = Volumen de solidos presentes en el lecho del wetlands construido (m<sup>3</sup>)

El coeficiente de decaimiento ( $K_T$ ) representa el comportamiento de la remoción de contaminantes en función de la influencia causada por la temperatura y por el tiempo. De esta forma la constante  $K_T$  en temperatura T (°C) puede ser determinada por la Ecuación 3.

$$K_T = K_{20} (\theta)^{(T-20)} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

$K_{20}$  = Constante de decaimiento a 20 °C (d<sup>-1</sup>)

$\theta$  = Coeficiente de temperatura

T = Temperatura de la Wetlands construida (°C)

Los valores de la constante  $K_{20}$  y del coeficiente de temperatura  $\theta$  dependen del contaminante a ser removido. En el (Cuadro 10) están presentados los principales valores encontrados para  $K_{20}$  y  $\theta$  para wetlands construidos de flujo subsuperficial, que es el adoptado para el dimensionamiento.

Cuadro 10. Valores de constante de decaimiento y coeficiente de temperatura para sistema de WCFSS dependiendo del contaminante a ser removido

Tipo de WC	Contaminantes	Temperatura (°C)	Constante de decaimiento $K_{20}$ (d <sup>-1</sup> )	Coeficiente de temperatura ( $\theta$ )
WCFSS	DBO <sub>5,20</sub>	20	1,104	1,06
	Nitrógeno amoniacal (NH <sub>4</sub> )		0,2187	1,048
	Nitrato (NO <sub>3</sub> )		1,000	1,15

Fuente: Kadlec; Wallace (2008); Wang et al. (2010); Crites et al. (2014). (Adaptado).

La altura de la columna del fluido (nivel de agua residual) fue definida según la recomendación de la United States Environmental Protection Agency (USEPA) para operar sistemas de wetlands construidos que es de 0,5 m de altura.

Con los parámetros citados anteriormente es posible calcular el área superficial ( $A_s$ ) necesaria para la instalación de lecho del wetlands (Ecuación 4).

$$A_s = \frac{Q_{med} \times \ln(C_a/C_e)}{K_T \times h \times p} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

$A_s$  = Área superficial del lecho ( $m^2$ )

$Q_{med}$  = Caudal medio a través del lecho ( $m^3/d$ )

$C_a$  = Concentración del contaminante afluente – concentración de entrada (mg/L)

$C_e$  = Concentración del contaminante efluente – concentración de salida (mg/L)

$K_T$  = Coeficiente de decaimiento del contaminante ( $d^{-1}$ )

$h$  = Altura del nivel de agua residual (m)

$p$  = porosidad del lecho (%)

Una vez obtenido el área superficial ( $A_s$ ), podemos determinar las dimensiones (largo y ancho) del lecho. Se recomienda que el largo sea considerablemente mayor al ancho para asegurar que el flujo sea de tipo pistón.

Podemos calcular el tiempo de retención hidráulica (TDH) la cual expresa la razón entre las características del wetlands construidos y el caudal medio del efluente (Ecuación 5).

$$TDH = \frac{l \times c \times h \times p}{Q_{med}} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde:

TDH = Tiempo de retención hidráulica (d)

$l$  = Ancho del lecho del wetlands (m)

$c$  = Largo del lecho del wetlands (m)

$h$  = Altura del nivel del agua residual (m)

$p$  = Porosidad del lecho, en número decimal

$Q_{med}$  = Caudal medio a través del lecho ( $m^3/d$ )

El tiempo de retención hidráulica corresponde al tiempo que el agua residual permanece dentro del sistema de tratamiento, por lo tanto es un parámetro que influye directamente en la eficiencia del sistema. Los valores de TDH para wetlands construidas de flujo subsuperficial según (USEPA, 2000) varían entre 2 a 5 días de acuerdo con el objetivo de remoción. En

general sistema que buscan remover materia orgánica y sólidos requieren menor TDH, mientras que para remover nutrientes se necesita mayor TDH.

### **3.13 Estimativa preliminar de costos de construcción**

Para la estimativa de costo de construcción se adoptó como referencia los materiales utilizados en el piloto hecho por (Sabei, 2013) en la implementación de una estación de aguas residuales por zonas de raíces en la comunidad Colonia Mergulhão, Estado de Paraná, Brasil.

En esta estimativa de costo no se evaluara los costos relacionados a la operación y mantenimiento debido a que no se cuenta con mucha información o es necesario la implantación y funcionamiento para la obtención de costos más certeros.

Teniendo la lista de los materiales a utilizar para la construcción del wetlands artificial adaptamos los costos unitarios de estos a los costos actualizados a la fecha y a los precios de mercado en el Paraguay que es donde se desea llevar acabo la implementación del sistema de wetlands construidos. Fue utilizada la revista Paraguaya costos de la construcción la cual mensualmente mantiene actualizados los precios de mercado de los materiales utilizados en obras civiles.

A partir de ahí obtenemos el costo total para la construcción del wetlands artificial y podemos comparar y evaluar si es viable o no su implementación, y que costo representaría para la población atendida y en cuanto tiempo se podría recuperar el dinero invertido. La estimativa de costo de construcción para este caso será para atender a una población de 50 personas. Cabe destacar que los costos pueden variar dependiendo de la zona del país donde se implemente y también a medida que aumente la cantidad de personas atendidas aumentaría estructuralmente la obra por ende aumentaría también los costos.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1 Cálculo de contribución per cápita de agua residual

El caudal medio de agua utilizado para el cálculo de la fosa séptica (tratamiento preliminar) es el consumo de agua de 120 L/persona x día (Cuadro 11), multiplicado por un coeficiente de retorno de 0,8. Estos valores fueron adoptados teniendo en cuenta la zona rural, la población, condición socioeconómica, y obteniéndose un valor de 96 L/persona x día.

Cuadro 11. Clasificación de consumo per cápita de agua en predios

Tipo de predio	Unidad	Consumo (L/día)
Departamento	Persona	200
Residencia	Persona	150
Escuela Internado	Persona	150
Escuela No internado	Persona	50
Casa popular	Persona	120
Alojamiento temporario	Persona	80

Fuente NBR 7229 (1982), Dacach (1979).

### 4.2 Cálculo de dimensionamiento de la fosa séptica

Se tomara tres situaciones con diferentes cantidades de personas (10, 30 y 50 personas). Utilizando la ecuación (1) y los datos correspondientes se puede calcular el volumen de la fosa séptica según Cuadro 12.

Cuadro 12. Cálculo y valores adoptados para dimensionamiento de fosa séptica

Continúa

Datos	Valores adoptados	Valores adoptados	Valores adoptados	Unidades	Referencia
N	10	30	50	personas	Adoptado
C	96	96	96	L/persona x día	Calculado
T	0,5	0,5	0,5	día	Tabla 2 – NBR 7229/93
Lf	1	1	1	litro x persona	Tabla 1 – NBR 7229/93

Continuación

Datos	Valores adoptados	Valores adoptados	Valores adoptados	Unidades	Referencia
K	57	57	57	días	Tabla 3 – NBR 7229/93
Volúmenes	2050	4150	6250	litros	ABNT/NBR/7229/93
Relación Largo/ancho	2:1	2:1	2:1	-	ABNT/NBR/7229/93
Profundidad Útil	2,2	2,2	2,2	m	Tabla 4 – NBR 7229/93
Largo	1,37	1,94	2,38	m	Calculado
Ancho	0,68	0,97	1,19	m	Calculado

Conclusión. Fuente: ABNT (1993) y datos arbitrados por el autor.

La norma también establece las profundidades mínimas y máximas de acuerdo con el volumen. Para este caso según ABNT (1993), fueron adoptadas las profundidades útil máxima para cada caso de 2,2 m. Por otro lado se debe aumentar en cada caso la altura en 0,3 m para la cámara de gases. También fue adoptada la relación largo/ancho mínima según ABNT (1993) que es de 2:1 para cada caso.

Resumiendo los resultados para cada caso y adoptando medidas para su fácil construcción, llegamos que para atender a 10 personas se necesita 2 m<sup>3</sup> de volumen y una superficie de 1,5 x 0,7 m, para atender a 30 personas se necesita 4 m<sup>3</sup> de volumen y una superficie de 2 x 1 m, mientras que para atender a 50 personas se necesita 6 m<sup>3</sup> y una superficie de 2,5 x 1,2 m. Con esto concluimos que a mayor cantidad de personas atendidas aumenta significativamente el volumen a área necesaria para su implantación.

### 4.3 Calculo de dimensionamiento del wetlands construido

El dimensionamiento fue realizado para tratar aguas residuales de tres pequeños conjuntos habitacionales con diferentes cantidades de personas con el fin de poder comparar cada una con otra y optar la que mejor se adapte a las condiciones y recursos. El objetivo principal es remover materia orgánica con una eficiencia de 81,5 % de remoción de DBO<sub>5, 20</sub>, el cual podemos alcanzar con los wetlands construidos de flujo horizontal según (cuadro 6). Otro parámetro para el dimensionamiento fue la concentración del agua residual a ser tratada,

utilizando una concentración media de 220 mg/L de  $DBO_{5, 20}$  según (Cuadro 8). No fue considerada remoción de materia orgánica en la fosa séptica para el dimensionamiento del wetlands como factor de seguridad para alcanzar la eficiencia deseada en situaciones de oscilaciones de concentraciones máximas afluentes. Con la Ecuación (6) se pudo verificar la eficiencia necesaria para alcanzar el patrón de lanzamiento al cuerpo hídrico según la normativa de la SEAM Res. 222/02:

$$E = \frac{DBO_{afl} - DBO_{efl}}{DBO_{afl}} \times 100 \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$DBO_{efl} = 220 - (220 \times 81,5 / 100) = 40,7 \text{ mg/L}$$

La concentración de 40,70 mg/L atiende el patrón de lanzamiento de 50 mg/l según resolución (SEAM, Res. 222/02). Los parámetros de proyecto para los tres casos de (10/30/50 personas) definidos son presentados en el (Cuadro 13).

Cuadro 13. Resultados del dimensionamiento de wetlands construidos (WCFSSH)

Continúa

<b>Parámetros de Cálculo para dimensionamiento del Wetlands Construido</b>			
$Q_{med} = 96 \text{ L/per. Día}$	Caudal medio per cápita por día de aguas residuales que van a llegar al wetlands construido		
$p = 0,5 \text{ mm}$	Porosidad del lecho filtrante del wetlands construido obtenido experimentalmente por otros autores (adoptado)		
$T = 25 \text{ ° C}$	Temperatura de funcionamiento del sistema de wetlands construido (dato para dimensionamiento)		
	<b>Cálculos de dimensionamiento de wetlands construidas para diferentes cantidades de personas atendidas</b>		
	<b>Para 10 personas</b>	<b>Para 30 personas</b>	<b>Para 50 personas</b>
$Q_{proyecto} = \text{Caudal total de contribución de aguas residuales por cantidades de personas atendidas}$	0,96 [m <sup>3</sup> ]	2,88 [m <sup>3</sup> ]	4,8 [m <sup>3</sup> ]

## Continuación

p = Utilizando piedra triturada tipo 1 como material soporte se adopta la porosidad del medio soporte	0,5 [mm]	0,5 [mm]	0,5 [mm]
$k_T$ = Coeficiente de decaimiento del contaminante influenciada por la temperatura y el tiempo	1,48 [día <sup>-1</sup> ]	1,48 [día <sup>-1</sup> ]	1,48 [día <sup>-1</sup> ]
h = Altura de la columna del agua residual en el wetlands construido (nivel de agua residual) adoptado por la USEPA	0,5 [m]	0,5 [m]	0,5 [m]
As = Área superficial necesaria para la implantación del lecho del wetlands construido	4,39 [m <sup>2</sup> ]	13,16 [m <sup>2</sup> ]	21,93 [m <sup>2</sup> ]
Largo del wetlands construido = a partir del área superficial se calculó mediante la relación 2:1 (largo por ancho respectivamente)	4,39 [m]	6,3 [m]	8,1 [m]
Ancho del wetlands construido = a partir del área superficial se calculó mediante la relación 2:1 (largo por ancho respectivamente)	1 [m]	2,1 [m]	2,7 [m]
Tiempo de detención hidráulica TDH = expresa el tiempo que el agua residual permanece dentro del wetlands construido mediante la relación entre las características del wetlands y el caudal medio del efluente	1,14 [día]	1,15 [día]	1,14 [día]

Conclusión. Fuente: Elaboración Propia (autor).

Llevándose en consideración la necesidad de tratamiento de aguas residuales utilizamos las macrófitas acuáticas *Typha* ssp. Por tener alta tasa de incorporación de biomasa y resistencia a altas concentraciones según manual de sistemas de wetlands construidos para el tratamiento de aguas residuales (Benassi, 2018).

En fin se puede apreciar en el cuadro 12 que el área superficial necesaria para atender a 10 personas sería 4,39 m<sup>2</sup>, para 30 personas se necesitaría 13,16 m<sup>2</sup> y para 50 personas se necesitaría 21,93 m<sup>2</sup>. Con esto concluimos que cuanto mayor es el número de personas mayor es el área superficial necesaria, escogiendo así la que mejor opción que se adapte a la disponibilidad de recursos. Desde el punto de vista constructivo para el área superficial se adopta 4,5 x 1 m para 10 personas, 6,5 x 2 m para 30 personas y 8 x 3 m para 50 personas de largo x ancho respectivamente.

#### **4.4 Operación y mantenimiento de wetlands construidos**

Una vez dimensionado el wetlands construido es necesario llevar en consideración algunos aspectos durante su implementación para su buen funcionamiento.

##### **4.4.1 Aspectos importantes para su implementación**

- Preferentemente trasplantar las macrófitas que fueran retiradas próximas al local debido a estas están más adaptados a las condiciones climáticas.
- Preferentemente se realiza la muda de las macrófitas en épocas de lluvia a fin de minimizar condiciones de estrés hídrico de las plantas.
- No iniciar la operación alimentando el sistema directamente con agua residual, alimento gradualmente y con concentraciones diluidas.
- Plantar las macrófitas acuáticas en los wetlands construidos con 20 a 30 días de antecedencia al inicio de la operación para la adaptación biológica de las plantas al medio.
- De preferencia escoger especies jóvenes de plantas para obtener mejores eficiencias ya que es la etapa de mayor incorporación de contaminantes por estar en fase de crecimiento.
- Evitar combinaciones de especies de plantas en los wetlands debido a que estas tiendan a competir entre sí.
- Evitar utilización de sistemas de bombeo para transporte del afluente y efluente, de preferencia flujo por gravedad.

- Evitar en lo posible tuberías y válvulas de diámetro menos que los dimensionados ya que son pasibles de trancarse obstruyendo el flujo.
- Los wetlands deben instalarse en zonas planas o con muy poca pendiente y que permitan la circulación del agua por gravedad de modo a evitar sistemas de bombeo
- Se debe instalar en área de fácil acceso con suficiente área para expansiones futuras y en zonas no inundables.
- El humedal debe estar ubicado preferentemente a una distancia considerable del lugar donde habitan las personas debido a posibles generaciones de vectores y malos olores.

Fuente: Manual de sistemas de wetlands construidos para el tratamiento de aguas residuales (Benassi et al, 2018). Manual “Utilización de humedales artificiales como sistema de biodepuración de efluentes domiciliarios en el área de influencia del lago Ypacarai” (Barros Barreto, 2016).

#### **4.4.2 Consideraciones para la operación de wetlands construidos**

A pesar que las wetlands sean simples de operar se debe tener algunas consideraciones eventuales de operación tales como:

- Las tuberías, eventuales válvulas y bombas deben ser inspeccionados y limpiadas periódicamente con una frecuencia de 5 a 15 días dependiendo de la constitución (concentración de solidos suspensos) de las aguas residuales y el diámetro de las tuberías utilizadas.
- Retirar plantas dañinas en los wetlands que no correspondan a la especie plantada porque estas pueden competir con las otras bajando su eficiencia.
- Las macrófitas acuáticas deben ser podadas con una periodicidad de 20 a 30 días, variando conforme a especie utilizada y crecimiento. Plantas utilizadas en sistemas con aguas muy contaminadas tienden a tener un crecimiento más rápido aumentando la frecuencia de mantenimiento.
- Controlar el número de plantas en los wetlands construidos, se recomienda que las macrofitas no ocupen más del 50 % del área superficial del sistema retirando las plantas más viejas que se encuentran en ella.

Vale la pena destacar que la adecuada operación y mantenimiento de la unidad de tratamiento son esenciales para asegurar una larga vida útil y eficiencia del sistema de tratamiento.

Fuente: Manual de sistemas de wetlands construidos para el tratamiento de aguas residuales (Benassi et al, 2018).

#### **4.4.3 Posibles complicaciones y soluciones**

La colmatación es uno de los problemas más comunes que ocurren en los wetlands construidos. La obstrucción del material filtrante incluye varios procesos relacionados a la acumulación de diferentes tipos de sólidos, llevando a la reducción de la capacidad de infiltración del efluente.

La colmatación es influenciada por la formación del biofilme, crecimiento de la biomasa, desarrollo de las raíces de las macrófitas, y principalmente por la carga de sólidos. Por ello son descritos algunos métodos para evitar la colmatación:

- Aplicar la carga orgánica y los sólidos suspendidos de forma apropiada a fin de evitar el crecimiento excesivo del biofilme y la acumulación de partículas.
- Adopción de un tratamiento físico químico primario para la reducción de la carga orgánica y sólidos suspendidos en las aguas residuales.
- Adopción de un método de operación, alimentación y reposo apropiado del wetlands.

Fuente: Manual de sistemas de wetlands construidos para el tratamiento de aguas residuales (Benassi et al, 2018).

Una posible complicación que se tendría con la fosa séptica es la acumulación y colmatación de lodo digerido dentro del sistema. Para ello se contrataría a una empresa que cuanta con la infraestructura para el tratamiento de disposición final del lodo de las fosas sépticas.

#### **4.4.4 Manejo de las macrófitas acuáticas**

En el caso que el manejo de las macrófitas no sea realizado tan periódicamente puede haber complicaciones relacionadas al taponamiento de las tuberías, bloqueo de canales y proliferación de vectores como insectos. Por ellos es necesario podas regulares y retiradas de las hojas que caen al lecho para evitar el retorno de los nutrientes y materia orgánica al sistema después de la muerte de las plantas.

El exceso de macrófitas acuáticas puede resultar en decrecimiento de la tasa de crecimiento disminuyendo su actividad biológica relacionada a la asimilación de las sustancias

contaminantes, comprometiendo la eficiencia del sistema. Por tanto en caso de crecimiento excesivo y diseminación excesiva de las plantas, es necesario removerlas hasta alcanzar una ocupación del lecho en torno de 50 % a fin mantener el ambiente aireado y garantizar la humedad y la incidencias adecuada de luz solar.

Fuente: Manual de sistemas de wetlands construidos para el tratamiento de aguas residuales (Benassi et al, 2018).

#### 4.5 Estimativa preliminar de costos

Los costos fueron estimados de acuerdo a los materiales utilizados por investigadores que llevaron a cabo un piloto y desarrollaron un wetlands construido (Sabei, 2013). Se llegaron a los costos de estos materiales mediante la utilización de la revistas de la construcción y estimaciones de precios actuales de mercado de los mismos a tal forma acercarse lo más posible al costo real. En los siguientes cuadros se detallan los costos de construcción para atender a poblaciones de 10, 30 y 50 personas:

Cuadro 14. Materiales y costos preliminares para la implementación (WCFSSH) caso 10 hab.

<b>Costo total para atender a 10 personas</b>			
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo Total</b>
Caño de PVC de 100 mm	3	₡ 143.502	₡ 430.506
Caño de PVC de 75 mm	2	₡ 81.102	₡ 162.204
Codo de PVC de 75 mm	3	₡ 11.674	₡ 35.022
Unión T de PVC de 100 mm	2	₡ 25.600	₡ 51.200
Unión T de PVC de 75 mm	2	₡ 18.900	₡ 37.800
Piedra triturada tipo 1 m <sup>3</sup>	1,5	₡ 100.000	₡ 150.000
Arena gruesa m <sup>3</sup>	1,5	₡ 57.500	₡ 86.250
Cemento bolsa de 50 kg	2	₡ 45.000	₡ 90.000
Cinta veda y cemento para PVC	1	₡ 21.029	₡ 21.029
Manta geo textil m <sup>2</sup>	10	₡ 7.311	₡ 73.110
Ladrillos común	200	₡ 550	₡ 110.000
Costo de mano de obra por trabajo	2	₡ 500.000	₡ 1.000.000
fosa séptica p/ 50 personas	1	₡ 1.056.405	₡ 1.056.405
Plantas (macrofitas acuáticas)	800	₡ 1.500	₡ 1.200.000
<b>Total</b>			<b>₡ 4.503.526</b>

Fuente: Costos revista de la construcción, octubre 2018; (Sabei, 2013).

Cuadro 15. Materiales y costos preliminares para la implementación (WCFSSH) caso 30 hab.

<b>Costo total para atender a 30 personas</b>			
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo Total</b>
Caño de PVC de 100 mm	7	₡ 143.502	₡ 1,004.514
Caño de PVC de 75 mm	4	₡ 81.102	₡ 324.408
Codo de PVC de 75 mm	5	₡ 11.674	₡ 58.370
Unión T de PVC de 100 mm	3	₡ 25.600	₡ 76.800
Unión T de PVC de 75 mm	3	₡ 18.900	₡ 56.700
Piedra triturada tipo 1 m <sup>3</sup>	3	₡ 100.000	₡ 300.000
Arena gruesa m <sup>3</sup>	3	₡ 57.500	₡ 172.500
Cemento bolsa de 50 kg	4	₡ 45.000	₡ 180.000
Cinta veda y cemento para PVC	2	₡ 21.029	₡ 42.058
Manta geo textil m <sup>2</sup>	15	₡ 7.311	₡ 109.665
Ladrillos común	350	₡ 550	₡ 192.500
Costo de mano de obra por trabajo	2	₡ 500.000	₡ 1.000.000
fosa séptica p/ 50 personas	1	₡ 1.056.405	₡ 1.056.405
Plantas (macrofitas acuáticas)	1200	₡ 1.500	₡ 1.800.000
<b>Total</b>			<b>₡ 6.373.920</b>

Fuente: Costos revista de la construcción, octubre 2018; (Sabei, 2013).

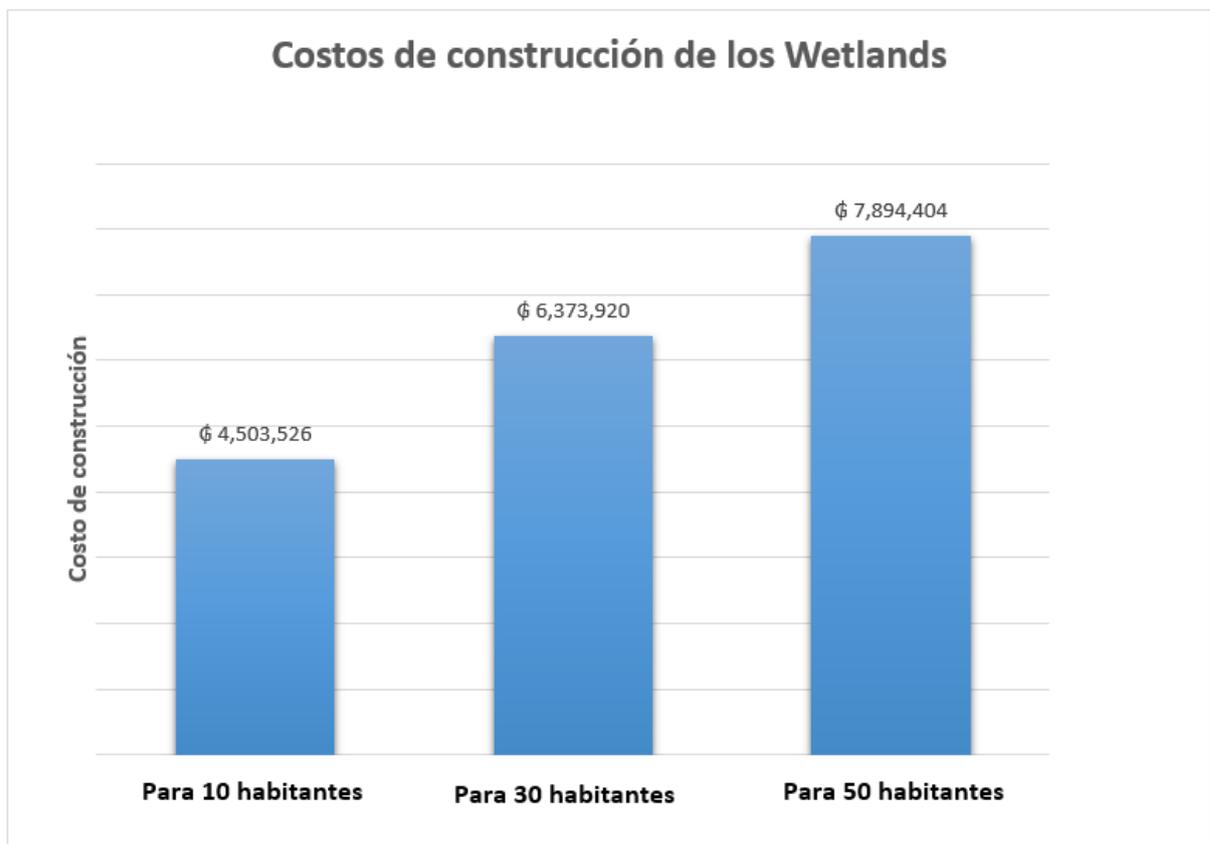
Cuadro 16. Materiales y costos preliminares para la implementación (WCFSSH) caso 50 hab.

<b>Costo total para atender a 50 personas</b>			
<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo Total</b>
Caño de PVC de 100 mm	10	₡ 143.502	₡ 1.435.020
Caño de PVC de 75 mm	5	₡ 81.102	₡ 405.510
Codo de PVC de 75 mm	10	₡ 11.674	₡ 116.740
Unión T de PVC de 100 mm	2	₡ 25.600	₡ 51.200
Unión T de PVC de 75 mm	4	₡ 18.900	₡ 75.600
Piedra triturada tipo 1 m <sup>3</sup>	4	₡ 100.000	₡ 400.000
Arena gruesa m <sup>3</sup>	4	₡ 57.500	₡ 230.000
Cemento bolsa de 50 kg	5	₡ 45.000	₡ 225.000
Cinta veda y cemento para PVC	3	₡ 21.029	₡ 63.087
Manta geo textil m <sup>2</sup>	22	₡ 7.311	₡ 160.842
Ladrillos común	500	₡ 550	₡ 275.000
Costo de mano de obra por trabajo	2	₡ 500.000	₡ 1.000.000
fosa séptica p/ 50 personas	1	₡ 1.056.405	₡ 1.056.405
Plantas (macrofitas acuáticas)	1600	₡ 1.500	₡ 2.400.000
<b>Total</b>			<b>₡ 7.894.404</b>

Fuente: Costos revista de la construcción, octubre 2018; (Sabei, 2013)

Los costos podrían variar en mayor o menor medida dependiendo de la zona de implantación y variación en los precios de mercado, no obstante en esta estimativa no están detallados los costos de operación y mantenimiento debiendo ser evaluados y añadidos al costo de implantación antes mencionado para obtener el costo real funcionamiento del sistema de tratamiento por wetlands construido. Se pudo constatar que el costo total de construcción para atender a 10 personas rondaría los ₡ 4.503.526 y ₡ 450.353 per cápita, el costo total para 30 personas rondaría los ₡ 6.373.920 y ₡ 212.464 per cápita, mientras que el costo para atender a 50 personas rondaría los ₡ 7.894.404 y ₡ 157.888 per cápita, notamos que cuanto mayor la población atendida el costo per cápita disminuye, no obstante no deja de ser un costo accesible para el tratamiento de aguas residuales y haciendo posible su implementación en pequeñas comunidades (alejadas o rurales) o de baja renta. En la (figura 16) podemos ver que cuanto mayor la población atendida mayor el costo total de construcción del wetlands.

Figura 16. Costos de construcción del sistema de tratamiento para 10, 30 y 50 habitantes

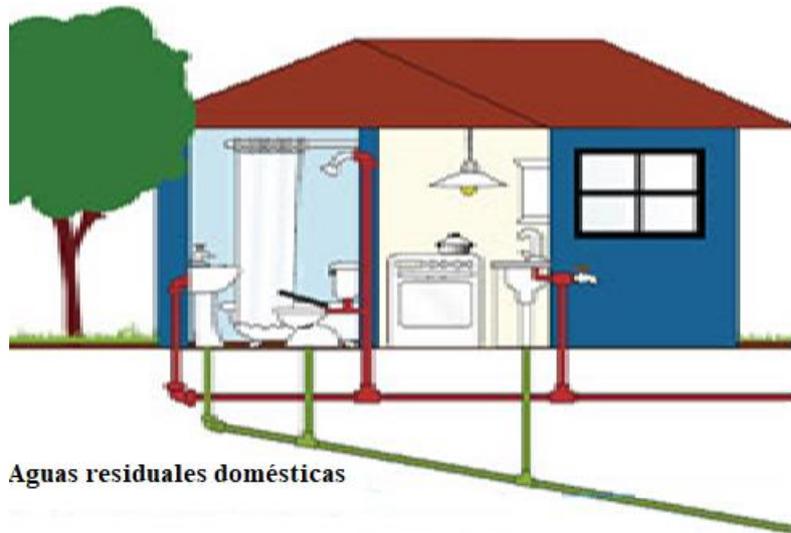


Fuente: Propia del autor

#### 4.6 Flujograma del sistema de tratamiento por wetlands construidos (WCFSSH)

En los siguiente gráficos se puede observar un esquema desde donde se genera el agua residual domiciliar y el camino que sigue durante su depuración dentro del sistema de tratamiento por wetlands construidos hasta su disposición final que puede ser el reúso o la infiltración en el suelo.

Figura 17. Vivienda donde se generan las aguas residuales domiciliarias



Fuente: Instalaciones sanitarias. DalmaLedezma\_Arquitectura\_Psm

En las viviendas son generadas las aguas residuales producto de las actividades humanas para su aseo e higiene en baños, cocinas y lavaderos donde son generadas aguas gris y negras (cloacas). Estas aguas de no ser tratadas provocarían la contaminación del suelo y del agua. Después de generadas estas aguas residuales son encaminadas hacia un tratamiento previo de fosa séptica para retención de sólidos y degradación de materia orgánica.

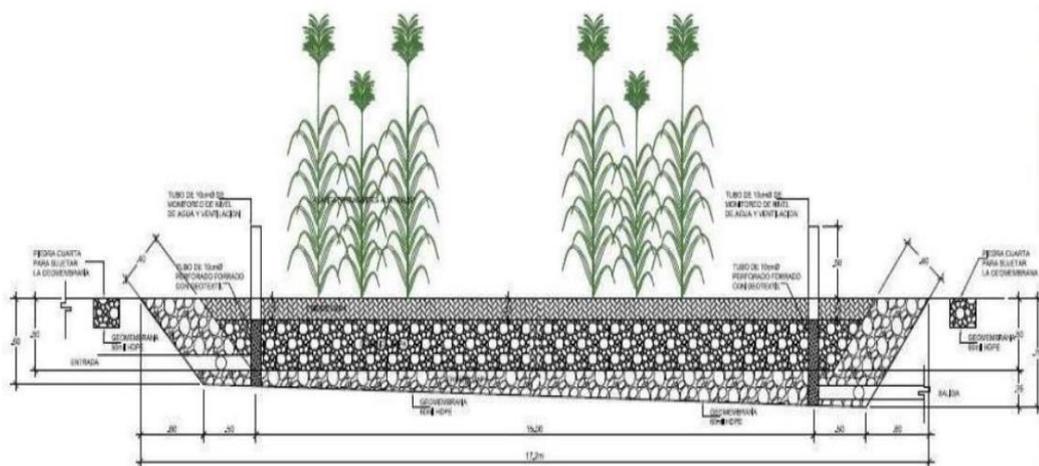
Figura 18. Fosa séptica domiciliaria



Fuente: fosa séptica online

Después de generadas las aguas residuales ingresan a la fosa séptica donde se retienen sólidos y se degrada una parte de la materia orgánica presente en el agua residual. Este proceso ayuda en el tratamiento de las aguas residuales acompañando a los wetlands construidos para una mejor eficiencia.

Figura 19. Sistema de Wetlands construido de flujo subsuperficial horizontal



Fuente: Diseño de Humedal Construido para el tratar los lixiviados del Proyecto de Relleno Sanitario de Pococí (Castro, 2010).

El efluente proveniente del tratamiento previo en la fosa séptica ingresa al wetlands construido para el siguiente proceso de biodepuración donde el material soporte y las macrofitas acuáticas se encargan de degradar la materia orgánica y extraer contaminantes del agua produciendo la purificación y clarificación del efluente. Al pasar por este proceso obtenemos una eficiencia en remoción de DBO de más de 80 % dejando el agua en condiciones para su reúso o infiltración.

Figura 20. Reúso del agua residual tratada por wetlands construidos



Fuente: Internet: <https://www.delphin-ws.de/es/engineering/>

Teniendo en cuenta que el efluente proveniente del tratamiento por wetlands construido posee una calidad para que puedan ser reaprovechado como en riego de jardines y cultivos de consumo no directo, lavado de calles, etc. Para el caso de la ciudad de Loma Plata donde existe escasez hídrica su reúso es una alternativa interesante y beneficiosa.

De no alcanzar la eficiencia para poder reutilizar el agua tratada por wetlands construidos se procede a la construcción de zanjas de infiltración para absorción del agua por el suelo, ya que el agua posee las condiciones para no generar un impacto ambiental negativo en las napas freáticas que se encuentran próximas a la superficie.

La capacitación y concienciación de la población para el tratamiento de las aguas residuales es un pilar muy importante para que este tipo de tecnología se lleve a cabo con éxito. Para ello se debe realizar campañas de educación sanitaria en escuelas, municipalidades, hospitales y centros educativos con el fin de llegar a la mayor cantidad de personas posibles. Desde el municipio se pueden crear cuadrillas de educación casa por casa con el fin de llegar a todos los integrantes de cada familia, con esto aseguramos el buen funcionamiento y eficiencia del sistema de tratamiento por wetlands construidos.

## **CAPÍTULO 5 – CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS**

La falta de tratamiento de aguas residuales en todo el país es una realidad ineludible por ende esta situación se agrava en zonas alejadas o rurales. A partir de este trabajo se pudo visualizar que los wetlands construidos son una alternativa viable que presentan importantes ventajas como ser de bajo costo y simplicidad de implementación, operación y mantenimiento. Es importante la orientación y capacitación de la población en relación a la operación y mantenimiento para lograr el mejor funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales.

Cabe destacar que es importante el interés y acompañamiento del gobierno para el desarrollo e implementación de estos sistemas de tratamiento y que puedan llegar a las comunidades carentes de cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales.

Fue observado que esta tecnología puede ser utilizada como oportunidad para el reúso del agua tratada por sistemas de wetlands construidos en la fertilización e irrigación de suelos agrícolas en lugares que sufren escasez hídrica. En este sentido es importante verificar el patrón de calidad del efluente para documentar y reglamentar el reúso del agua de forma segura.

Concluimos que la ciudad de Loma Plata cuenta con las características necesarias para que este tipo de tecnología sea llevada a cabo, la ciudad carece de tratamiento de aguas residuales, se encuentra en una zona rural muy alejada de centros urbanos, posee un presupuesto bajo y con déficit de personal calificado para la construcción y operación de plantas de tratamientos convencionales de aguas residuales, el clima un factor importante y la escasez hídrica es una realidad.

Finalmente en este trabajo no fue posible hacer un piloto para realizar análisis del efluente tratado con el fin de verificar el grado de eficiencia del sistema, pero podemos concluir que es una opción viable para presentes y futuros trabajos.

Se recomienda seguir con investigaciones y desarrollos de proyectos a fin de consolidar y sustentar con base científica la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizando la tecnología de wetlands construidos, como ventajas y limitaciones, clima y topografía, recuperación de nutrientes, compostaje de la biomasa, etc. A fin de comparar con trabajos e investigaciones de otros países.

## REFERENCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e Solos - Terminologia. Rio de Janeiro. 18 p. 1995.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para Concretos – Especificações. Rio de Janeiro. 15 p. 1993.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7229: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro. 15 p. 1993.

AGUAS RESIDUALES EL RECURSO DESAPROVECHADO. Informe por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. París. Francia. 2017.

ARIAS, C; BRIX, H. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. En: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Bogotá. 2003. Asunción. Paraguay. 2018.

ATLAS GEOGRAFICO DEL CHACO PARAGUAYO. Informe y 12 mapas temáticos unidad gis – rediex. Asunción. Paraguay. Mayo 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e Solos - Terminologia. Rio de Janeiro. 18 p. 1995.

BARROS BARRETO, G. Manual “Utilización de humedales artificiales como sistema de biodepuración de efluentes domiciliarios en el área de influencia del lago Ypacarai”.

BENASSI, R. et al. Manual de sistemas de wetlands construídas para tratamiento de esgotos sanitario: implementação, operação e manutenção. 1ra edição. Santo André – São Paulo. 2018.

BLÁZQUEZ. J. R. Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración. Alicante. España. 2016.

CONACYT. 27 pág. Asunción. Paraguay. 2016.

COSTOS DE LA CONSTRUCCIÓN. Revista. Paraguay. Octubre 2018.

CURT, M. D. Fito depuración en humedales. Conceptos Generales, en: Manual de Barros Barreto, Guillermo y Barrios, Rodrigo. 2005.

DELGADILLO, O. et al. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro andino para la gestión y uso del agua. Cochabamba. Bolivia. 2010.

DGEEC. Proyección de la población por sexo y edad, según distrito. Revisión 2015. pág. 32-37. Asunción. Paraguay. Octubre 2015.

DIRECCIÓN GENERAL DE CONTRATACIONES PÚBLICAS (DGCP). Paraguay. 2016.

EMPRESA DE SERVICIOS SANITARIOS DEL PARAGUAY (ESSAP). Paraguay. 2017.

ESGOTAMIENTO SANITÁRIO, 2015. Fuente Internet:  
<http://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/aut0192/Aprestratesgoto.pdf>

GEOLOGÍA DEL PARAGUAY. Fuente Internet:  
<http://www.geologiadelparaguay.com.py/GeoMain.htm>.

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA. Humedales para el tratamiento de aguas residuales: generalidades – diseño – construcción – mantenimiento. Morelos. México. 2015.

KAICK, T. S. V. Estação de tratamento de esgotos por meio de zona de raízes: uma proposta de tecnologia apropriada para saneamento básico no litoral do Paraná. 128 f. Curitiba. Brasil. 2002.

MACHADO, A. I. et al. Overview of the state of the art of constructed wetlands for decentralized wastewater management in Brazil. *Journal of Environmental Management*. 560 – 570 p. 2017.

METCALF-EDDY. Tratamiento y depuración de las aguas residuales. UE. 1991.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERIA (MAG). Paraguay. 2005.

MINISTERIO DE HACIENDA. Subsecretaría de Estado de Administración Financiera - Unidad de Departamentos y Municipios (UDM). Ejecución de Transferencias Financieras a Gobiernos Municipales. Enero a Diciembre del 2016. Pág. 5. Asunción. Paraguay. 2016.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y COMUNICACIONES (MOPC). Paraguay. 2016.

NASCIMENTO, T. L. Estudo do uso de wetlands construídas no tratamento de esgotos domésticos em comunidades rurais. 70 f. São Paulo. Brasil. 2015.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). Fuente Internet:  
[https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/diseases-risks/diseases/es/ABNT](https://www.who.int/water_sanitation_health/diseases-risks/diseases/es/ABNT) –

ORLANDO ERAZO CAMPOS. Uso de la totora en la producción agrícola de la cuenca del río Camacho, *Leisa revista de agroecología*. Vol. 19. Tarija, Bolivia. 2018.

OROZCO, B. et al. Contaminación ambiental: Una visión desde la química. Madrid. España. 2008.

PHILIPPI, L. S. et al. Eficácia dos sistemas de tratamento de esgoto doméstico e de água para consumo humano utilizando wetlands considerando períodos diferentes de instalação e diferentes substratos e plantas utilizados. Florianópolis. Brasil. 2007.

PHILIPPI, L. S. SEZERINO, P. H. Aplicação de sistemas tipo wetlands no tratamento de águas residuais: utilização de filtros plantados com macrofitas. 144 f. Florianópolis. Brasil. 2004.

ROMERO, M. et al. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica (en línea). México. 2009.

SABEI, T. R. Implementação de uma estação de tratamento de esgoto por zonas de raízes na comunidade rural colônia mergulhão. São Jose dos Pinhais – PR. Curitiba. Brasil. 2013.

SALATI, E. Utilização de sistemas de wetlands construídas para tratamento de águas. 23 f. Piracicaba. Brasil. 2009.

SEAM – SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE. Resolución número 222/02. Paraguay. 2002.

SECRETARIA TÉCNICA DE PLANIFICACIÓN (STP). Paraguay. 2014. Fuente Internet: <http://www.stp.gov.py/pnd/ejes-estrategicos/diagnosticos/agua-y-saneamiento/>

SEZERINO, P. H. Potencialidade dos filtros plantados com macrofitas (constructed wetlands) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical. 171 f. Florianópolis. Brasil. 2006.

TONIATO, J. V. Avaliação de um wetlands construído no tratamento de efluentes sépticos – estudo de caso Ilha Grande. Rio de Janeiro. Brasil. 2005.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters. Office of research and development. EU. 2000.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. Editora FCO. Belo Horizonte. Brasil. 2005.