

**UNIVERSIDAD PERUANA DEL CENTRO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**UNIVERSIDAD PERUANA  
DEL CENTRO**

**DISEÑO HIDRÁULICO, CONSTRUCTIVO Y  
AMBIENTAL DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA  
EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
DOMÉSTICAS**

**Trabajo de investigación**

**Para obtener el grado académico de Bachiller en  
Ingeniería civil**

**Presentado por:  
Ramírez Manrique Rives Raúl  
Mogollon Vizueta Cristhian Juan**

**Huancayo, agosto de 2017**

**JURADO EVALUADOR DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

-----

-----

-----

## **AGRADECIMIENTO**

Al culminar el presente trabajo de investigación agradezco a Dios, por darme las fuerzas necesarias cada día para seguir adelante.

Agradezco a mis padres Roboán Segundo y Luz Aurora por su incalculable amor y apoyo en mi meta y anhelo de formarme como profesional.

Agradezco a la Universidad Peruana del Centro, en especial a la Facultad de Ingeniería por inculcarme los conocimientos para desarrollarme como futuro profesional.

Rives Raúl Ramírez Manrique.

Doy gracias a la Universidad Peruana del Centro por permitirme formarme como profesional.

Cristhian Juan Mogollon Vizueta.

## **DEDICATORIA**

A mi hermana Berthita María, que desde el cielo me ilumina y bendice en cada paso y proyecto que emprendo en mi vida. Con todo mi amor y cariño.

A mi esposa Lucero Belén y a mis hijos Flavia Valentina, Rives Dialessandro, Luis Sebastián y Bastian del Piero Roboán, que con todo su amor me han ayudado a realizar mis sueños y propósitos durante todos estos años.

Rives Raúl Ramírez Manrique.

Dedico este trabajo de investigación a mi esposa Lita Sadith y a mis hijos Cristhian Joaquin Matías y Aniar Sadith.

Cristhian Juan Mogollon Vizueta

## **RESUMEN**

La presente investigación explora y describe el diseño hidráulico, constructivo y ambiental de los humedales artificiales de flujo sub superficial de tipo horizontal como mecanismo para el tratamiento de aguas residuales domésticas, de modo tal que se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, ubicado en la provincia de Morropón en la región Piura, que tiene un clima subtropical con temperaturas entre 25 y 38 °C. Este estudio ayudará a los ingenieros proyectistas, investigadores y autoridades públicas a identificar una solución, en comunidades rurales con climas sub tropicales y con ausencia de tecnologías no convencionales, para el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas que permita cuidar la salud pública y el medio ambiente a un bajo costo de operación y mantenimiento.

Como metodología se elaboró un análisis de contenido de tres investigaciones experimentales sobre humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal para el tratamiento de aguas residuales domésticas ejecutados en comunidades rurales con climas subtropicales con el propósito de determinar sus características.

Los resultados obtenidos han demostrado que los sistemas de flujo sub superficial de tipo horizontal son los que mejor funcionamiento tienen, debido al análisis de costo eficiencia, y aun cuando este sistema requiere de áreas de mayor extensión, es factible su implementación por la eficiencia en remoción de demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos y nitrógeno, que permitirá el reuso del agua tratada en actividades agropecuarias. Finalmente mediante una matriz de categorización se describen las características hidráulicas, constructivas y ambientales de este sistema.

Palabras clave: hidráulica, constructivo, ambiental, humedal artificial, aguas residuales.

## **ABSTRACT**

The present research explores and describes the hydraulic, constructive and environmental design of horizontal sub-surface artificial flow wetlands as a mechanism for the treatment of domestic wastewater, so that it can be adapted in rural housing in the district of Buenos Aires , located in the province of Morropón in the Piura region, which has a subtropical climate with temperatures between 25 and 38 °C. This study will help engineers, planners, researchers and public authorities identify a solution in rural communities with subtropical climates and the absence of unconventional technologies for the secondary treatment of domestic wastewater for public health and the environment at a low cost of operation and maintenance.

As a methodology, a content analysis of three experimental investigations on horizontal surface sub-surface artificial wetlands for the treatment of domestic sewage executed in rural communities with subtropical climates has been developed for the purpose of determining their characteristics.

The results obtained have shown that the sub-surface flow systems of the horizontal type are the ones that have the best performance due to the analysis of cost efficiency, and even when this system requires larger areas, it is feasible its implementation by efficiency in removal biochemical demand for oxygen, suspended solids and nitrogen, which will allow the reuse of treated water in agricultural activities. Finally, a categorization matrix describes the hydraulic, constructive and environmental characteristics of this system.

Key words: hydraulic, constructive, environmental, artificial wetland, sewage

## ÍNDICE GENERAL

<b>JURADO EVALUADOR DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN</b> .....	i
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	ii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iii
<b>RESUMEN</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	vi
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	ix
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	x
<b>CAPÍTULO I</b> .....	1
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. Situación problemática</b> .....	1
<b>1.2. Formulación del problema</b> .....	3
<b>1.2.1. Problema general</b> .....	3
<b>1.2.2. Problemas específicos</b> .....	3
1.3. Justificación teórica .....	4
1.4. Justificación práctica .....	4
1.5. Objetivos de la investigación .....	5
1.6. Hipótesis .....	6
<b>CAPÍTULO II</b> .....	7
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	7
2.1. Marco epistemológico de la investigación .....	7
2.2. Antecedentes de la investigación .....	8
2.3. Bases teóricas .....	13
2.3.1. Humedales artificiales .....	13
2.3.2. Componentes del humedal .....	15

2.3.3. Tipos de humedales construidos usados para tratamiento de aguas residuales. .	17
2.3.4. Reactor de primer orden de flujo a pistón.....	19
2.3.5. Conductividad hidráulica. Ley de Darcy .....	20
2.3.6. Aguas residuales .....	23
2.3.6.1. Características y parámetros de las aguas residuales.....	24
2.3.6.1.1. Características físicas.....	24
2.3.6.1.2. Características químicas.....	25
2.3.6.1.3. Características biológicas.....	27
2.3.7. Tratamiento de las aguas residuales en el Perú.....	28
2.3.7.1. Importancia del reuso de aguas residuales.....	28
2.3.7.2. Niveles de tratamiento de aguas residuales .....	29
2.3.7.3. Sistemas naturales de tratamiento.....	30
2.3.8. Normas de calidad del agua en el Perú y reutilización de agua residual .....	31
2.3.8.1. Marco legal para reutilización de aguas residuales.....	34
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>36</b>
<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>36</b>
3.1.- Tipo y diseño de la investigación.....	36
3.1.1. Tipo de investigación.....	36
3.1.2.- Nivel de investigación .....	36
3.1.3.- Diseño de investigación.....	37
3.2.- Población de estudio .....	37
3.3.- Tamaño de muestra.....	38
3.4.- Técnica de recolección de datos .....	39
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>41</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>41</b>
4.1. Análisis, interpretación y discusión de resultados .....	41
4.1.1. Unidad de análisis 1.....	41



4.1.2. Unidad de análisis 2.....	41
4.1.3.- Unidad de análisis 3.....	42
4.2.- Presentación de resultados. ....	43
4.2.1. Resultados del funcionamiento de humedales artificiales .....	44
4.2.2. Resultados de las características hidráulicas, constructivas y ambientales de humedales artificiales.....	48
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>51</b>
<b>DISEÑO HIDRÁULICO, CONSTRUCTIVO Y AMBIENTAL DE HUMEDAL ARTIFICIAL .....</b>	<b>51</b>
5.1. Diseño hidráulico de un humedal sub superficial de flujo horizontal .....	51
5.2. Diseño constructivo de un humedal sub superficial de flujo horizontal .....	56
5.3. Diseño ambiental de un humedal sub superficial de flujo horizontal .....	61
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>63</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>64</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXO 01. Matriz de consistencia.....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO 02. Instrumentos de recolección y procesamiento de datos .....</b>	<b>70</b>

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Guía de revisión documental 1 .....	41
Cuadro 2. Guía de revisión documental 2 .....	41
Cuadro 3. Guía de revisión documental 3 .....	42
Cuadro 4. Matriz de organización y categorización. Funcionamiento de los humedales artificiales .....	44
Cuadro 5. Matriz de organización y categorización. Características hidráulicas, constructivas y ambientales de los humedales artificiales.....	48

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de funcionamiento de un humedal artificial .....	13
Figura 2. Humedal artificial de flujo superficial (SWF) .....	17
Figura 3. Humedal artificial de flujo sub superficial horizontal.....	18
Figura 4. Humedal artificial de flujo sub superficial vertical.....	18
Figura 5. Flujo de agua en capas paralelas .....	22
Figura 6. Escala de pH.....	27
Figura 7. Proceso de funcionamiento de un humedal artificial .....	45
Figura 8. Eficiencia de remoción de DBO5 en las unidades de análisis de humedales artificiales .....	46
Figura 9. Eficiencia de remoción de DQO en las unidades de análisis de humedales artificiales .....	47
Figura 10. Eficiencia de remoción de SS en las unidades de análisis de humedales artificiales .....	47
Figura 11. Propiedades de un humedal artificial .....	49
Figura 12. Planta de humedal artificial de flujo sub superficial horizontal.....	58
Figura 13. Cortes b-b de humedal artificial de flujo sub superficial horizontal .....	58
Figura 14. Cortes a-a de humedal artificial de flujo sub superficial horizontal .....	58
Figura 15. Detalle constructivo afluente.....	59
Figura 16. Detalles constructivo 2 afluente y efluente .....	59
Figura 17. Detalles constructivo 3 afluente y efluente .....	60
Figura 18. Vista isométrica de humedal superficial de flujo sub superficial .....	60

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros típicos de diseño .....	19
Tabla 2. Estándares de calidad ambiental y límites máximos permisibles.....	32
Tabla 3. Límites máximos permisibles para efluentes de ARD .....	35
Tabla 4. Criterios de inclusión y exclusión de la población .....	38
Tabla 5. Unidades de análisis - Investigaciones .....	39
Tabla 6. Ecuaciones de diseño para humedales artificiales .....	51
Tabla 7. Cálculo de KA .....	53
Tabla 8. Características del medio para sistemas de flujo sub superficial .....	53
Tabla 9. Características típicas del medio para humedales de flujo sub superficial .....	54
Tabla 10. Criterios para humedales de flujo sub superficial .....	54
Tabla 11. Lista de partidas.....	57

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Situación problemática

Hasta el año 2009, 511 mmc de aguas residuales domésticas en el Perú no contaban con sistema de tratamiento (Zapata, 2011). Posteriormente esta cifra se incrementó, pues hacia el año 2011, se producían cerca de 1000 mmc de aguas residuales domésticas anualmente, de este volumen solo el 29% era tratado correctamente, el resto era dispuesto sin ningún tratamiento en ambientes acuáticos superficiales como ríos y tierras agrícolas. (Miranda, 2011).

Los humedales artificiales, se presentan como un sistema no convencional para el tratamiento de las aguas residuales y es una práctica extendida en Estados Unidos y Europa, con resultados eficientes; estos humedales, mediante procesos biológicos naturales, permiten la degradación de la materia orgánica, sin requerimiento de energía eléctrica ni equipos costosos.

Los humedales artificiales proveen a través de un mecanismo natural y económico la protección de la salud pública y la protección del medio ambiente, no obstante, en el Perú su implementación aún es incipiente, en tal sentido es necesario explorar y describir cómo funciona el sistema, cuáles son sus características hidráulicas, constructivas y ambientales que permitan el tratamiento de aguas residuales domésticas.

El distrito de Buenos Aires es uno de los 10 distritos de la provincia de Morropón en la región Piura, se ubica a 05°16'04" de latitud sur y a 79°58'15" de longitud oeste, a una altura de 146 m.s.n.m. y tiene una población de 7985 habitantes (INEI, 2015); es una zona geográfica subtropical y con temperaturas que oscilan entre los 25°C y los 38°C, la actividad económica principal es la agropecuaria (Municipalidad provincial de Chulucanas, 2014).

El distrito de investigación está conformado por dieciséis centros poblados rurales, dentro de los cuales cinco están conformadas por viviendas rurales dispersas que no conforman un núcleo urbano, no tienen trazo urbano y no cuentan con sistema de saneamiento básico en sus viviendas, por ende no cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales, y la disposición de estas aguas tienen como receptor el río Piura (cuerpo de agua que sirve para el riego agrícola y para el consumo humano) y/o las calles del mismo sector. Estos efluentes son vertidos sin las condiciones de calidad establecida por la normativa, sin opción a reutilizar los mismos en actividades agropecuarias, o peor, en épocas de sequía se reutiliza sin el debido tratamiento, con las consecuentes afectaciones a la salud pública y a la sanidad animal, aunado a la contaminación hídrica del río Piura; asimismo genera un impacto ambiental negativo en la zona por la expedición de malos olores en los centros poblados del distrito de Buenos Aires. Así también, el actual vertimiento de las aguas residuales domésticas tratadas inadecuadamente genera una contaminación de suelos, de aguas subterráneas y la eutrofización de aguas.

Sobre humedales artificiales, en el Perú, a través del Ministerio del Ambiente se han establecido estrategias básicas para aplicar propuestas con criterio costo - eficiencia para el tratamiento de aguas residuales, acorde con las reales posibilidades de pago de la comunidad y que sean sistemas que no consuman energía eléctrica, pero son muy pocas las experiencias de aplicación (Ministerio del ambiente-MINAM, 2009).

En relación al diseño de humedales artificiales, desde el punto de vista hidráulico, constructivo como ambiental, existe variada información sobre realidades geográficas europeas, de Estados Unidos y de algunos países latinoamericanos. En el Perú existen dos experiencias abordadas por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – UNMSM en su ciudad universitaria y en la localidad de Lacabamba – Ancash, en ambos casos como tratamiento secundario o terciario, y aun cuando los resultados demostraron eficiencia para obtener agua de mejor calidad en el efluente, las conclusiones a

las que se arribó fue de que se estudie su aplicación en condiciones geográficas y climatológicas propias de la localidad donde implementar el sistema.

Por ello la presente investigación exploró los distintos diseños de humedales artificiales, pues es un tema poco estudiado en comunidades rurales con climas con altas temperaturas como las que se registran en el distrito de Buenos Aires – Morropón - Piura; y se describió las características hidráulicas, constructivas y ambientales de los diseños de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas, obteniendo una data que sirva como base para futuras investigaciones de aplicación tecnológica en áreas urbanas con geografía y clima similares a las que cuenta la localidad de investigación.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema general**

¿Cómo es el funcionamiento del diseño de los humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas que pueda adaptarse en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017?

### **1.2.2. Problemas específicos**

1. ¿Qué características hidráulicas tiene un diseño de humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal para que funcione como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas y se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017?

2. ¿Qué características constructivas tiene un diseño de humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal para que funcione como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas y se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017?

3. ¿Qué características ambientales tiene un diseño de humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal para que funcione como mecanismo de

tratamiento de aguas residuales domésticas y se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017?

### **1.3. Justificación teórica**

La presente investigación aporta a la literatura científica una síntesis del funcionamiento de los humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal en el tratamiento de aguas residuales domésticas en comunidades rurales con climas subtropicales. El cuidado del medio ambiente y la salud pública es una tarea no solo de la ingeniería sanitaria y ambiental, sino también de la ingeniería civil, por lo que de manera multidisciplinaria se debe ofrecer métodos y herramientas que faciliten acciones necesarias para su solución (Sáenz, 2002).

En tal sentido, esta investigación aporta conocimiento teórico de cómo es el funcionamiento y qué características hidráulicas, constructivas y ambientales deben tener los humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal para que se pueda adaptar en viviendas rurales ubicadas en zonas geográficas que registran climas con altas temperaturas a lo largo del año, como las que experimenta una comunidad rural en el distrito de Buenos Aires, en la provincia de Morropón – Piura, para un correcto y óptimo tratamiento de aguas residuales domésticas.

Finalmente, los resultados de la investigación aportan nuevo conocimiento científico sobre los humedales artificiales, el mismo que se encuentra normado en el Reglamento nacional de edificaciones del Perú, pero que no cuenta con manuales de implementación para comunidades rurales ni con parámetros de construcción establecidos en las investigaciones realizadas a la fecha.

### **1.4. Justificación práctica**

Esta investigación expresa su justificación práctica en el enunciado siguiente: funcionamiento de humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas que se pueda

adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires – Morropón – Piura; que permitió conocer de qué forma se puede resolver el problema de la mala disposición final de las aguas tratadas incorrectamente en el cuerpo receptor de aguas formado por el río Piura que originan problemas en la salud pública, en el ambiente y en la sostenibilidad de los recursos hídricos.

La investigación reviste también una relevancia técnica, pues con los resultados se conoció qué tipos de diseños hidráulico, constructivo y ambiental existen para que se realicen investigaciones de tipo experimental y se pueda replicar este diseño mejorado en los distritos colindantes al distrito de Buenos Aires de la provincia de Morropón, de la región Piura y del Perú con similares características geográficas y climatológicas.

Los resultados de la investigación serán puestos de consideración a las universidades del país, pues servirán para implementar investigaciones con un nivel correlacional y experimental que permitirán actuar sobre las consecuencias del tratamiento deficiente de aguas residuales domésticas en forma inmediata, motivo por el cual el objetivo y/o propósito del presente proyecto de investigación es describir el funcionamiento de humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas que se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017.

## **1.5. Objetivos de la investigación**

### **1.5.1 Objetivo general**

Describir el funcionamiento de humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas que se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

1. Describir las características hidráulicas que tiene un diseño de humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal para que funcione como



mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas y se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017.

2. Describir las características constructivas que tiene un diseño de humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal para que funcione como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas y se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017.

3. Describir las características ambientales que tiene un diseño de un humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal para que funcione como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas y se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017.

## **1.6. Hipótesis**

### **1.6.1. Hipótesis general**

Los sistemas de humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal funcionan de manera eficiente como mecanismo para el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas y es posible adaptarse en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires – Morropón - Piura.

### **1.6.2. Hipótesis específicas**

1. Es posible determinar las características hidráulicas de un humedal artificial de flujo sub superficial horizontal tipo horizontal para adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, si se evalúan experiencias de aplicación en el tratamiento de aguas residuales domésticas en comunidades rurales con climas tropicales y sub tropicales.

2. Es posible determinar las características constructivas de un humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal para adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, si se evalúan experiencias de aplicación en el tratamiento de aguas residuales domésticas en comunidades rurales con climas tropicales y sub tropicales.

3. Es posible determinar las características ambientales de un humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal para adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, si se evalúan experiencias de aplicación en el tratamiento de aguas residuales domésticas en comunidades rurales con climas tropicales y sub tropicales.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Marco epistemológico de la investigación**

Mediante la presente investigación se buscó aproximar al conocimiento de la verdad, se pretendió recoger nuevos conocimientos, descubrir principios generales y se fue en búsqueda de leyes que permita el avance de la ciencia. Asimismo con esta investigación se buscó describir las técnicas de utilización de humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal para el tratamiento de aguas residuales domésticas cuya profundización de conocimientos nos encamine a una transformación de la realidad (Sánchez & Reyes, 1998).

La presente investigación se realizó con un diseño no experimental transversal, es decir, se realizó un estudio en la que no se ha variado en forma intencional la variable independiente para ver su efecto en la variable dependiente, lo que se ha realizado es una observación del fenómeno tal como se explica en las investigaciones exploradas para analizarlos (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

Para el desarrollo de la investigación se hizo uso de métodos cuantitativos y cualitativos. Siguiendo a Grinell citado por Hernández et al. (2014, pág. 4) sobre estos enfoques señala:

Ambos enfoques emplean procesos cuidadosos, metódicos y empíricos en su esfuerzo para generar conocimiento, por lo que la definición previa de investigación se aplica por igual. En términos generales, estos métodos utilizan cinco estrategias similares y relacionadas entre sí:

- a) Llevan a cabo la observación y evaluación de fenómenos.
- b) Establecen suposiciones o ideas como consecuencia de la observación y evaluación realizadas.
- c) Demuestran el grado en que las suposiciones o ideas tienen fundamento.
- d) Revisan tales suposiciones o ideas sobre la base de las pruebas o del análisis.
- e) Proponen nuevas observaciones y evaluaciones para esclarecer, modificar y fundamentar las suposiciones e ideas o incluso para generar otras.

Tal como se reseña, la presente investigación utilizó el método cualitativo, se utilizó la técnica de recolección y análisis de datos para afinar las preguntas de investigación y revelar nuevas interrogantes en el proceso de interpretación, pues ha existido una dinámica

entre los hechos (humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas) y su interpretación (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

Sanz (citado por Valderrama, 2015, p.26) señala que “las funciones de la ciencia son: la descripción, la explicación, la predicción y la aplicación científica”; en la presente investigación se efectuó un relato de las propiedades y características hidráulicas, constructivas y ambientales de los humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal para el tratamiento de aguas residuales domésticas; que han respondido a la pregunta de ¿cómo es el funcionamiento? y se ha respondido con descripciones.

## **2.2. Antecedentes de la investigación**

a) A nivel internacional,

En México, Haro & Aponte (2010) investigaron: “Evaluación de un humedal artificial como tratamiento de agua residual en un asentamiento irregular”, cuyas conclusiones más relevantes fueron: “a) Es necesario estudiar las características específicas de cada sitio para definir los criterios específicos de diseño; b) Para la instalación de humedales artificiales se requieren terrenos con las dimensiones suficientes y una leve pendiente con el fin de no requerir sistemas de bombeo; c) El sistema de tratamiento a través de humedales artificiales puede ser aplicado en asentamientos rurales, semiurbanos y urbanos donde sea necesario remover materia orgánica, nitrógeno y fósforo; d) La utilización de humedales artificiales genera beneficios ambientales ya que disminuye la contaminación ocasionada por el vertido de las aguas residuales directamente al suelo; e) En México, a través de sistemas como los humedales artificiales, se puede incentivar la reutilización del agua en diferentes actividades a un costo menor que el de otros métodos de tratamiento.”

Espinoza (2014) investigó en Colombia: “Factibilidad del diseño de un humedal de flujo sub superficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30,000 habitantes”, cuyas conclusiones más importantes fueron: “a) De acuerdo con los antecedentes relacionados, los humedales artificiales con espejo de agua predominan en los Estados Unidos, en poblaciones de hasta 20.000 habitantes, debido a que requieren un menor costo de inversión que los humedales de flujo sub superficial; b) Los humedales artificiales de flujo sub superficial, han sido utilizados principalmente en Europa y Estados Unidos, sin embargo, en Colombia es una tecnología nueva, y sólo se conocen experiencias de su

utilización en el municipio de Macanal; c) Los humedales artificiales son utilizados como tratamiento secundario o terciario de aguas residuales municipales, lo que hace necesario implementar previamente tratamiento primario (sedimentadores, otros), a fin de garantizar su adecuado funcionamiento y prevenir en el largo plazo problemas de colmatación; d) Los modelos para el diseño de humedales artificiales de flujo sub superficial, presentan diferencias en el cálculo del área superficial de diseño y, por tanto, en el tiempo de retención y en la carga superficial orgánica aplicada; e) La diversidad en los criterios de diseño de humedales para el tratamiento de aguas residuales indica la necesidad de adelantar estudios que contribuyan a definir con mayor perfección sus valores.”

Andreo (2014), en España investigó: “Evaluación y diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales municipales”, concluyendo en lo siguiente: “a) Se evaluó la eficacia del proceso de depuración y eliminación total de aguas residuales municipales mediante un sistema híbrido de humedales construidos, localizado en el sudeste español, en concreto, en el campo de Elche; b) El sistema estuvo compuesto por: una depuradora de oxidación total no conectada, a modo de decantador y separador primario, un humedal construido de flujo sub superficial horizontal, plantado con *Phragmites australis* y aireación asistida durante el primer año de funcionamiento, y un humedal de flujo superficial plantado con distintas especies que cumple la función de balsa de evaporación total; c) Los parámetros evaluados fueron los exigidos, en la zona de construcción del humedal, por los Reales Decretos 509/1996 para vertido de aguas residuales tratadas y 1620/2007 de reutilización de aguas regeneradas destinadas a uso agrícola 2.1. Otros parámetros como pH, temperatura, aceites y grasas, tensioactivos aniónicos y catiónicos, compuestos nitrogenados, orto-fosfato, contenido de oxígeno, sólidos decantables, % NaCl y sólidos totales disueltos, recuento de aerobios mesófilos, enterobacterias totales, coliformes termotolerantes y *Clostridium sulfito-reductores*, también fueron estudiados para comprobar la efectividad en el proceso de depuración del sistema; d) Las aguas residuales municipales afluentes presentaron un carácter medio- fuerte, estando influenciadas por los hábitos particulares de consumo familiar y poniendo de manifiesto el carácter genuino de cada agua residual: e) El agua residual tratada por el sistema de humedales construidos cumplió con los parámetros exigidos por la legislación para verter y reutilizar durante el primer año de funcionamiento. Los efluentes del segundo año no cumplieron con las exigencias legales debido a desajustes hídricos en el humedal sub superficial que afectaron

también al humedal superficial situado posteriormente; f) El humedal de flujo sub superficial sufrió un secado total al comienzo del segundo año de estudio, provocado por un excesivo desarrollo vegetativo derivado del sobredimensionamiento del sistema, situación que se repitió al año siguiente. Este hecho provocó la aparición de vías preferentes de circulación de agua que derivó en un desajuste hídrico e iónico en el lecho del sistema, teniendo como consecuencia el no cumplimiento de la legislación; g) Los sistemas de humedales construidos se postulan como tratamiento de aguas residuales secundario y en muchos casos terciario, destacando el caso de humedales construidos tipo híbrido: sub superficial más superficial.”

Montiel (2014) investigó: “Humedal artificial”, cuyas conclusiones fueron: “a) El propósito de los humedales artificiales es el saneamiento del agua residual...empleando contactores biológicos rotatorios (CBR), un proceso biológico aerobio de biomasa adherida; b)...se obtuvieron remociones promedio de materia orgánica como demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 39% y de sólidos suspendidos totales (SST) de 64%; c) El diseño hidráulico adecuado de un humedal artificial determina que tenga un buen funcionamiento. Todos los modelos de diseño que se usan actualmente asumen condiciones uniformes de flujo pistón y no existen restricciones para el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento, d) El flujo de agua en un humedal de flujo libre es descrito por la ecuación de Manning, que define el flujo en canales abiertos”

Soto (2016) en España investigó: “Estudio de aplicabilidad de humedales artificiales para la mejora de la calidad de las aguas de meandros abandonados del río Segura” y concluyó en lo siguiente. “a) ...las altas velocidades del agua circulan actualmente por estos meandros, superiores a 1 m/sg, penalizan gravemente la correcta sedimentación de los sólidos suspendidos en el caso de instalar el sistema de macrofitas flotantes. Por esta razón, en cada uno de los diseños hidráulicos se presentan dos alternativas en base a la velocidad de flujo de agua en los mismos; b)... Los caudales de tratamiento para los cuales se han diseñado los humedales con macrofitas son bastante menores que el caudal que diariamente atraviesa el río cualquiera de las estaciones de aforo de la Vega Baja del Segura. Por esta razón, el impacto final sobre la calidad de agua del río en su totalidad es casi imperceptible. Sin embargo, aunque la mejora en la calidad del agua no sea tan sustancial en cuanto al

porcentaje de remoción de contaminantes, la implantación de humedales artificiales en los meandros abandonados del río Segura permite una mejora ambiental en cuanto a la restauración de los ecosistemas fluviales perdidos en el acortamiento del río Segura y mejorar el estado ecológico de la masa de agua.

b) A nivel nacional:

Maldonado (2005) investigó. “Uso de wetlands para el tratamiento y reuso de aguas residuales municipales”, las conclusiones más relevantes fueron: a) Este sistema permite el tratamiento de aguas residuales obteniéndose como productos finales agua tratada y la totora, productos que de ser comercializados elevarían la actividad económica de las localidades y mejorarían la calidad ambiental de la zona; b) El uso de humedales para el tratamiento de las aguas residuales municipales en comunidades, donde se descargan los desechos líquidos no tratados o tratados directamente a cuerpos receptores o al subsuelo, tendrá un impacto favorable al medio ambiente; c) En un humedal, los costos de construcción están influenciados en gran medida por la distancia desde las canteras de materiales (grava y arena) hasta el sitio de ubicación de la planta...”

Llagas y Guadalupe (2006) investigaron: “Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM” y cuyas conclusiones son: a) La dimensión de las celdas para el diseño del humedal en la ciudad universitaria de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos está en la relación largo: ancho (4:1); relación influenciada fuertemente por el régimen hidráulico y la resistencia al flujo dentro del sistema. El flujo a través del humedal tiene que vencer la resistencia a la fricción impuesta por la vegetación y la capa de residuos, la energía para superar esta resistencia es suministrada por el caudal calculado entre la entrada y la salida del humedal. Relaciones desde 1:1 hasta 3:1 son también aceptables; b) El agua proveniente de este humedal será usada en los servicios de riego de las áreas verdes como: jardines, estadio universitario, áreas externas y áreas destinadas al servicio de limpieza de la ciudad universitaria, como uno de los objetivos de este proyecto.

(Tito, 2015), investigó: “Tratamiento de aguas residuales grises municipales con la especie *Paragüitas cyperus alternifolius* en humedales artificiales, urbanización Zárata – San Juan

de Lurigancho 2015”, cuyas conclusiones fueron. a) El humedal artificial con la especie *Cyperus alternifolius* (paragüita) logró remover los contaminantes físicos – químicos orgánicos de las aguas residuales grises municipales. Es decir el humedal con la planta vegetal indicada presenta mayor eficiencia de remoción en los parámetros de turbiedad, demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno. Mientras que en el parámetro de sólidos suspendidos totales fue mayor la eficiencia para el humedal testigo (sin plantas); b) El agua residual luego de ser tratada en el humedal artificial con la especie *Cyperus alternifolius*, cumple con los parámetros DQO y SST exigidos por la legislación ambiental peruana para planta de tratamiento de aguas residuales municipales; c) ... el agua residual resultante del tratamiento por el humedal artificial con la especie vegetal *Cyperus alternifolius* cumple con el parámetro turbidez exigidos por la norma internacional (OMS); d) Se puede, del mismo modo, concluir que el humedal *Cyperus alternifolius* puede ser considerado como tratamiento secundario para las aguas residuales grises municipales.

Lovera, Quipuzco, Laureano, Becerra, & Valencia (2006) investigaron: “Adaptación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la comunidad urbana de Lacabamba, región Ancash – Perú, usando tecnologías de humedales artificiales”, cuyas conclusiones fueron: a) A pesar de los cambios realizados por el personal técnico de la universidad para lograr un relativo mejoramiento de tratamiento, los análisis demuestran que las aguas residuales provenientes del tanque mantienen las mismas características de calidad de agua del afluente, por lo que se considera que el tanque trabaja como un pozo ciego, es decir una cámara que solamente recepciona las aguas servidas de las viviendas sin ninguna función de tratamiento; b) Considerando, que para operar el sistema de tratamiento en el humedal, es importante el trabajo que se realice en el mantenimiento del pre tratamiento, por ello, se debe realizar purgas del lodo y del agua residual contenido en el tanque, con el fin de evitar problemas de colmatación en el humedal artificial...; c) El incompleto desarrollo radicular en el suelo, contribuyó a un deficiente desarrollo de bacterias alrededor de las raíces de las plantas, hecho que originó un inadecuado tratamiento aeróbico y un efecto de insolación en el humedal, necesario para mantener una cama libre de variaciones de temperatura (heladas). Se espera que cuando las plantas alcancen una cobertura total en el humedal artificial se obtengan mejores rendimiento en la remoción de la DBO<sub>5</sub> y del nitrógeno amoniacal; d) El humedal artificial en Lacabamba se trabajó con una alimentación continua. Se recomienda una alimentación de manera intermitente con periodos de reposo

de dos o tres días, para favorecer las condiciones aeróbicas y por lo tanto la degradación de materia orgánica y lograr mayor eficiencia de remoción...”

## 2.3. Bases teóricas

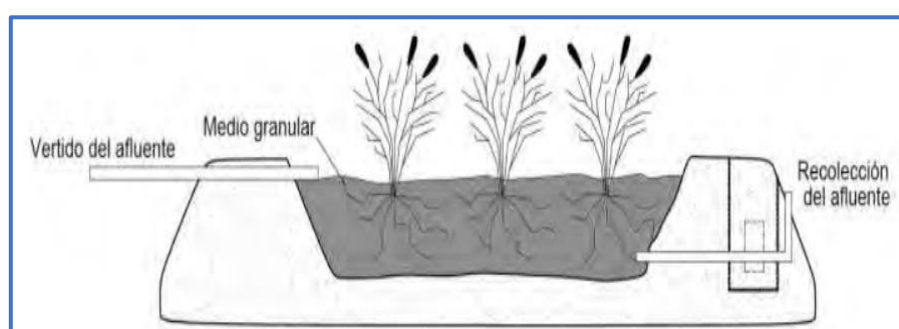
### 2.3.1. Humedales artificiales

Arias y Brix, citados por Sierra & López (2013) definen a los humedales artificiales como:

Áreas que se encuentran saturadas, bien sea por aguas superficiales o subterráneas, y con una frecuencia, duración o profundidad suficiente para mantener especies de plantas predominantes adaptadas a crecer en suelos saturados, con un lecho rocoso (gravas y arenas) y sedimentos finos (arcillas y limos) con vegetación emergente como espadañas, carrizos, juncos, y eneas las cuáles (sic) aprovechan las interacciones con los microorganismos y la atmósfera para remover la materia orgánica. Esta vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas y permitir la transferencia de oxígeno (p.47).

Los humedales artificiales, se utilizan para la depuración de aguas residuales, tanto domésticas como municipales, y tienen las siguientes características: a) Funcionan como sistemas no convencionales que no requieren energía eléctrica ni equipos costosos para su funcionamiento; b) Demandan poca capacitación para la operación y mantenimiento; c) Funcionan como un sistema natural y sus costos de tratamiento son más bajos que los de cualquier tecnología convencional; y. d) Se logra reducir adecuadamente el contaminante presente en el agua residual (Maldonado, 2005).

*Figura 1. Sistema de funcionamiento de un humedal artificial*



Fuente: (Sierra & López, 2013)



Silva, citado por Maldonado (2005) señala que los humedales artificiales son sistemas biológicos que tienen como función fundamental el tratamiento de las aguas residuales, es por ello que se incluyen entre los llamados sistemas naturales de tratamiento. Agrega Silva, que en los humedales es usual utilizar plantas acuáticas emergentes entre las que se encuentran: juncos, enneas y espadañas, dichas plantas proporcionan superficie para el crecimiento de los microorganismos y permiten la filtración y absorción de los contaminantes presentes en el agua residual, además de inhibir el crecimiento de las algas y favorecer la formación de zonas aerobias alrededor de las raíces debido a las características de estas plantas de transportar el oxígeno desde las hojas hasta las raíces.

El manual para municipios eficientes elaborado por el Ministerio del Ambiente – MINAM (2009) sobre los humedales artificiales menciona: a) Es un sistema de tratamiento de aguas residuales de un modelo no estándar, por tanto se debe diseñar de acuerdo a cada realidad urbana; b) Este sistema solo es viable para efluentes de poblaciones pequeñas y medianas, y; c) Si se desea implementar esta tecnología en la sierra del país, se deberá considerar especies vegetales locales y analizar la calidad del efluente para determinar su aprovechamiento.

Además de la depuración de aguas residuales, los humedales artificiales ofrecen otro tipo de beneficios como la restauración de nichos ecológicos, la generación de zonas de amortiguamiento de crecidas de ríos y avenidas y la creación de fuentes de agua en procesos de reutilización de aguas residuales para riego (Arias & Brix, s.f.).

Brix, citado por Miranda (2011), establece que los humedales artificiales pueden utilizarse como tratamiento secundario después de una fosa séptica, como un tratamiento terciario a continuación de una depuración biológica convencional o también puede formar parte de un sistema mixto integrado con lagunas de oxidación.

Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade (2010), citando a Lara, señalan que los humedales tienen tres funciones básicas: a) Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica; b) Utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos, y c) Logran niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de

energía y poco mantenimiento. Estas funciones se generan mediante los procesos de sedimentación, degradación, absorción y volatilización.

Mena (s.f.) afirma que las características de los humedales artificiales los hacen idóneos en sistemas rurales, sin alcantarillado y por tanto sin conexión a estaciones de tratamiento, con grandes extensiones de terreno disponibles.

### **2.3.2. Componentes del humedal**

Los humedales consisten en el diseño de un canal hidráulico que contiene agua residual, substrato, plantas emergentes, comunidades de microbios y los invertebrados acuáticos.

- a. El agua residual. Las aguas residuales son las que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010). Las condiciones de un humedal exige que el fondo del mismo esté formado por una capa impermeable que prevenga la filtración del agua, son ideales terrenos conformados por arcillas, de no ocurrir ello se recomienda utilizar una geomembrana plástica que sirva como impermeabilizante.

Montiel (2015, p. 10) indica que “la hidrología es el factor de diseño más importante porque reúne todas las funciones del humedal y porque a menudo es el factor primario en su éxito o fracaso” debido al área superficial del agua y a la poca profundidad (entre 0.40 m. y 0.60 m.) éste sistema actúa con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración.

- b. Sustratos, sedimentos y restos de vegetación. Los sustratos están constituidos por el suelo, arena, piedra, roca y materiales orgánicos; una parte del substrato se forma con sedimentos y restos de la vegetación, los cuales se acumulan en el humedal debido a la baja velocidad del agua y a la alta productividad típica de este sistema. (Montiel, 2015)

Delgadillo et al. (2010), señalan que una de las características más importantes del sustrato es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él, siendo usual la utilización de suelo de tipo granular (grava con diámetro de 5 mm y con pocos finos).

Mena (s.f.) señala que los sustratos actúan como estructura de soporte de las plantas y como superficie para el crecimiento y desarrollo de la masa microbiana, por tanto el tamaño del mismo cobra importancia, resultando que al ser más pequeño el tamaño mayor será la cantidad de biopelícula, pero mayor, será igual, las probabilidades de obturación de los poros, por lo que recomienda optimizar la selección del tamaño de la partícula.

- c. Vegetación. La vegetación en los humedales artificiales sub superficiales están conformados por plantas como: juncos, carrizos, papiro, achira y otras especies tolerables a la saturación. Tito (2014), citando a Arias, menciona que “el objetivo de la vegetación es suministrar oxígeno a la zona radicular. Las raíces son las estructuras responsables de depurar las aguas residuales ya que asimila y degrada la carga orgánica contaminante con el apoyo de los microorganismos” (p.27).

Von Münch (2009) recomienda usar especies locales o nativas, de preferencia utilizar especies que crecen a orillas de los ríos ya que sus raíces están adaptadas a crecer en condiciones saturadas. Finalmente señala que son idóneas las plantas con un sistema extenso de raíces y rizoma pues soportan fuertes cargas y períodos cortos de sequía.

Mena (s.f.), citando a Pettecrew y Kalff , sobre la vegetación señala que, contribuyen a estabilizar el cauce, influyen en la conductividad hidráulica del terreno, distribuyen y ralentizan la velocidad del agua, lo que favorece la sedimentación de los sólidos suspendidos y aumenta el tiempo de contacto entre el agua y la vegetación.

- d. Microorganismos. Mena (2014) incluye dentro de los microorganismos a las bacterias, hongos y protozoarios, esta biomasa forma una biopelícula alrededor de las partículas del lecho, asimismo señala que el crecimiento de los mismos está directamente relacionado con las transformaciones de los nutrientes y del carbono orgánico.

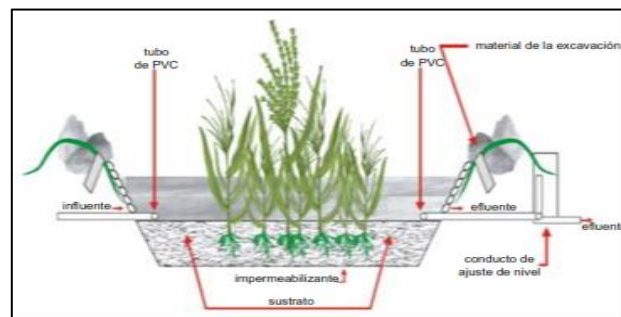
Los humedales son generalmente diseñados para la eliminación de los sólidos suspendidos (SS), materia orgánica (medidos como DBO<sub>5</sub> Y DQO), nutrientes

(nitrógeno y fósforo) aun cuando este último no es necesario cuando el agua tratada es reutilizada para el riego (Von Münch, 2009).

### 2.3.3. Tipos de humedales construidos usados para tratamiento de aguas residuales.

a. Sistemas de flujo libre (FWS). En estos sistemas el nivel del agua está sobre la superficie del medio de soporte, el flujo de agua pasa a través de la piedra o grava y de la vegetación que incluye juncos, cañas, espadañas y eneas, que están sembradas y fijas. Los tallos, hojas, raíces proporcionan el oxígeno al humedal (Silva y Zamora, 2005).

Figura 2. Humedal artificial de flujo superficial (SWF)



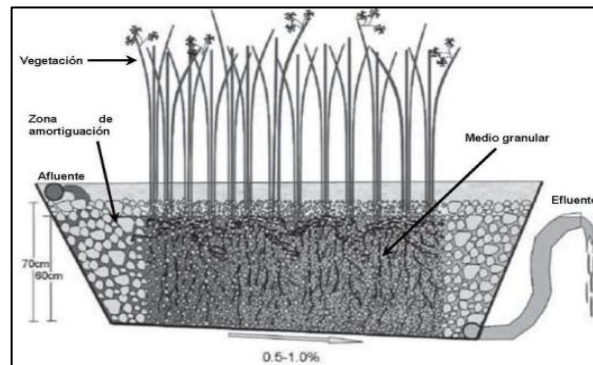
Fuente: Brix H, citado por Silva y Zamora (2005)

b. Sistemas de flujo sub superficial (SFS). Está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado; la vegetación emergente es la misma del sistema de flujo libre. El nivel del agua está por debajo de la superficie de soporte, el agua fluye únicamente a través del lecho de grava que sirve para el crecimiento de la película microbiana, que es la responsable en gran parte del tratamiento que ocurre, las raíces penetran hasta el fondo del lecho (Borrero, citado por Silva y Zamora, 2005).

Los sistemas de flujo sub superficial se clasifican en humedal de flujo tipo horizontal y humedal de flujo tipo vertical.

b.1. En el humedal de flujo sub superficial tipo horizontal el flujo continuo del agua ingresa a lo largo de uno de los laterales; la salida del agua depurada debe ser de fondo y al lado opuesto al de la alimentación. En este sistema es de vital importancia que el lecho permanezca saturado de agua todo el tiempo (Mena, 2014).

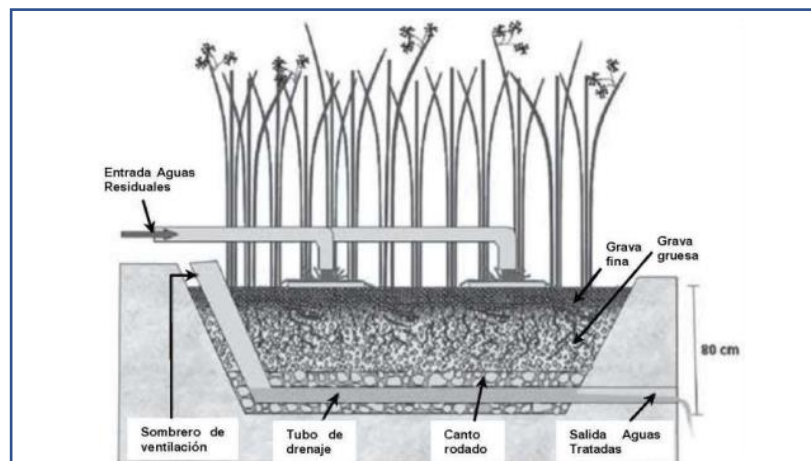
Figura 3. Humedal artificial de flujo sub superficial horizontal



Fuente: Brix H., citado por Silva y Zamora (2005)

b.2. En el humedal de flujo sub superficial vertical la entrada del agua residual, se realiza con una distribución intermitentemente por toda la superficie del humedal, para que no baje la concentración del oxígeno y que prevalezca las condiciones aerobias, en cuanto a la salida se debe realizar a lo largo de todo el fondo (Yalcuka y Ugurlu, citados por Mena, 2014); Mena agrega que “el nivel del agua debe estar bajo para mantener las condiciones insaturadas en el medio poroso para conseguir un mayor contacto entre el agua residual y el aire dentro de los poros, por lo tanto mejora los rendimientos” (2014, p.25).

Figura 4. Humedal artificial de flujo sub superficial vertical



Fuente: Brix H., citado por Silva y Zamora (2005)

Sierra y López (2013) indican, citando a Arias y Brix, que existen algunos valores típicos de parámetros para el diseño de humedales artificiales, pero que no son obligatorios, no obstante brindan información de las condiciones normales de diseño

Tabla 1. Parámetros típicos de diseño

Tipo de flujo	Horizontal	Sub superficial	Vertical
<b>Carga orgánica afluente</b>	<112DBO <sub>5</sub> Kgha <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	<150DBO <sub>5</sub> Kgha <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	<112DBO <sub>5</sub> Kgha <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>
<b>Carga hidráulica</b>	< 5 cm d <sup>-1</sup>	< 5 cm d <sup>-1</sup>	< 5 cm d <sup>-1</sup>
<b>Tiempo de retención hidráulica</b>	5 a 15 días	> 5 días	1-2 días
<b>Área específica</b>	De 5 a 20 m <sup>2</sup>	De 5 a 20 m <sup>2</sup>	De 1 a 5 m <sup>2</sup>
<b>Relación largo ancho</b>	10:1	3:1	3:1
<b>Profundidad</b>	< 0.60 cm	< 0.60 cm	< 0.60 cm
<b>Tipo de relleno</b>	NA	Arena y gravas	Arena y gravas
<b>Vegetación</b>	variable	variable	variable

Fuente: Arias y Brix citados por Sierra y López (2013)

### 2.3.4. Reactor de primer orden de flujo a pistón

Lara & Vera (2005) señalan que una de las hipótesis básicas en la que coinciden distintos autores es considerar a los humedales como reactores biológicos cuyo rendimiento se describe por la cinética de primer orden de flujo pistón; por tanto se debe entender estos conceptos a fin de determinar el funcionamiento de los humedales artificiales.

López & Borzacconi (2009) sobre los reactores biológicos de flujo pistón señalan:

El reactor tubular de flujo en pistón (RTFP) se caracteriza porque el flujo de fluido es ordenado, sin que ningún elemento del mismo sobrepase o se mezcle con cualquier otro elemento situado antes o después de aquel, esto es, no hay mezcla en la dirección de flujo (dirección axial). Como consecuencia, todos los elementos de fluido tienen el mismo tiempo de residencia dentro del reactor.

Como la composición del fluido varía a lo largo del reactor el balance de materia debe realizarse en un elemento diferencial de volumen transversal a la dirección del flujo.

Muñoz (s.f.) sobre este tipo de reactor indica que el tiempo de retención se define como el tiempo entre la entrada y la salida del reactor, donde no hay mezclado longitudinal y calculado de la siguiente manera:

$$t = V/Q$$

donde,

t = tiempo de retención hidráulica

V = volumen del reactor, m<sup>3</sup>

$Q$  = gasto del reactor,  $m^3/s$

Ramalho (1996) señala que en el reactor de flujo pistón, las partículas de fluido atraviesan la vasija sin mezclarse y por ello se descargan en la misma frecuencia en que entran.

El reactor de flujo pistón se usa para modelar transformaciones químicas de compuestos que se transportan en sistemas que parecen tuberías, pueden representar un río o una variedad de conductos naturales o ingeniería a través del cual pasan flujos de líquidos. A medida que el líquido fluye por el reactor, se mezcla en dirección radial, pero la mezcla no ocurre en la dirección del eje, es decir, cada recarga del fluido hecha por el pistón se considera una entidad separada que va bajando por la tubería (Facultad de ciencias químicas, s.f.).

Moreno (s.f.) sobre la cinética de primer orden determina que este orden es la rapidez de reacción proporcional a las concentraciones de los reactantes elevadas a una potencia, de este modo se dice que una reacción es de primer orden cuando la potencia a la cual está elevada la concentración es igual a uno. Se mide la concentración de DBO5 a lo largo del tiempo, en ciertas condiciones de presión y temperatura, comprobándose que la concentración de DBO5 disminuye linealmente con el tiempo.

### **2.3.5. Conductividad hidráulica. Ley de Darcy**

Para el diseño de humedales artificiales sub superficiales horizontales es absolutamente necesario llevar a cabo un dimensionamiento hidráulico por la ley de Darcy para garantizar una gradiente hidráulica suficiente para el lecho del filtro (Von Münch, 2009).

Sánchez (s.f.) resume la experiencia de Darcy, señalando que el caudal que atravesaba el permeámetro (instrumento de experimentación) era linealmente proporcional a la sección y a la gradiente hidráulico (incremento de una variable entre dos puntos del espacio, en relación con la distancia entre dos puntos. Si la variable considerada fuera la altitud de cada punto el gradiente sería la pendiente entre los dos puntos considerados), y que la constante de proporcionalidad era característica de cada arena o material que llenaba el permeámetro.

Así la permeabilidad o conductividad hidráulica es la resistencia que ofrece el suelo, en el caso de humedales artificiales las arenas y gravas, al flujo de agua (Sánchez, s.f.).

Agrega Lara (1999) que sólo si se utiliza grava de tamaño medio y pequeño, si el sistema está diseñado para tener una mínima dependencia del gradiente hidráulico y si las pérdidas y ganancias del sistema están adecuadamente reconocidas, la ley de Darcy puede dar información aproximada a las condiciones hidráulicas en el humedal artificial en el flujo sub superficial tipo horizontal.

Romaña (2014) establece que la ley de Darcy define que la relación entre la velocidad de descarga y el gradiente hidráulico del flujo de agua en arenas es una invariable del material llamada coeficiente de impermeabilidad o conductividad hidráulica y ha sido aplicado para predecir y evaluar el paso de fluidos a través de diferentes granulometrías y características incluidas rocas fracturadas, limos, arcillas, gravas o combinaciones de diferentes materiales.

Hoyos et al., citado por Romaña (2014) define las condiciones que deben cumplir los fluidos y los materiales empleados para aceptar la ley de Darcy, que son:

1. El flujo que pasa a través del material poroso debe ser gravitacional, no se considera el flujo forzado por energía mecánica química, eléctrica, térmica o de otra naturaleza cualquiera.
2. Se debe asegurar que el flujo sea estacionario durante el proceso de flujo.
3. El medio permeable debe estar saturado, sin presencia de aire para evitar la condición de multifluido, o multifases asegurando la valoración de la permeabilidad y el movimiento del fluido por los poros del medio permeable.
4. La estabilidad del agua en los piezómetros se toma como indicador necesario y suficiente para aceptar la condición de flujo laminar.
5. La relación lineal entre la velocidad de descarga y la pérdida de presión por unidad de longitud a través del material, se toma como indicativo de que el flujo a través del medio es laminar.
6. El medio permeable debe ser homogéneo e isotrópico, con el fin de permitir el análisis del flujo unidireccional.
7. Las características físicas y químicas de los medios deben permanecer constantes: el líquido no puede reaccionar con el medio, y la porosidad y la permeabilidad de este no deben cambiar durante el ensayo. Las reacciones químicas pueden dar lugar a cambios en la porosidad, ya sea por cementación o por disolución, y por lo tanto pueden cambiar la permeabilidad del medio. Junto con la aplicación de fuerzas externas, que dan lugar a cambios en la relación de vacíos (p. 6)

De estas condiciones, establece Romaña (2014), que la ley de Darcy se aplica estrictamente sólo a un flujo laminar gravitacional, constante y sin ninguna variación de sus



características físicas y químicas, donde el agua fluye a lo largo de conductos pequeños y sigue los principios generales de la hidráulica.

En relación al comportamiento de los humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal, Sánchez (s.f.) afirma que, tomando como base la ley de Darcy, si el flujo es paralelo a las capas (como la figura 5) la permeabilidad equivalente ( $K_h$ ) se calcula con la siguiente expresión:

$$K_h = \frac{(\sum K_i \cdot b_i)}{B}$$

Donde:

$K_h$  = conductividad hidráulica horizontal equivalente

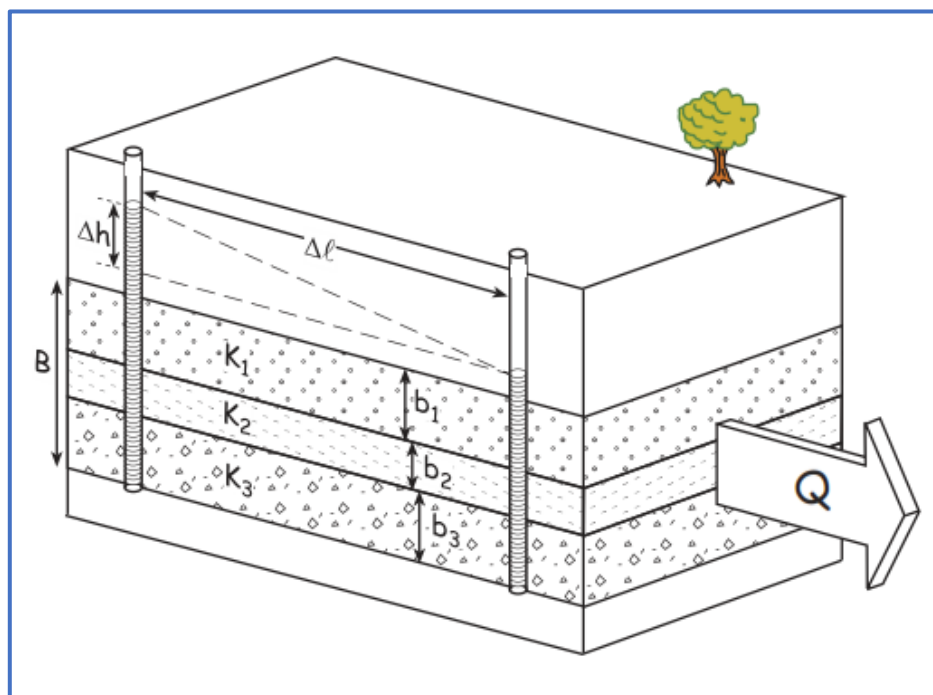
$K_i$  = conductividad hidráulica de cada una de las capas

$b_i$  = espesor de cada una de las capas

$B$  = espesor total, suma de todos los espesores

Esta fórmula equivale a decir que la transmisividad equivalente del conjunto ( $K_h \times B$ ) es igual a la suma de las transmisividades de todas las capas.

Figura 5. Flujo de agua en capas paralelas



Fuente: Sanchez (s.f.)

### 2.3.6. Aguas residuales

La norma OS.090 del Reglamento nacional de edificaciones, regula el desarrollo de proyectos de tratamiento de aguas residuales en los niveles preliminar, básico y definitivo. El objeto del tratamiento de las aguas residuales es mejorar la calidad del mismo para cumplir con las normas de calidad del cuerpo receptor o las normas de reutilización (Perú. Reglamento nacional de edificaciones, 2016).

Romero, citado por Tito (2015) señala que las aguas residuales son aguas ya utilizadas mediante una actividad humana que contienen contaminantes perjudicando el medio ambiente en especial al recurso hídrico.

Baron (2009) afirma que las aguas residuales por razones de salud pública no pueden ser desechados vertiéndolas sin tratamiento en lagos o cuerpos de agua. Los materiales inorgánicos como la arcilla, sedimentos y otros residuos se pueden eliminar por métodos mecánicos o químicos, no obstante si el material a eliminar es de naturaleza orgánica se debe tratar usando microorganismos que oxiden y conviertan la materia orgánica en CO<sub>2</sub>.

Agrega Baron, que el tratamiento de aguas residuales da como resultado la eliminación de microorganismos patógenos, evitando que éstos lleguen a ríos o a otras fuentes de abastecimiento. A través de procesos aerobios o anaerobios, que son procesos de tratamiento secundario, se tratan biológicamente las aguas residuales.

A continuación se definen las aguas residuales, tanto domésticas como municipales, según el Reglamento nacional de edificaciones del Perú.

a. Las aguas residuales. “Agua que ha sido usada por una comunidad o industria y que contiene material orgánico o inorgánico disuelto o en suspensión” (Perú. Reglamento nacional de edificaciones, 2016, pág. 190)

b. Agua residual doméstica “Agua de origen doméstico, comercial e institucional que contiene desechos fisiológicos y otros provenientes de la actividad humana” (Perú. Reglamento nacional de edificaciones, 2016, pág. 190)

c.- Agua residual municipal. El reglamento nacional de edificaciones (2016, p.190) define las aguas residuales municipales así:

Mezcla de aguas residuales domésticas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial, siempre que estos cumplan con los requisitos para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado.

### **2.3.6.1. Características y parámetros de las aguas residuales domésticas**

#### **2.3.6.1.1. Características físicas**

Moret (2014) indica las características físicas de las aguas residuales:

##### **a. Temperatura**

Las aguas residuales domésticas liberan energía, lo que las hace distintas a las aguas no contaminadas, por tanto tienen una temperatura más alta, dependiendo además del lugar geográfico de ubicación, siendo el mismo un parámetro uniforme.

Metcalf & Eddy, citados por Saavedra (2017) señalan que la temperatura es un parámetro importante por su efecto en las velocidades de las reacciones químicas y de la actividad bacteriana, en la concentración del oxígeno disuelto, así como en la vida acuática de las fuentes receptoras.

##### **b. Sólidos**

Los sólidos están conformados por los contaminantes presentes en el agua, de acuerdo a la asociación que tengan con el medio líquido se pueden encontrar en forma suspendida, en dispersión coloidal y en solución total. Existe una clasificación por su tamaño y condición en sólidos suspendidos y sólidos disueltos; por sus características químicas en sólidos volátiles y sólidos fijos (Saavedra, 2017).

b.1. Sólidos totales. Es el residuo que permanece al evaporar una muestra de agua a una determinada temperatura.

b.2. Sólidos suspendidos y sólidos disueltos. Siguiendo a Sperling (citado por Saavedra, 2017) afirma que los sólidos que permanecen después de filtrar una muestra de agua se denominan sólidos suspendidos, y los sólidos que filtran se

denominan sólidos disueltos. Los sólidos suspendidos representan a la materia en suspensión y los sólidos disueltos a la materia disuelta.

b.3. Sólidos volátiles y sólidos fijos. Romero Rojas (citado por Saavedra, 2017) señala que los sólidos que se pierden al calentar una muestra de agua a una determinada temperatura (temperatura mayor a la que se someten los sólidos totales) se denominan sólidos volátiles. Los que permanecen en la muestra se denominan sólidos fijos. Los sólidos volátiles representan a los sólidos orgánicos y los sólidos fijos a los sólidos inorgánicos.

b.4. Sólidos sedimentables. Son aquellos sólidos que sedimentan por gravedad en una muestra de agua a un tiempo determinado. Comprenden una fracción de la materia suspendida de partículas  $> 10 \mu\text{m}$ . Los sólidos que no sedimentan comprenden a la materia disuelta y coloidal, y también a una fracción de la materia suspendida de partículas  $< 10 \mu\text{m}$ . (Romero Rojas, citado por Saavedra, 2017).

### **c. Turbiedad**

Es el parámetro físico que mide la transparencia de cierto volumen de agua, esta transparencia señala Rigola (citado por Tito, 2015) depende del contenido de partículas en suspensión, así de esta forma cuando el agua está sucia presenta sólidos en suspensión en consecuencia aumenta la turbidez, su medida se expresa por unidades nefelométricas de turbidez (NTU).

### **d. Color y olor**

Con estos parámetros se evalúa la condición del agua residual del desagüe, siendo ésta fresca o séptica. Metcalf & Eddy, citados por Saavedra (2017), afirman que el agua residual reciente es de color gris con un olor relativamente desagradable. A medida que se descompone la materia orgánica los niveles de oxígeno se reducen y el agua se vuelve negra y el olor se vuelve ofensivo.

## **2.3.6.1.2. Características químicas**

### **a. Materia orgánica**

Rich, citado por Moret (2014) señala que este parámetro adquiere importancia debido a que la desoxigenación genera la muerte de los seres aerobios en los cuerpos de agua receptores. Las formas de denominación más conocidas son DBO<sub>5</sub> Y DQO.

a.1. DBO<sub>5</sub> (Demanda biológica de oxígeno a los cinco días). Indica la cantidad de oxígeno disuelto que se consume en un agua residual durante 5 días a 20°C y reproduce el consumo de oxígeno que se ocasionaría con ese vertido en el medio natural, estos datos sirven para dimensionar las instalaciones del tratamiento y medir el rendimiento de algunos de estos procesos.

a.2. DQO (Demanda bioquímica de oxígeno). Indica la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente toda la materia orgánica contenida en la muestra de agua. Rich, citado por Moret (2014) afirma que el equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse se mide utilizando un fuerte agente químico oxidante en medio ácido (dicromato potásico). Los valores de DQO de un agua residual son, por lo general, mayores que la DBO<sub>5</sub> porque es mayor el número de compuestos que pueden oxidarse por vía química que biológicamente.

## **b. Materia inorgánica**

Metcalf, citado por Moret (2014) señala que la materia inorgánica es el oxígeno disuelto (OD) que indica el grado de contaminación del agua. Es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios. La cantidad presente de esta materia se rige por la solubilidad del gas; la presión del gas en la atmósfera, la temperatura y la pureza del agua.

## **c. Nitrógeno y fósforo**

Sperling, citado por Saavedra (2017) indica:

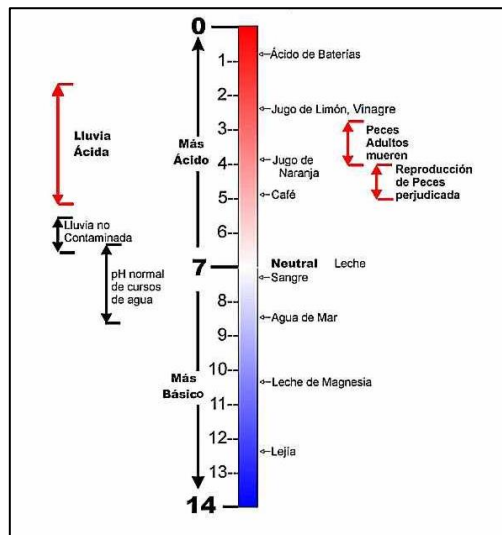
En el agua residual, el nitrógeno total comprende al nitrógeno orgánico y a las formas de nitrógeno inorgánico que incluyen al nitrógeno amoniacal (producto de la primera etapa de descomposición del nitrógeno orgánico) que comprende al amonio y al amoníaco, a los nitritos (fase intermedia de la oxidación del amoníaco) y a los nitratos (producto final de la oxidación del amoníaco). En el agua residual cruda, tanto los nitritos como nitratos se encuentran casi ausentes (p.35).

En cuanto al fósforo, este se encuentra en su mayoría bajo la forma de fosfatos. El fósforo total comprende a los fosfatos orgánicos y a los fosfatos inorgánicos (ortofosfatos y polifosfatos). Los fosfatos orgánicos se encuentran en su mayoría en forma particulada en vez de soluble. Estos provienen de los desechos fisiológicos. Los fosfatos inorgánicos se encuentran en forma soluble y provienen principalmente de los detergentes y otros productos químicos del hogar.

#### d. pH

El pH es una unidad de medida que representa la concentración del ion hidrógeno. El valor óptimo para el crecimiento de los organismos y considerado como pH normal oscila entre 6,5 y 7,5. El agua residual con una concentración adversa de ion hidrógeno es difícil de tratar por medios biológicos y si la concentración no se altera antes de la evacuación, el efluente puede alterar la concentración de las aguas naturales (Metccalf, citado por Moret, 2014).

Figura 6. Escala de pH



Fuente: <http://www.idrc.ca/aquatox/aquagifs/pHsp-99.jpg>

### 2.3.6.1.3. Características biológicas

#### a. Bacterias

Romero, citado por Moret (2014) sobre las bacterias indica:

Existen bacterias (anaerobias) que consumen el oxígeno procedente de los sólidos orgánicos; otras (aerobias) que necesitan oxígeno del agua para poder alimentarse y

respirar, a éstas les sirve el oxígeno libre del agua (molecular) proveniente del oxígeno disuelto (OD); de otro lado, las bacterias facultativas, son aquéllas que pueden adaptarse al medio opuesto; por último se encuentran las bacterias coliformes, éstas sirven como indicadores de contaminación, y patógenos (p. 20)

#### **b. Coliformes fecales**

Moret (2014) citando a Romero sobre los coliformes indica que son microorganismos que se encuentran en los excrementos humanos en proporciones muy grandes. Su presencia en el agua es considerada como un índice evidente de la ocurrencia de contaminación fecal y por lo tanto de contaminación con organismos patógenos. Estos coliformes no sólo provienen de los excrementos humanos sino también puede originarse en animales de sangre caliente y fría y en el suelo.

### **2.3.7. Tratamiento de las aguas residuales en el Perú**

#### **2.3.7.1. Importancia del reuso de aguas residuales**

Las aguas residuales domésticas que se generan en los centros poblados requieren el tratamiento apropiado, previo a su reuso o disposición final, con la finalidad de proteger el ambiente y la salud de la población. El Ministerio del Ambiente del Perú trata de plantear la mejor combinación de opciones tecnológicas, que permitan el tratamiento de las aguas contaminadas, minimizando el uso de recursos disponibles, con el mayor beneficio ambiental y al menor costo económico (Ministerio del ambiente-MINAM, 2009).

Mara (citado por Saavedra, 2017, p. 23) sobre el tratamiento de aguas residuales indica:

La selección de las diferentes tecnologías disponibles a emplear en el tratamiento de las aguas residuales depende de varios factores. Generalmente, cuando las poblaciones son muy grandes y no hay disponibilidad de terreno, como es el caso de las mega-ciudades, las tecnologías más sofisticadas se visualizan como una buena opción a pesar de sus costes de implementación así como de su consumo energético eléctrico. Por otra parte, las tecnologías cuyos procesos son netamente naturales y sólo requieren de energía solar, si bien sus costes en aspectos como construcción, operación y mantenimiento son reducidos, requieren de grandes extensiones de terreno. En muchos de los países en vías de desarrollo estas últimas

tecnologías se presentan como la mejor opción en la mayoría de los casos, debido a que la disponibilidad de terreno en estos lugares es mayor. Además, en estas zonas las condiciones climáticas que estos sistemas requieren son generalmente muy favorables.

### **2.3.7.2. Niveles de tratamiento de aguas residuales**

Los niveles de tratamiento de aguas residuales en el Perú, para fines prácticos han sido divididos en tratamiento preliminar, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario (Perú. Reglamento nacional de edificaciones, 2016).

#### **a. Tratamiento preliminar.**

El tratamiento preliminar o pretratamiento tiene como objetivo la retención de sólidos gruesos y sólidos finos con el fin de facilitar el tratamiento posterior, así como proteger las instalaciones y el funcionamiento de los procesos del tratamiento. Esta etapa se encarga de preparar y acondicionar el agua residual a través de la retención de plásticos, grasas y de la sedimentación de elementos de alta densidad como gravas y arenas (Ministerio del ambiente-MINAM, 2009).

#### **b. Tratamiento primario**

El reglamento nacional de edificaciones (2016, p. 93) define que el objetivo de este tratamiento es: “la remoción de sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables, para disminuir la carga en el tratamiento biológico. Los procesos para este nivel pueden ser: tanques Imhoff, tanques de sedimentación y tanques de flotación”.

Este tratamiento permite remover material en suspensión, excepto material coloidal o sustancias disueltas presentes en el agua. Siendo así la remoción permite quitar entre el 60 al 70% de sólidos suspendidos totales y hasta un 30% de la DBO<sub>5</sub> orgánica sedimentable presente en el agua residual (Ministerio del ambiente-MINAM, 2009).

#### **c. Tratamiento secundario**

La norma de diseño en el Perú considera como tratamiento secundario los procesos biológicos con una eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> soluble mayor a 80%, pudiendo ser



biomasa en suspensión o biomasa adherida e incluye los siguientes sistemas: lagunas de estabilización, lodos activados, filtros biológicos y módulos rotatorios de contacto (Perú. Reglamento nacional de edificaciones, 2016).

Mara, citado por Saavedra (2017) indica que en la mayoría de los casos, el tratamiento biológico se lleva a cabo con suministro de oxígeno, ya sea de manera natural o artificial, con el objetivo de favorecer condiciones aerobias en la biodegradación.

#### **d. Tratamiento terciario**

Masters & Ela citados por Saavedra (2017) señalan que el tratamiento terciario se implementa para eliminar contaminantes no removidos por el tratamiento primario o secundario. Ambos niveles no son suficientes para extraer nutrientes, inorgánicos disueltos (sales, metales), o sustancias orgánicas biológicamente resistentes (refractarias). Cuando el grado del tratamiento fijado de acuerdo con las condiciones del cuerpo receptor o de aprovechamiento sea mayor que el que se pueda obtener mediante el tratamiento secundario, se deberán utilizar métodos de tratamiento terciario o avanzado (Perú. Reglamento nacional de edificaciones, 2016).

#### **2.3.7.3. Sistemas naturales de tratamiento**

Sobre estos sistemas Saavedra (2017, p.18-19) indica:

Los sistemas naturales del tratamiento (también conocidos como sistemas blandos por su bajo consumo energético en comparación a los sistemas convencionales como lodos activados, filtros percoladores, etc.) son sistemas que comprenden aquellos procedimientos en los que el efecto depurador principal es suministrado por componentes del medio natural, como vegetación, suelo, luz solar, microorganismos, etc., sin la intervención de agentes artificiales (ej. equipo electromecánico). Se caracterizan por ser simples de construir, operar y mantener, y por tanto, su coste en estos aspectos es reducido.

Asimismo, pueden llegar a ser más eficientes que los sistemas convencionales. Entre estos sistemas destacan las lagunas de estabilización y los humedales artificiales. Las lagunas de estabilización se caracterizan por obtener efluentes de excelente calidad microbiológica por lo que pueden reutilizarse directamente en

la agricultura sin necesidad de incluir unidades de desinfección en la operación. En cuanto a los humedales artificiales, son muy conocidos por su capacidad para remover determinados contaminantes como nutrientes y metales pesados. Tanto las lagunas de estabilización como los humedales artificiales emplean la energía solar a través de los procesos biológicos naturales de la fotosíntesis en sustitución de la energía convencional.

### **2.3.8. Normas de calidad del agua en el Perú y reutilización de agua residual**

En el Perú la ley N° 29338 – Ley de recursos hídricos, regula, entre otros, el vertimiento de agua residual, y señala en el artículo 79° lo siguiente:

La Autoridad Nacional autoriza el vertimiento del agua residual tratada a un cuerpo natural de agua continental o marina, previa opinión técnica favorable de las Autoridades Ambiental y de Salud sobre el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA-Agua) y Límites Máximos Permisibles (LMP). Queda prohibido el vertimiento directo o indirecto de agua residual sin dicha autorización.

En caso de que el vertimiento del agua residual tratada pueda afectar la calidad del cuerpo receptor, la vida acuática asociada a este o sus bienes asociados, según los estándares de calidad establecidos o estudios específicos realizados y sustentados científicamente, la Autoridad Nacional debe disponer las medidas adicionales que hagan desaparecer o disminuyan el riesgo de la calidad del agua, que puedan incluir tecnologías superiores, pudiendo inclusive suspender las autorizaciones que se hubieran otorgado al efecto. En caso de que el vertimiento afecte la salud o modo de vida de la población local, la Autoridad Nacional suspende inmediatamente las autorizaciones otorgadas.

Corresponde a la autoridad sectorial competente la autorización y el control de las descargas de agua residual a los sistemas de drenaje urbano o alcantarillado

Asimismo, en el artículo 82° de la ley 29338, sobre la reutilización de agua residual, señala:

La Autoridad Nacional, a través del Consejo de Cuenca, autoriza el reúso del agua residual tratada, según el fin para el que se destine la misma, en coordinación con la autoridad sectorial competente y, cuando corresponda, con la Autoridad Ambiental Nacional.

Por otro lado, el reglamento de la ley 29338, aprobado mediante D.S. 01-2010-AG, establece sobre la reutilización de aguas residuales lo siguiente:

Podrá autorizarse el reúso de aguas residuales únicamente cuando se cumplan con todas las condiciones que se detallan a continuación:

- a. Sean sometidos a los tratamientos previos y que cumplan con los parámetros de calidad establecidos para los usos sectoriales, cuando corresponda.

- b. Cuente con la certificación ambiental otorgada por la autoridad ambiental sectorial competente, que considere específicamente la evaluación ambiental de reuso de las aguas.
- c. En ningún caso se autorizará cuando ponga en peligro la salud humana y el normal desarrollo de la flora y fauna o afecte otros usos.

Al respecto, estos articulados establecen que, para el vertimiento de agua residual se debe cumplir con los estándares de calidad ambiental (ECA) y límites máximos permisibles (LMP) que son regulados por el D. S. N° 004-2017-MINAM; en este último cuerpo normativo se establecen los estándares de calidad ambiental para agua en sus distintas categorías.

Tratándose esta investigación de explorar y describir el funcionamiento de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales que permita reutilizar las mismas, debe indicarse que esta reutilización se exploró para la producción de vegetales como la paja toquilla y riego de vegetales, en tal sentido, se presenta los estándares de calidad ambiental para agua y límites máximos permisibles para esta categoría N° 3.

*Tabla 2. Estándares de calidad ambiental y límites máximos permisibles*

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>D1: Riego de vegetales</b>	<b>D2: Bebida de animales</b>
<b>Aceites y grasas</b>	mg/L	5	10
<b>Bicarbonatos</b>	mg/L	518	**
<b>Cianuro Wad</b>	mg/L	0.1	0.1
<b>Cloruros</b>	mg/L	500	**
<b>Color (b)</b>	Color verdadero Escala Pt/Co	100 (a)	100 (a)
<b>Conductividad</b>	(uS/cm)	2500	5000
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)</b>	Mg/L	15	15
<b>Demanda Química de oxígeno (DQO)</b>	mg/L	40	40
<b>Detergentes (SAAM)</b>	mg/L	0.2	0.5
<b>Fenoles</b>	mg/L	0.002	0.01
<b>Fluoruros</b>	mg/L	1	**

<b>Nitratos (NO<sub>3</sub>-N) + Nitritos (NO<sub>2</sub>-N)</b>	mg/L	100	100
<b>Nitritos (NO<sub>2</sub>-N)</b>	mg/L	10	10
<b>Oxígeno disuelto (valor mínimo)</b>	mg/L	> 4	> 5
<b>Potencial de hidrógeno (pH)</b>	Unidad de pH	6.5-8.5	6.5-8.4
<b>Sulfatos</b>	mg/L	1000	1000
<b>Temperatura</b>	°C	5	5

Fuente: D.S.004-2017-MINAM

En efecto, en las localidades del norte del Perú, luego de producido un fenómeno hidrometeorológico, se producen temporadas largas de sequía, con consecuencias, tan igual de devastadoras que las épocas de lluvia, donde se afecta la economía de las comunidades rurales dedicadas en su mayoría a actividades agropecuarias. De allí que es necesario desde el campo de la investigación, presentar soluciones para el tratamiento de aguas residuales domésticas con bajo costo de operación y mantenimiento que permitan la reutilización del agua.

Winpenny & Heinz (2013), establecen que la reutilización impide que se viertan aguas residuales sin tratar en los sistemas costeros y de aguas subterráneas, lo cual trae beneficios para el turismo y los ecosistemas, agregando que los nutrientes presentes en el agua tratada podrían permitir un ahorro en fertilizantes.

Sobre el reuso de agua tratada Winpenny & Heinz (2013) señalan:

La reutilización en agricultura de las aguas residuales tratadas es una opción que se está estudiando y adoptando cada vez más en regiones con escasez de agua. Muchas regiones del mundo están experimentando crecientes problemas de déficits hídricos. Esto se debe al crecimiento implacable de la demanda de agua frente a unos recursos hídricos estáticos o en disminución y a las periódicas sequías debidas a factores climáticos. Además de estas presiones se estima que un calentamiento global de 2°C, como consecuencia del cambio climático, podría llevar a una situación en la que de uno a dos mil millones de personas no cuenten con agua suficiente para satisfacer sus necesidades de consumo, higiene y alimentarias (p. 1)

Mena (2014), citando a Cepis, afirma que el agua residual tratada se convierte en un efluente esencial para los cultivos, porque en algunos casos no se utiliza agroquímicos. Agrega que estas aguas contienen en promedio cinco gramos de nitrógeno por cada gramo

de fósforo, además de oligoelementos que son fundamentales para la actividad agrícola, además la materia orgánica de esta agua mejora la textura del suelo.

Se ha demostrado, que el rendimiento de cultivos regados con fuentes de agua residual tratada demuestra superioridad que los cultivos regados con agua superficial, por lo que es concluyente que la utilización de humedales artificiales proporciona una alternativa de tratamiento de aguas residuales domésticas para la reutilización en fines agrícolas (Mena, 2014).

#### **2.3.8.1. Marco legal para reutilización de aguas residuales**

En el Perú, los ministerios de Vivienda, del Ambiente y de Agricultura han expedido una serie de Resoluciones Ministeriales y Decretos Supremos que norman el tratamiento de aguas residuales, en esta sección hacemos un resumen de ellas y que se tomarán en cuenta en esta investigación.

- a. Resolución Ministerial N° 176-2010-Vivienda. Norma los lineamientos de política para la promoción del tratamiento para el reúso de las aguas residuales domésticas y municipales en el riego de áreas verdes urbanas y periurbanas (Perú. R.M. 176-2010-VIVIENDA, 2010).
- b. Norma OS – 090 Tratamiento de aguas residuales. La norma OS-090 fue aprobada mediante D.S. N° 011-2006-VIVIENDA y modificada por D.S. N° 022-2009-VIVIENDA; y regula el reúso de aguas residuales debidamente tratadas para un propósito específico (Perú. Reglamento nacional de edificaciones, 2016).
- c. D.S. N° 04-2017-MINAM. Norma que compila las disposiciones aprobadas mediante el D.S. 002-2008- MINAM y el D.S. 015-2015-MINAM y aprueba los estándares de calidad ambiental (ECA) para el agua (Perú. D.S. N° 004-2017-MINAM, 2017).
- d. Ley de Recursos hídricos N° 29338. Norma el vertimiento del agua residual y uso del agua (Perú. Ley N°29338 - Ley de recursos hídricos, 2009).

- e. Ley general del Ambiente N° 28611. Norma las medidas de seguridad donde de manera directa es prohibido la descarga de sustancias contaminantes que provoquen degradación de los ecosistemas o alteren la calidad del ambiente, sin previamente ser tratada, siendo la autoridad competente la encargada de aplicar las medidas de control y muestreo para velar por el cumplimiento de esta disposición (Perú. Ley N° 28611 - Ley general del ambiente, 2005)
- f. D.S. 003-2010-MINAM. Norma que aprueba los límites máximos permisibles (LMP) para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales (Perú. D.S. N° 003-2010-MINAM, 2010)

*Tabla 3. Límites máximos permisibles para efluentes de ARD*

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>LMP para vertidos a cuerpos de agua</b>
<b>Aceites y grasas</b>	mg/L	20
<b>Coliformes termolerantes</b>	NMP/100 mL	10,000
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)</b>	Mg/L	100
<b>Demanda Química de oxígeno (DQO)</b>	mg/L	200
<b>Potencial de hidrógeno (pH)</b>	Unidad de pH	6.5-8.5
<b>Sólidos totales en suspensión</b>	mL/L	150
<b>Temperatura</b>	°C	<35

Fuente: D.S. 003-2010-MINAM

- g. R.M. 273-2013-VIVIENDA. Norma que aprueba el protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales (Perú. R.M. N° 273-2013-VIVIENDA, 2013).

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1.- Tipo y diseño de la investigación**

##### **3.1.1. Tipo de investigación**

La presente investigación es de tipo cualitativa.

Se partió de una idea que va acotándose, se delimitó espacialmente (distrito de Buenos Aires – Morropón – Piura), temporalmente (año 2017) y conceptualmente (humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales domésticas), que una vez delimitados se derivaron en objetivos y preguntas de investigación; se ocupó de aspectos específicos externos del objeto de estudio y el marco teórico que guía la investigación se elaboró sobre la base de la revisión de la literatura (Hernández, Fernández & Batista, 2014).

Se evidenció también el uso intenso de la revisión de la literatura; que, en el presente trabajo facilitó la formulación del problema de investigación; los objetivos de la investigación; la operacionalización de la variable; la construcción del instrumento para recoger los datos; el procedimiento de recolección de datos y el análisis de los resultados (Hernández, Fernández & Batista, 2014).

En la etapa de la recolección de datos se requirió de la concurrencia del análisis para identificar a los indicadores de la univariable. Además, se utilizó como instrumento de recolección de datos la revisión de documentos (Hernández, Fernández & Batista, 2014).

La recolección y el análisis no son acciones que se manifestaron sucesivamente; sino, simultáneamente al cual se sumó el uso intenso de las bases teóricas: diseños de humedales artificiales; con los cuales se vinculó las características hidráulicas, constructivas y ambientales de los mismos (Hernández, Fernández & Batista, 2014).

##### **3.1.2.- Nivel de investigación**

La presente investigación se situó en el nivel exploratorio – descriptivo. Fue exploratorio porque el estudio ha permitido familiarizar a los investigadores con el fenómeno de los

humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal en el tratamiento de aguas residuales domésticas, permitió aclarar conceptos y principalmente se estableció preferencias para posteriores investigaciones, asimismo se reunió información de las posibilidades reales y prácticas para desarrollar una investigación de gran envergadura. (Sánchez & Reyes, 1998).

Fue descriptiva porque se ha medido y descrito las características hidráulicas, constructivas y ambientales de la univariable humedales artificiales en una circunstancia temporo – espacial determinada en las unidades de análisis. Se recogió información sobre el estado actual del fenómeno y nos llevó al conocimiento actualizado del mismo tal como se presenta (Sánchez & Reyes, 1998).

### **3.1.3.- Diseño de investigación**

La presente investigación se elaboró con el diseño no experimental – transversal de tipo exploratorio – descriptivo.

Fue no experimental porque no se manipuló la univariable humedales artificiales, sino que se ha estudiado en su contexto natural, en consecuencia los datos reflejan la evolución natural de los eventos, ajeno a la voluntad de los investigadores (Hernández, Fernández & Batista, 2014).

Ha sido transversal porque la recolección de datos para determinar la variable, proviene de un fenómeno cuya versión corresponde a un momento específico del desarrollo del tiempo (Hernández, Fernández & Batista, 2014)

Asímismo se ha trabajado el diseño exploratorio porque se ha conocido la variable de estudio y de tipo descriptivo porque se ha indagado la incidencia en cómo se manifiesta la variable de estudio (Valderrama, 2015).

### **3.2.- Población de estudio**

La población de estudio está conformada por todas las investigaciones experimentales de diseños de humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal en el tratamiento de aguas residuales domésticas implementados en comunidades rurales con climas



tropicales y sub tropicales. La delimitación de la población ha seguido los criterios de inclusión y exclusión, recomendados por Vara (2015) y son:

*Tabla 4. Criterios de inclusión y exclusión de la población*

DESCRIPCIÓN	CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN
Tema de investigación	Aplicación de humedales artificiales.
Tipo de investigación	Experimental
Tipo de humedal artificial	De flujo sub superficial tipo horizontal.
Tratamiento	Aguas residuales domésticas.
Localización	Viviendas o predios ubicados en climas tropicales y/o subtropicales.
Características	Que contenga el diseño hidráulico, constructivo y ambiental de un humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal.
Año de elaboración	Realizados entre los años 2014-2017.

Fuente: Elaboración propia

Considerando estos criterios, la población está conformada por investigaciones experimentales de aplicación de diseño de humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal aplicados en comunidades rurales de clima tropical y sub tropical realizados entre los años 2014 y 2017.

Marco muestral: Lista de investigaciones ofrecida por los sitios web <http://site.ebrary.com/lib/bibliounhsp/home.action> y <https://dialnet.unirioja.es/>.

### **3.3.- Tamaño de muestra**

El presente trabajo, al tratarse de una investigación cualitativa de un diseño exploratorio-descriptivo, ha seleccionado tres casos o unidades de análisis pues no se pretende que los casos sean estadísticamente representativos de la población (Hernández, Fernández & Batista, 2014).

Se ha hecho uso de la muestra no probabilística o también llamada dirigida orientado por las características de la investigación. La selección ha seguido un proceso cuidadoso y controlado para tomar como muestra tres casos con características especificadas en el planteamiento del problema (Hernández, Fernández & Batista, 2014). Este muestreo es

intencional y se caracterizó por un esfuerzo deliberado de obtener muestras representativas mediante la inclusión en la muestra de grupos típicos (Valderrama, 2015).

Bajo estos criterios la muestra está conformada por tres unidades de análisis y son:

*Tabla 5. Unidades de análisis - Investigaciones*

<b>AUTOR</b>	<b>AÑO</b>	<b>TITULO</b>
<b>Núñez, R.</b>	2016	Tratamiento de aguas residuales a nivel familiar con Humedales Artificiales de flujo sub superficial horizontal, mediante la especie macrófita emergente <i>Cyperus Papyrus</i> (papiro)
<b>Mena, P.</b>	2014	Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo sub superficial horizontal Pasto, Colombia
<b>Tito, R.</b>	2015	Tratamiento de aguas residuales grises domésticas con la especie paraguítas <i>cyperus alternifolius</i> en humedales artificiales, urbanización Zárate – San Juan de Lurigancho 2015

Fuente. Elaboración propia

### **3.4.- Técnica de recolección de datos**

La recolección de datos se realizó con las siguientes técnicas:

- a) La observación. Se empleó esta técnica que consistió en observar atentamente el caso, se tomó información y se registró para su posterior análisis (Vara, 2015).
- b) El análisis de contenido. Se empleó esta técnica para la descripción objetiva y sistemática de las investigaciones que nos ha permitido reducir y sistematizar los datos. Además es una técnica de codificación donde se ha reducido grandes datos textuales a categorías que se han representado en tablas (Valderrama, 2015).
- c) Asimismo se utilizó la técnica de categorización que ha permitido la reducción y organización de los datos a unidades llamadas categorías, estas son: Consideraciones hidráulicas, constructivas y ambientales (Valderrama, 2015).

El procedimiento de investigación se ha realizado de la siguiente manera:

1. Se adquirió y revisó la base de datos de las páginas web <http://site.ebrary.com/lib/bibliounhsp/home.action> y <https://dialnet.unirioja.es/>; de donde se seleccionaron las tres unidades de análisis.

2. Se practicó la revisión documental, que se empleó para revisar exhaustivamente las investigaciones unidades de análisis con el objeto de explorar cómo es el funcionamiento de un humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal y cuáles son sus características hidráulicas, constructivas y ambientales, utilizándose para estos fines una guía de revisión documental (Vara, 2015).
3. Se elaboró guías documentales considerando las siguientes variables: autor, año, título, muestra, diseño de investigación, tipo de humedales artificiales y su mecanismo de funcionamiento, conclusiones del diseño hidráulico, constructivo y ambiental; y, lugar de ubicación (Vara, 2015).
4. Finalmente, se elaboró una matriz de organización y categorización de datos, donde se muestran los resultados.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Análisis, interpretación y discusión de resultados

La presente investigación, de nivel exploratorio descriptivo ha servido para caracterizar y describir las características de la univariable humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Para el análisis de los resultados se elaboró las guías de revisión documental de las tres unidades de análisis que son las tres investigaciones seleccionadas en la muestra dirigida y son:

##### 4.1.1. Unidad de análisis 1.

*Cuadro 1. Guía de revisión documental 1*

Variable	Definición
<b>Autor</b>	Reyna Núñez Burga
<b>Año</b>	2016
<b>Título</b>	Tratamiento de aguas residuales a nivel familiar con Humedales Artificiales de flujo sub superficial horizontal, mediante la especie macrófita emergente <i>Cyperus Papyrus</i> (papiro)
<b>Diseño de investigación</b>	Experimental
<b>Lugar de ubicación</b>	Comunidad rural “Cruz Verde” – Hualgayoc.
<b>Institución - universidad</b>	Universidad Peruana Unión

Fuente: Elaboración propia

Lectura. La investigación del cuadro 1 está referida al experimentado realizado para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una vivienda ubicada en la comunidad rural de Cruz Verde y tuvo como propósito determinar la eficiencia de remoción de DBO y SST. De la revisión de las bases teóricas se seleccionó esta unidad de análisis, debido a que se ha desarrollado en una comunidad rural con clima desde 19 °C y se adaptaría al clima sub tropical del distrito de Buenos Aires – Morropón – Piura.

##### 4.1.2. Unidad de análisis 2.

*Cuadro 2. Guía de revisión documental 2*

VARIABLE	DEFINICIÓN
<b>Autor</b>	Paolo Alexander Mena Cabrera
<b>Año</b>	2014

<b>Título</b>	Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo sub superficial horizontal
<b>Diseño de investigación</b>	Experimental
<b>Lugar de ubicación</b>	Pasto - Colombia
<b>Institución - universidad</b>	Universidad de Buenos Aires

Fuente: Elaboración propia

Lectura. La investigación del cuadro 2 tuvo como propósito evaluar la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas implementando un sistema de humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal en el colegio Comfamiliar Siglo XXI, sede campestre en el corregimiento San Fernando en el Municipio de Pasto - Colombia. Este sistema puede adaptarse al clima tropical del distrito de Buenos Aires – Morropón – Piura, porque este experimento se realizó en una región que soporta lluvias durante los períodos de verano.

#### 4.1.3.- Unidad de análisis 3

*Cuadro 3. Guía de revisión documental 3*

<b>VARIABLE</b>	<b>DEFINICIÓN</b>
<b>Autor</b>	Rolando Tito Cantoral
<b>Año</b>	2015
<b>Título</b>	Tratamiento de aguas residuales grises domésticas con la especie paraguaitas cyperus alternifolius en humedales artificiales, urbanización Zárate – San Juan de Lurigancho 2015
<b>Diseño de investigación</b>	Experimental
<b>Lugar de ubicación</b>	San Juan de Lurigancho - Lima
<b>Institución - universidad</b>	Universidad César Vallejo

Fuente: Elaboración propia

Lectura. La investigación del cuadro 3 tuvo como objetivo determinar el porcentaje de remoción de los contaminantes en el humedal artificial de las aguas residuales domésticas de una vivienda ubicada en San Juan de Lurigancho - Lima. De la revisión de las bases teóricas se seleccionó esta unidad de análisis de humedal artificial de flujo sub superficial, debido a que la respuesta el medio ambiente ha sido positivo porque previene la proliferación de mosquitos.

#### **4.2.- Presentación de resultados.**

En esta sección se presentan los resultados de cómo es el funcionamiento de humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas que se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, explicado en las investigaciones de las unidades de análisis. Del mismo modo se describe cuáles son sus características hidráulicas, constructivas y ambientales.

Este sistema de tratamiento de aguas residuales no es un modelo estándar, por tanto, tal como recomienda el Ministerio del ambiente-MINAM (2009) se debe diseñar de acuerdo a cada realidad urbana. Asimismo de los resultados encontrados se advierte que solo es viable para afluentes de comunidades rurales con poblaciones pequeñas y medianas, y que cuenten con terrenos de gran extensión disponibles.

Es de precisar que si se desea implementar esta tecnología en comunidades rurales que registren altas temperaturas, como las que experimenta el distrito de Buenos Aires en la provincia de Morropón - Piura, se deberá considerar el análisis de utilización de especies vegetales locales y analizar la calidad del efluente para determinar su aprovechamiento.

Este sistema, para su correcto funcionamiento necesita que previamente las aguas residuales hayan obtenido un tratamiento primario, ya sea por medio de fosas sépticas, filtros, lagunas, o cajas de retención de sólidos. Para una correcta aplicación se tiene que tomar en cuenta este parámetro.

Los resultados obtenidos, de la revisión documental dan muestra que existe eficiencia de los humedales artificiales en la remoción de demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos y nitrógeno, que permitirá el reuso del agua tratada en actividades agropecuarias. Finalmente mediante una matriz de categorización se describen las características hidráulicas, constructivas y ambientales de este sistema.

#### 4.2.1. Resultados del funcionamiento de humedales artificiales

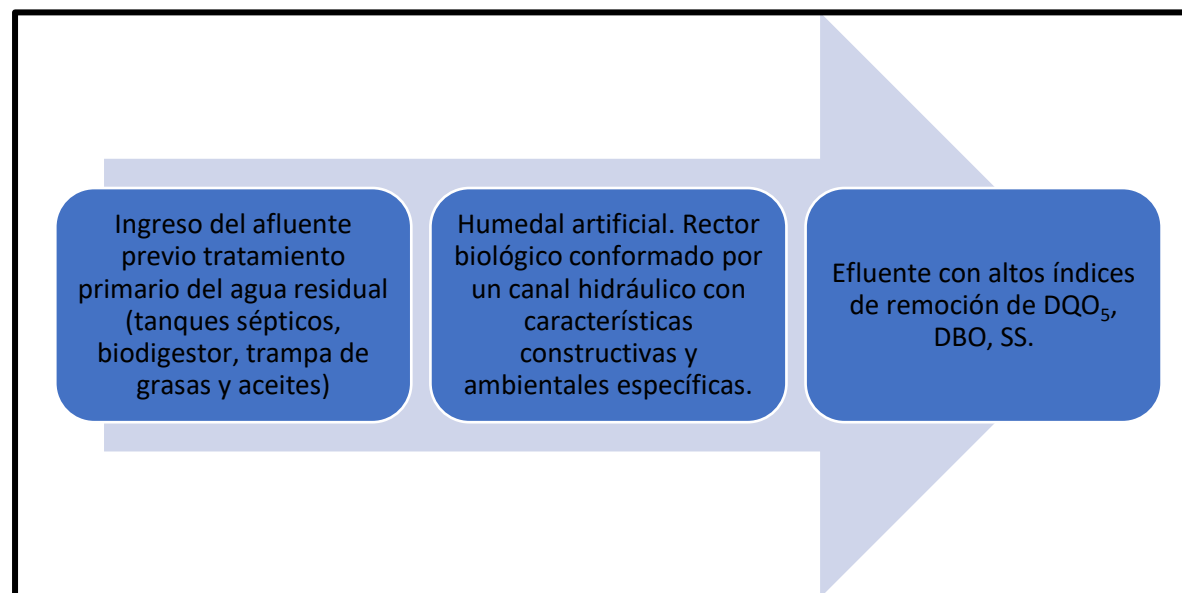
Cuadro 4. Matriz de organización y categorización. Funcionamiento de los humedales artificiales

Investigación	Unidad de análisis 1	Unidad de análisis 2	Unidad de análisis 3
<b>Resumen</b>	El propósito de la investigación fue determinar la eficiencia de remoción de las aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal. Se investigó el diseño del humedal, cómo se construye y qué datos arrojó.	Los mecanismos de humedal artificial pueden tratar con efectividad niveles significativas de DBO y DQO, sólidos suspendidos, nitrógenos, niveles significativos de metales. Evita que el agua subterránea potencialmente utilizada para consumo humano sea contaminada por altos contenidos de estos nutrientes.	El objetivo fue determinar el porcentaje de remoción de los contaminantes en el humedal artificial con la especie vegetal cyperus alternifolius. El monitoreo y análisis de los parámetros de tratamiento de aguas se realizó de acuerdo al protocolo difundido por el Ministerio de Vivienda del Perú.
<b>¿Necesita tratamiento primario?</b>	Si, se utilizó un tratamiento primario previo con biodigestor.	Si, se utilizó un tratamiento primario previo con tanque séptico.	Si, se utilizó una caja de registro – trampa de grasas, aceites y sólidos.
<b>Ubicación geográfica</b>	Comunidad rural Cruz Verde - Hualgayoc	Corregimiento San Fernando – Pasto – Colombia.	San Juan de Lurigancho - Lima
<b>Clima de la localidad de investigación</b>	19°C – 25°C	22°C – 38°C	19°C – 30.5°C
<b>Tipo de diseño de humedal artificial</b>	Flujo sub superficial tipo horizontal	Flujo sub superficial tipo horizontal	Flujo sub superficial tipo horizontal
<b>Tratamiento de aguas residuales</b>	Domésticas	Domésticas	Domésticas
<b>Remoción de DBO<sub>5</sub> – Relación Afluente - Efluente</b>	285.1 mg/L a 12.38 mg/L	21.3 mg/L a 1.3 mg/L	90.5 mg/L – 15,0 mg/L
<b>Porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub></b>	95.66 %	93.90 %	83.43 %
	95.66 %	93.90 %	83.43 %
<b>Remoción de DQO – Relación Afluente - Efluente</b>	683 mg/L – 30.45 mg/L	426 mg/L - 64.0 mg/L	180 mg/L – 80 mg/L
<b>Porcentaje de remoción de DQO</b>	95.54 %	84.98 %	55.56 %
<b>Remoción de sólidos – relación Afluente - Efluente</b>	400 mg/L – 180 mg/L	5 mg/L – 3 mg/L	68 mg/L – 6.0 mg/L
<b>Porcentaje de remoción de SS</b>	55.00 %	40.00 %	91.18 %
<b>Operación</b>	Es importante contar con un plan de operación enfocado en asegurar que el flujo	Mediante la comparación de tecnologías se puede afirmar que este sistema presenta	Se debe inspeccionar que no haya insectos en el humedal y se debe evitar el mal olor.

	de agua alcance todas las partes del humedal. Efectuar lavados periódicos al lecho filtrante para evitar la colmatación.	ventajas frente a otros sistemas debido al bajo costo de operación.	
<b>Mantenimiento</b>	Es importante mantener un crecimiento vigoroso de la vegetación, evaluando la cosecha cada 6 meses.	Debido al bajo costo de mantenimiento este sistema es recomendable e idóneo en comunidades rurales.	Se debe recolectar periódicamente los restos vegetales como hojas muertas cada 15 días. Debe realizarse limpieza 2 veces al año.
<b>Conclusiones</b>	Se demostró una efectiva remoción de en todos los parámetros utilizados. No requiere de personal capacitado y sus costos al ser bajos permiten su aplicación en comunidades rurales.	Los valores de remoción de los parámetros cumplen con lo indicado en la norma para el control de vertimiento de Colombia. Debido a la baja complejidad de funcionamiento se recomienda utilizar en casas campestres, fincas, entre otros.	El humedal artificial con la especie <i>Cyperus alternifolius</i> logró remover los contaminantes físicos – químicos de las aguas residuales domésticas.

Fuente: Unidades de análisis 1,2 y 3.

Figura 7. Proceso de funcionamiento de un humedal artificial

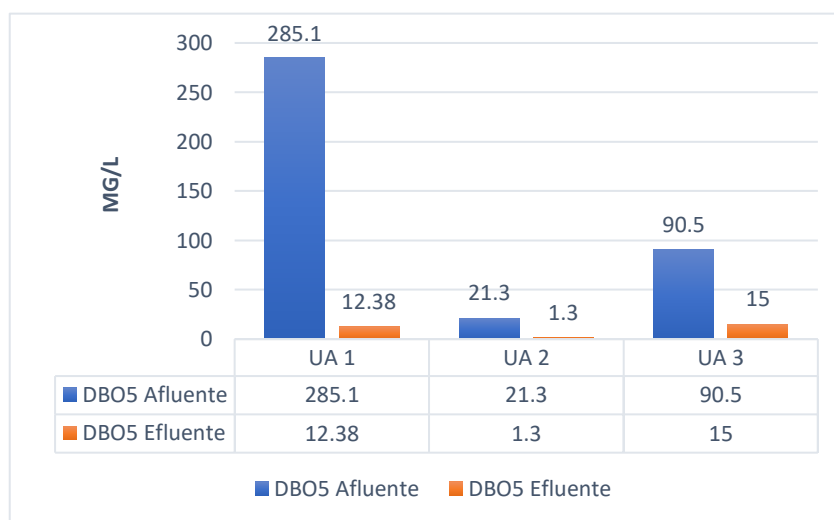


Fuente: Unidades de análisis 1, 2 y 3.



Lectura. El cuadro 4 revela que el sistema de humedal artificial de flujo sub superficial horizontal es una propuesta óptima para aplicar en comunidades rurales de clima tropical, y reduce con efectividad los niveles significativos de DBO<sub>5</sub> y DQO, sólidos suspendidos, en las aguas residuales domésticas. En la figura 8 se simplifica el funcionamiento de un humedal artificial, y se revela que en todas las unidades que las aguas residuales antes de ingresar al sistema de humedal artificial deben contar con un tratamiento primario, que puede ser a través de fosas sépticas, lagunas de oxidación o con sedimentación de lodos, trampa de grasas, biodigestores, etc, con la finalidad de retener los plásticos y desechos que puedan generar un mal funcionamiento del humedal. El humedal está conformado con un canal hidráulico con características constructivas y ambientales específicas que se describen en el capítulo 5 de esta investigación.

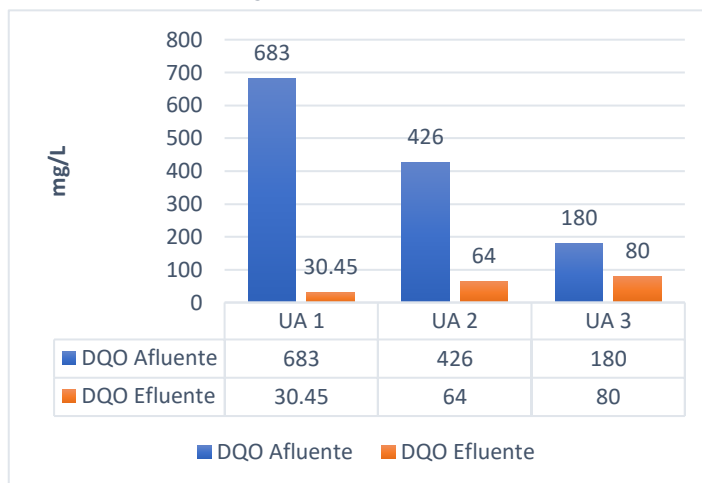
Figura 8. Eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> en las unidades de análisis de humedales artificiales



Fuente: Unidades de análisis 1, 2 y 3.

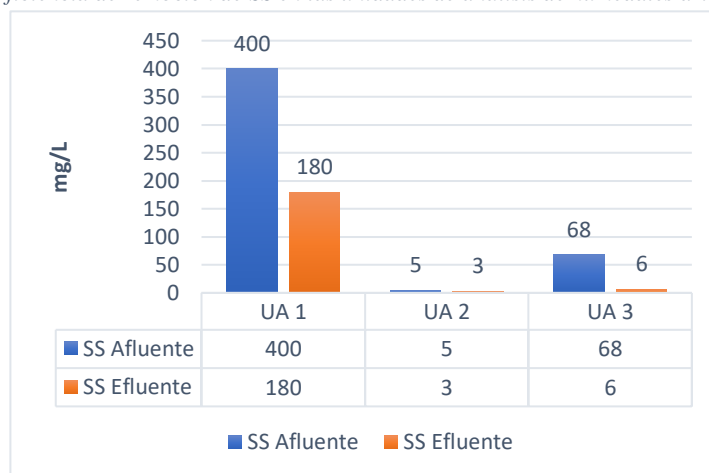
Tal como se observa en la figura 8, la eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> en las tres investigaciones resulta ser muy eficiente, con valores superiores al 83%. Estos altos índices de remoción genera la eliminación de malos olores, especialmente en sistemas de tratamiento que se encuentran cerca de los centros poblados como es el caso del distrito de Buenos Aires – Morropón – Piura. En el caso de los investigaciones en el Perú (unidades de análisis 1 y 3) los valores obtenidos se encuentran por debajo de los valores establecidos por la normativa que regula los estándares de calidad ambiental; asimismo en el caso de la experiencia realizada en Colombia cumple con los límites exigidos en ese país.

Figura 9. Eficiencia de remoción de DQO en las unidades de análisis de humedales artificiales



Fuente: Unidades de análisis 1, 2 y 3.

Figura 10. Eficiencia de remoción de SS en las unidades de análisis de humedales artificiales



Fuente: Unidades de análisis 1, 2 y 3.

Tal como se observa en la figuras 9 y 10, la eficiencia de remoción de DQO Y SS en las tres investigaciones resulta ser muy eficiente, con valores superiores al 83% lo que revela que este sistema de humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal, con un nulo gasto de energía eléctrica y con un mantenimiento sencillo, es apta para comunidades rurales que no cuentan con acceso al sistema de alcantarillado, y pueden servir como modelo para dar solución a los objetivos planteados en la pregunta de esta investigación.

Durante el funcionamiento de los humedales en las unidades de análisis no se percibió la presencia de malos olores ni la presencia de vectores como mosquitos y roedores, lo que indica que es un sistema adecuado para implementarlo en viviendas rurales donde hay presencia continua de población.

#### 4.2.2. Resultados de las características hidráulicas, constructivas y ambientales de humedales artificiales

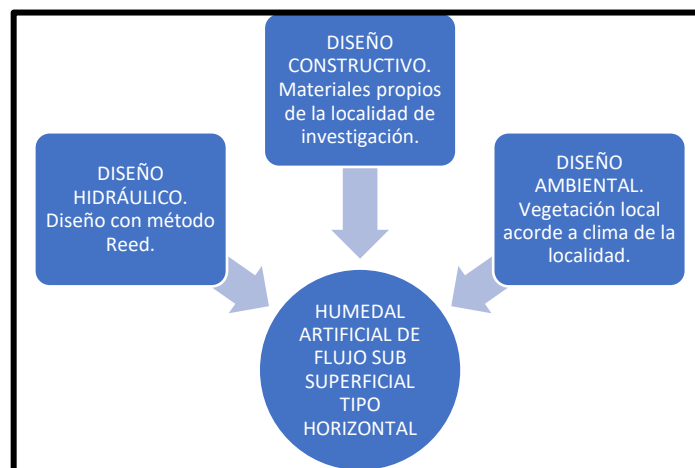
Cuadro 5. Matriz de organización y categorización. Características hidráulicas, constructivas y ambientales de los humedales artificiales

Investigación	Unidad de análisis 1	Unidad de análisis 2	Unidad de análisis 3
<b>Características hidráulicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caudal de diseño = 0.03 m<sup>3</sup>/día</li> <li>- Población = 5 habitantes</li> <li>- Carga hidráulica = 285.1 gr /m<sup>3</sup></li> <li>- Área superficie requerida =0.71 m<sup>2</sup></li> <li>- Tiempo de retención hidráulica= 3.2d</li> <li>- Relación ancho largo=1:2</li> <li>- Conductividad hidráulica = 25000m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día</li> <li>- Pendiente del fondo= 1%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caudal de diseño = 28 m<sup>3</sup>/día</li> <li>- Población = 700 habitantes</li> <li>- Área superficie requerida =120m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup></li> <li>- Tiempo de retención hidráulica= 1,3d</li> <li>- Relación ancho largo= 1: 3 (6,34;19,02m)</li> <li>- Conductividad hidráulica = 25000m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día</li> <li>- Pendiente del fondo= 1%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caudal de diseño = 0.036 m<sup>3</sup>/día</li> <li>- Población = 5 habitantes</li> <li>- Área superficie requerida = 0.728m<sup>2</sup></li> <li>- Tiempo de retención hidráulica= 2.305 d</li> <li>- Relación ancho largo= 1:3 (2.69m;8,07)</li> <li>- Conductividad hidráulica =25000m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día</li> <li>- Pendiente del fondo= 1%</li> </ul>
<b>Características constructivas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trabajos preliminares. Ubicación del humedal en la vivienda, limpieza del terreno</li> <li>- Trazo, nivel y replanteo.</li> <li>- Movimiento de tierras. Se realizó la excavación respetando el diseño de las medidas del humedal y compatible con el gradiente hidráulico seleccionado para el diseño.</li> <li>- Impermeabilización: se utilizó tres capas de plástico (2 finos y un grueso) para evitar la contaminación a fuentes de agua subterránea.</li> <li>- Estructuras de entrada y salida: Tubería plástica, con una “t” ubicada sobre la línea cada 3 metros. Se necesita una caja de registro de 0.30 x 0.60 m.</li> <li>- Grava: no específica</li> <li>- Profundidad del humedal: 0.60 m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trabajos preliminares. Se determinó la localización del humedal y el replanteo con las labores de topografía.</li> <li>- Movimiento de tierras. Excavación manual con las medidas del diseño del humedal.</li> <li>- Aplicación de solados de concreto f'c 140 Kg/cm<sup>2</sup>.</li> <li>- Estabilización de taludes mezcla arena – cemento.</li> <li>- Las instalaciones sanitarias se realizaron con tubería de 4”,6” y 8”.</li> <li>- Se impermeabilizó el suelo con una geomembrana recubierta con geotextil para evitar el contacto con el lecho filtrante.</li> <li>- Para el tratamiento de aguas se utilizó grava de río hasta la altura total del humedal de 25 mm de diámetro.</li> <li>- Alrededor de los caños de entrada y salida se colocó grava entre 50 y 100 mm con una longitud de 0.6 m sobre el perímetro de dicha estructura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trabajos preliminares. Se determinó la ubicación del humedal dentro de la vivienda.</li> <li>- Movimiento de tierras. Se excavó de acuerdo a las dimensiones del humedal.</li> <li>- Se encofró las paredes laterales del humedal.</li> <li>- Recubrimiento: impermeabilizante con plástico grueso color azul.</li> <li>- Pendiente de 1%</li> <li>- En la estructura de entrada se utilizó una tubería de 2” en forma de “T” con orificios cada 0.25 m igual que en la salida.</li> <li>- Se colocó una válvula de control en la tubería del afluente y efluente.</li> <li>- Profundidad del humedal: 0.60 m</li> </ul>

		- Profundidad del humedal: 0.60 m	
<b>Características ambientales</b>	- Vegetación: <i>Cyperus papyrus</i> (Papiro). Las plantas han sido transplantadas.	- Vegetación: <i>Scirpus californicus</i> (compers) Totora. Una planta por m2. Las plantas han sido transplantadas.	- Vegetación: <i>Cyperus Alternifolius</i> (paraguita). Las plantas han sido transplantadas

Fuente: Unidades de análisis 1, 2 y 3.

Figura 11. Propiedades de un humedal artificial



Fuente: Unidades de análisis 1, 2 y 3.

Lectura. El cuadro 5 revela que existen similitudes en las características hidráulicas, constructivas y ambientales presentadas en las tres unidades de análisis. Se advierte que el área superficie requerida varía de acuerdo al caudal de diseño, asimismo que la conductividad hidráulica es la misma, así como la pendiente en el fondo del humedal.

Por otro lado, en las características constructivas se revela que la profundidad del humedal recomendado es de 0.60 m, asimismo la utilización de la grava de 25 mm como material poroso, y el uso de cajas de registro para instalación de válvulas de control.

Finalmente, en las características ambientales, es común la utilización de la totora el papiro y el paraguaitas, que resultan ser vegetación idónea para el correcto funcionamiento del sistema de humedales artificiales de flujo sub superficial horizontal.

Se reveló, también de los resultados, que no existe un diseño estándar de humedal artificial, por el contrario, en las tres unidades de análisis, se advirtió que las relaciones entre el ancho y el largo del humedal son de 3 a 1 y 2 a 1, pero no se verificó en qué tipo de canal hidráulico existe mejor funcionamiento.

Existen investigaciones, que, aunque no fueran materia de análisis, de su revisión, se reveló que tratan aguas residuales domésticas con sistemas híbridos, que utilizan tanto los diseños de flujo superficial tipo horizontal como vertical, esta implementación mixta permite un mayor rendimiento en la remoción de nitrógeno, fósforo y metales pesados.

Asimismo, es de indicar, que no existen detalles técnicos en las tres unidades de análisis, que permitan identificar distancias de colocación de determinado tipo de grava, o distancia de colocación de tuberías. Así, tampoco, se reveló si es necesario diseñar superficies libres de sustrato dentro del humedal, que ayude a una correcta circulación del agua residual. En tal sentido en los experimentos futuros se deberá diseñar un manual de implementación de construcción de humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal.

## CAPÍTULO V

### DISEÑO HIDRÁULICO, CONSTRUCTIVO Y AMBIENTAL DE HUMEDAL ARTIFICIAL

Lara & Vera (2005) afirman que no existe un criterio único para el diseño de un humedal de flujo subsuperficial, habiéndose acreditado la teoría en considerarlos como reactores biológicos, cuyo rendimiento se puede aproximar al descrito por la cinética de primer orden de flujo pistón, siendo la tarea determinar las dimensiones del humedal y estimar las eficiencias de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno, fósforo, sólidos totales y coliformes fecales.

#### 5.1. Diseño hidráulico de un humedal sub superficial de flujo horizontal

Larriva & Gonzáles (2017) afirman que esta tecnología se muestra como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales en comunidades pequeñas o sistemas rurales ya que no son costosos ni requieren altos consumos energéticos, además la operación y mantenimiento de estos no requieren de personal especializado ni procesos complicados; señalan, asimismo que tradicionalmente este diseño se ha centrado en modelos biológicos dejando a un segundo plano los aspectos hidráulicos como las relaciones geométricas, características del flujo, tiempos de retención hidráulico, tipo de mezcla, etc., los cuales influyen en las eficiencias que pueden lograrse en el proceso biológico que ocurre en cada tipo de reactor.

En tal sentido, este capítulo resumió los principales criterios hidráulicos dentro de la valoración del funcionamiento del reactor con el objetivo de asegurar las remociones esperadas de los distintos contaminantes biológicos.

Espinoza (2014) describe las principales ecuaciones de diseño para el dimensionamiento de humedales artificiales de flujo sub superficial, con base a la remoción a DBO5 ( Demanda bioquímica de oxígeno).

Tabla 6. Ecuaciones de diseño para humedales artificiales

Autor / referencia	Remoción de DBO
Reed et al	$A_s = \frac{Q \ln \left( \frac{c_0}{c_e} \right)}{K_T(h)(\eta)}$

Kadlec et al	$A_s = \frac{Q}{K_A} \ln \left( \frac{C_o - C^*}{C_e - C^*} \right)$
EPA (1988)	$A_s = \frac{Q \ln \left( \frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T(h)(\eta)}$ $A_t = \frac{Q}{K_s * S}; \text{ (Ley de Darcy)}$ $a = \frac{A_t}{h}; l = \frac{A_s}{a}$ $t = \frac{V_v}{Q} = \frac{l * a * h}{Q}$
Romero	$C_e = C_o * e^{(-K_R * t)}$ $A_s = \frac{V}{y}; \quad V = Q * t$ $A_t = \frac{Q}{K_s * S}; \text{ (Ley de Darcy)}$ $a = \frac{A_t}{y}; \quad l = \frac{A_s}{a}$
RAS 2000	$A_s = \frac{Q \cdot (\ln C_o - \ln C_e)}{(K_T \cdot h \cdot n)}$ $A_s \leq 0,032 \text{ m}^2/(\text{L/d})$ $A_t = \frac{Q}{K_s * S}; \text{ (Ley de Darcy)}$

Fuente: Espinoza (2014)

Donde:

- Ce: Concentración de DBO, N, P Y SST en el efluente, (mg/L)
- Co: Concentración de DBO, N, P Y SST en el afluente, (mg/L)
- C\*: Concentración de fondo, (g/m<sup>3</sup>) (9.8 mg/l)
- As: Área superficial del humedal, (m<sup>2</sup>)
- T: Temperatura (°C)
- Kt: Constante de primer orden dependiente de la temperatura, (d<sup>-1</sup>)
- n=e: Porosidad promedio del sistema, en fracción decimal. 0.65 a 0.75
- h: Profundidad promedio del sistema, (m)
- CH: Carga hidráulica, (m<sup>3</sup>/ha.d)
- Q: Caudal (m<sup>3</sup>/d)
- KA: Constante de primer orden dependiente de la temperatura, (d<sup>-1</sup>)<sup>10</sup>
- At: Área de la sección transversal del lecho, (m<sup>2</sup>)
- Ks: Conductividad hidráulica, (m/d)
- S: Pendiente del lecho, (fracción)
- a: Ancho del humedal, (m)
- l: Longitud del humedal, (m)
- y: Profundidad del agua, (m)
- t: Tiempo de retención hidráulico, (d)
- V: Volumen humedal, (m<sup>3</sup>)
- Vv: Volumen de vacíos, (m<sup>3</sup>)

$K_R$ : Constante de remoción, ( $d^{-1}$ )  
 $K_{20}$ : Constante de primer orden a 20°C, ( $d^{-1}$ )

a) Cálculo de  $K_T$  según Reed (citado por Espinoza, 2014)

$$K_{20} = 1,104 d^{-1}$$

$$K_T = K_{20} (1,06)^{T-20} \text{ (Para remoción de DBO)}$$

b) Cálculo de  $K_A$  según Kadlec (citado por Espinoza, 2014)

$$K_A = (K_{A,20}) \Theta^{T-20}$$

$K_{A,20}$ : constante de reacción a 20°C, según la tabla siguiente:

Tabla 7. Cálculo de  $K_A$

Parámetro	$K_{A,20}$ , m/año	$\Theta$	Concentración de fondo, $C'$ , mg/L
DBO	117	1,057	3
SST	43,4	1	6
Nitrógeno orgánico	35	1,05	1,5
Nitrógeno amoniacal	34	1,05	0
Nitrógeno NOx	50	1,05	0
Nitrógeno total	10	1,05	1,5
Fósforo total	9,1	1,09	0
Coliformes totales	100	1,003	200 u/100 mL

Fuente: Espinoza (2014)

c) Valores  $K_T$ ,  $K_s$  y  $n$  para ecuaciones de la EPA (citado por Espinoza, 2014)

$$K_T = K_{20} (1,1)^{T-20}$$

$K_{20}$ : Se determina mediante la tabla siguiente:

Tabla 8. Características del medio para sistemas de flujo sub superficial

Tipo de medio	Tamaño del grano, mm	Porosidad ( $\eta$ )	Conductividad hidráulica ( $K_s$ ), m/d	$K_{20}$
Arena media	1	0,42	420	1,84
Arena gruesa	2	0,39	480	1,35
Gravilla arenosa	8	0,35	500	0,86

Fuente: Espinoza (2014)

d) Valores  $K_R$ ,  $K_s$  y  $\eta$ , además de criterios de diseño según Romero (citado por Espinoza, 2014)



$$K_R = K_0 (37,31 * n^{4,4172})$$

$K_0 = 1,839 \text{ d}^{-1}$  para aguas residuales municipales

$K_0 = 0,198 \text{ d}^{-1}$  para aguas residuales industriales con DQO alta

$$C_e = C_o * e^{-K_R * t}$$

Los valores de conductividad hidráulica  $K_s$  y la porosidad  $\eta$ , además de algunos criterios de diseño, se determinan en las siguientes tablas:

Tabla 9. Características típicas del medio para humedales de flujo sub superficial

Medio	Tamaño efectivo, mm	Porosidad ( $\eta$ )	Conductividad hidráulica ( $K_s$ ), m/d
Arena media	1	0,30	500
Arena gruesa	2	0,32	1,000
Arena y grava	8	0,35	5,000
Grava media	32	0,40	10,000
Grava gruesa	128	0,45	100,000

Fuente: Espinoza (2014)

Tabla 10. Criterios para humedales de flujo sub superficial

Criterio	Valor
Tiempo de retención (t), d	3-4(DBO), 6-10(N); 4-15
Carga hidráulica superficial (CH), M3/ha.D	470-1,870
Carga orgánica (CO), Kg DBO /ha.d	< 112
Carga SST, Kg /ha.d	390
Profundidad del agua (y), m	0.3 – 0.6
Profundidad del medio (h), m	0,45 – 0,75
Control de mosquitos	No requiere
Programa de cosecha	No requiere
Calidad esperada del efluente DBO/SST/NT/PT/, mg/L	< 20/20/10/5

Fuente: Espinoza (2014)

e) Cálculo de  $K_T$ , según RAS 2000, citado por Espinoza (2014)

El diseñador debe seleccionar una metodología de diseño que garantice el correcto funcionamiento del sistema teniendo en cuenta los siguientes criterios: conductividad hidráulica, granulometría y flujo sumergido para todas las condiciones de caudales.

El valor de  $K_T$  se puede calcular por la ecuación siguiente:

$$K_T = 1,104 (1,06)^{T-20}$$

Lara & Vera (2005), para el diseño hidráulico, recomiendan utilizar las ecuaciones de cálculo para el modelo de Reed et al y al modelo de Kadlec et al, ya que son los modelos más utilizados internacionalmente en la construcción de la mayoría de humedales.

### 5.1.1. Cálculos de diseño hidráulico de unidad de análisis 1

A continuación se muestran los cálculos de la unidad de análisis 1 para el diseño hidráulico.

Estimación del caudal

Población: 5 habitantes en la vivienda

Método: volumétrico

$$Q = V \times T$$

Donde:

Q = caudal de ingreso (m<sup>3</sup>/seg)

V = volumen (litros)

T = tiempo (minutos)

$$Q = 0.03 \text{ m}^3/\text{día}$$

Carga orgánica = 285,1 gr / m<sup>3</sup>

- Cálculo de la carga

$$C = Q \times \text{DBO}_5$$

$$C = 0,03 \text{ m}^3/\text{día} \times 285,1 \text{ gr}/\text{m}^3$$

$$C = 7,13 \text{ gr} / \text{día}$$

- Cálculo del área superficial

$$A_s = C / K_s$$

Donde:

K<sub>s</sub> = carga hidráulica 10 gr/m<sup>2</sup> x día

$$A_s = 7.13 \text{ gr} / \text{día} / 10 \text{ gr} / \text{m}^2 \times \text{día}$$

$$A_s = 0.71 \text{ m}^2$$

$$A = 0.60$$

$$l = 1.20$$

## 5.2. Diseño constructivo de un humedal sub superficial de flujo horizontal

Según la exploración de las tres unidades de análisis de la presente investigación se determinó las características constructivas que debe tener un humedal artificial para un correcto funcionamiento.

EPA (1993) sobre los aspectos constructivos establece que se debe seleccionar el fondo del lecho, sugiriendo un máximo de 60 cm; tipo de estructura y tamaño (se recomienda usar roca dura e insoluble de 2-5 pulgadas de diámetro).

RAS (citado por Espinoza, 2014) establece algunos aspectos constructivos:

- Los humedales artificiales de flujo sub superficial deben localizarse aguas debajo de un tanque séptico.
- La conductividad utilizada para el diseño nunca puede ser mayor que la del medio de soporte. Se debe reducir dicha conductividad en un orden de magnitud para tener en cuenta los efectos de atascamiento asociados a la retención de sólidos en los humedales.
- Profundidad. Se recomienda que la profundidad media del lecho sea 0,6 m y que la profundidad en la entrada no debe ser menor de 0,3 m. Con profundidades mayores a 0,6 m, las raíces más profundas y los rizomas empiezan a debilitarse. Se recomienda que los lechos se construyan con al menos 0,5 m de cabeza sobre la superficie del lecho.
- Se recomienda no usar la pendiente de fondo para ganar cabeza pues se corre el riesgo de dejar la entrada seca cuando hayan condiciones de bajo caudal. Usar máximo 1% de pendiente.
- Usar piedra entre 50 y 100 mm para una longitud de 0,6 m alrededor del influente distribuidor y de las tuberías colectoras del efluente para reducir el taponamiento.
- Usar solo sustrato lavado para eliminar los granos finos que puedan taponar los poros del sustrato y, posiblemente, causen flujo superficial.
- Construir la berma al menos 150 mm por encima del sustrato y al menos 150 mm por encima de la superficie de la tierra.
- Ancho mínimo de la berma = 0.60 m
- Tiempo de llenado del lecho con agua = 1 - 2 días

De acuerdo a lo investigado en las tres unidades de análisis se determinó las partidas que forman parte de la construcción de un humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal y son:

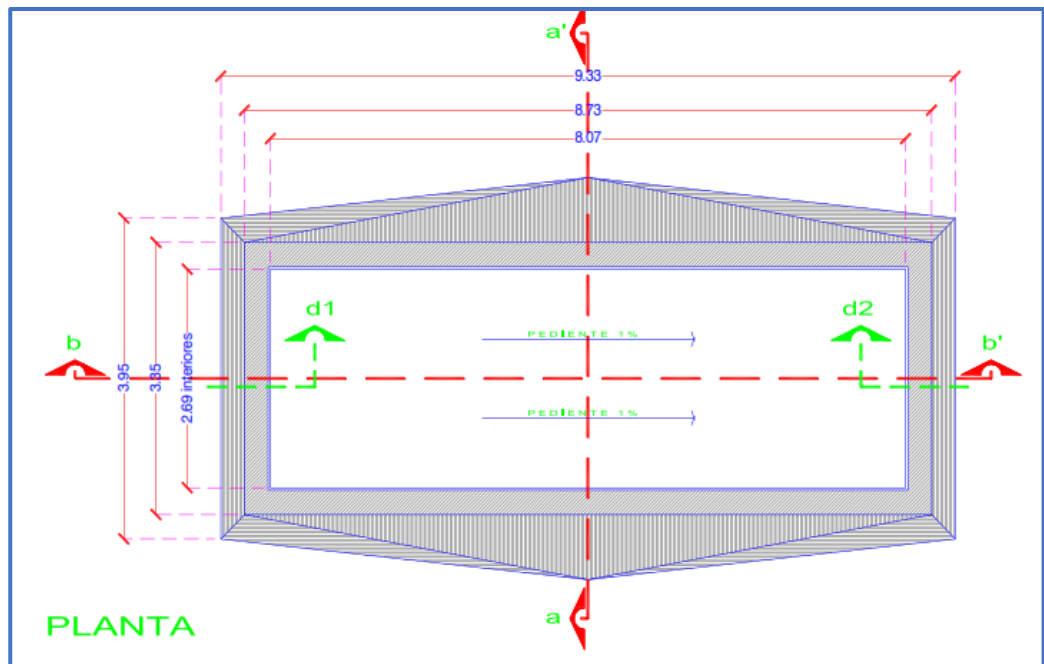
*Tabla 11. Lista de partidas*

N°	Partida
<b>01</b>	Trabajos preliminares.
<b>01.01</b>	Trazo, nivel y replanteo.
<b>02</b>	Movimiento de tierras.
<b>02.01</b>	Excavaciones manuales
<b>02.02</b>	Relleno con material propio.
<b>03</b>	Concreto simple
<b>03.01</b>	Construcción de solados $f'c= 110 \text{ Kg/cm}^2$ en taludes.
<b>04</b>	Impermeabilizante con geomembrana.
<b>04.01</b>	Suministro e instalación de geomembrana.
<b>04.02</b>	Corte en instalación.
<b>05</b>	Muro de sostenimiento en canal hidráulico.
<b>06</b>	Construcción de cajas de registro .45 x .45
<b>07</b>	Suministro e instalación de válvulas de control de PVC 2".
<b>08</b>	Suministro e instalación de tubería PVC 2".
<b>08.01</b>	Instalación en el afluente
<b>08.02</b>	Instalación en el efluente.
<b>09</b>	Suministro y colocación de medio granular.
<b>09.01</b>	Colocación de grava de río en zona de afluente y efluente 2.5".
<b>09.02</b>	Colocación de grava de río 1".
<b>03.01</b>	Colocación de arena gruesa
<b>10</b>	Implantación de vegetación.

Fuente: Unidades de análisis 1, 2 y 3.

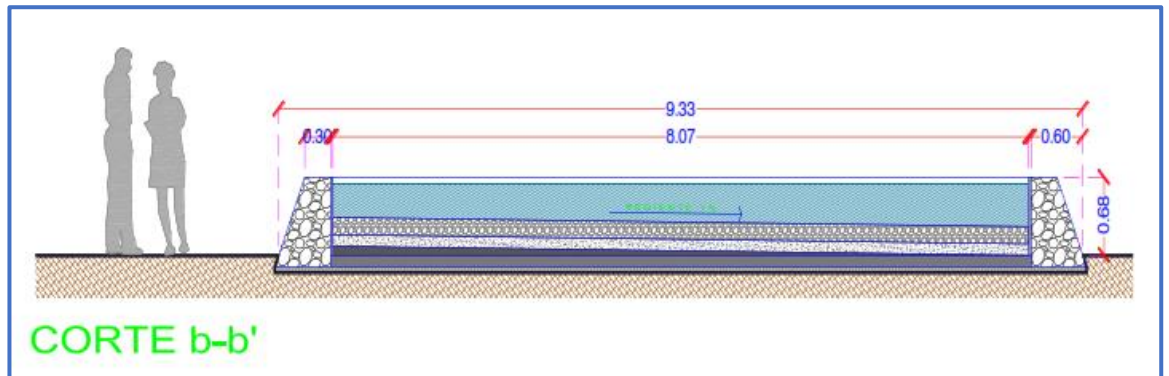
En las figuras 12 a 18 se muestra un ejemplo del diseño constructivo de un humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal con sus respectivos detalles constructivos, que permiten comprender las consideraciones constructivas de este sistema.

Figura 12. Planta de humedal artificial de flujo sub superficial horizontal



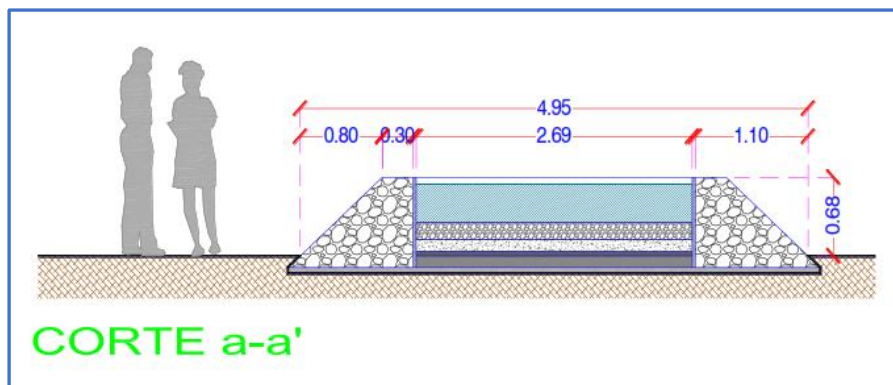
Fuente: (Montiel, 2014)

Figura 13. Cortes b-b de humedal artificial de flujo sub superficial horizontal



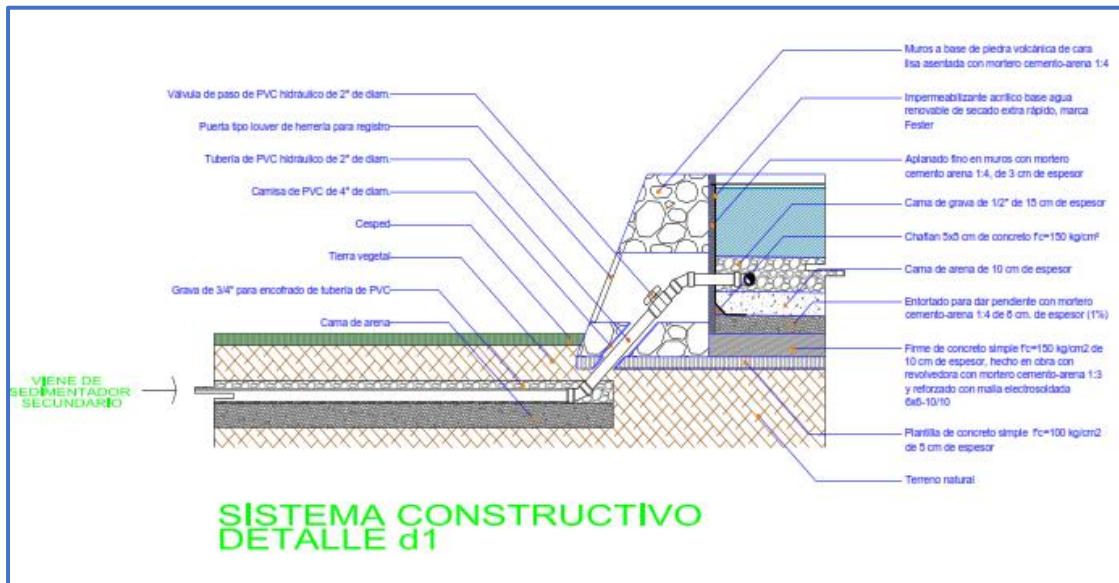
Fuente: (Montiel, 2014)

Figura 14. Cortes a-a de humedal artificial de flujo sub superficial horizontal



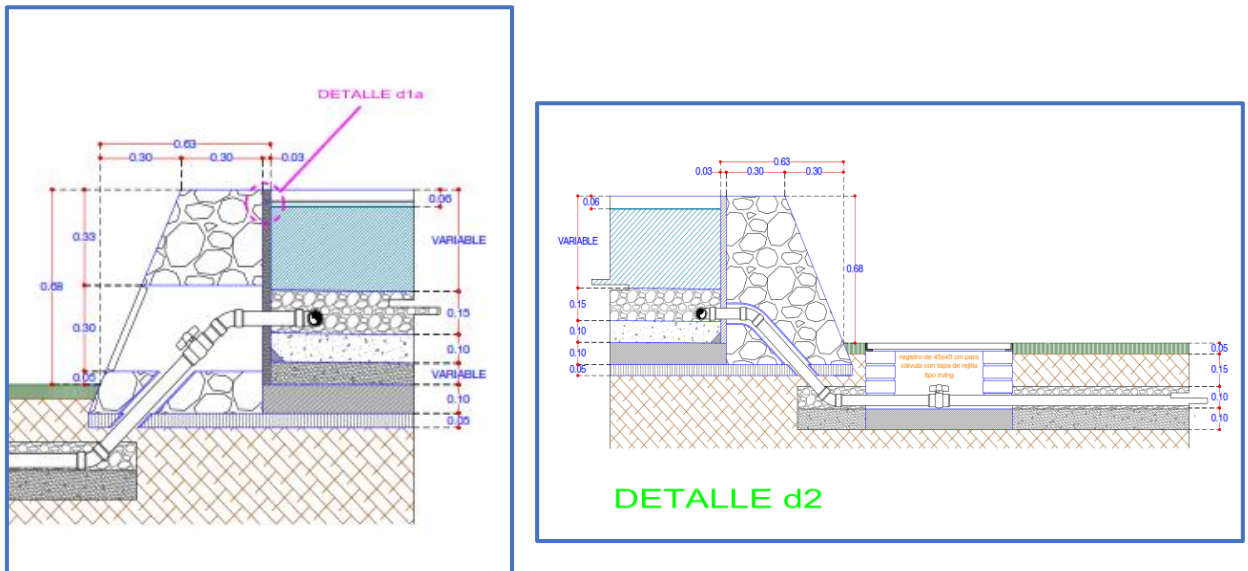
Fuente: (Montiel, 2014)

Figura 15. Detalle constructivo afluente



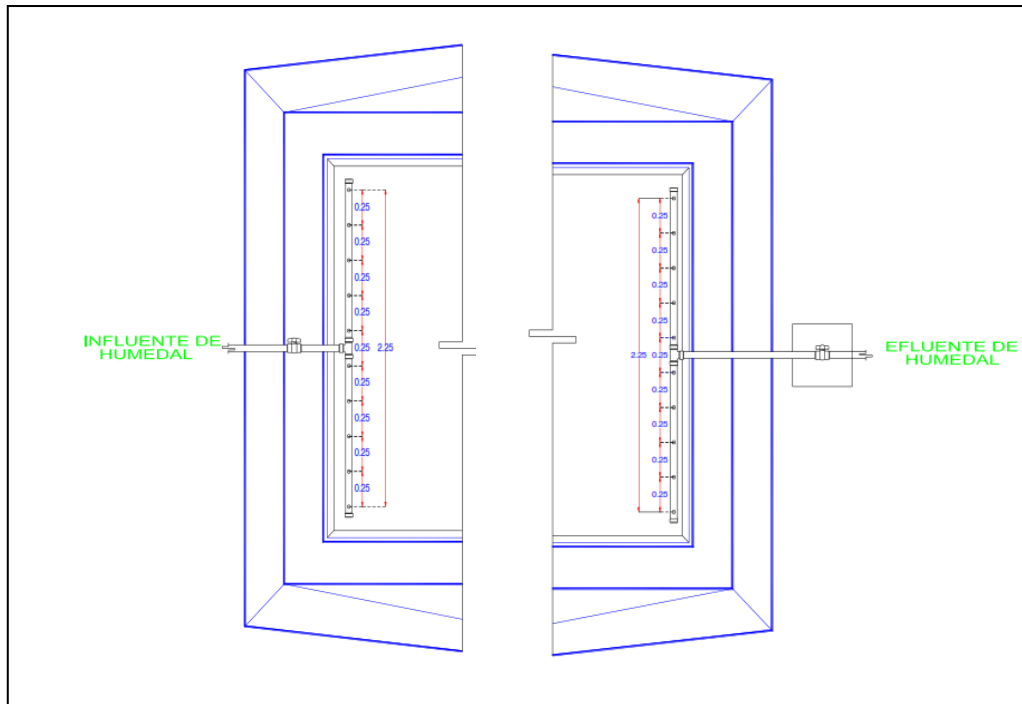
Fuente: (Montiel, 2014)

Figura 16. Detalles constructivo 2 afluente y efluente



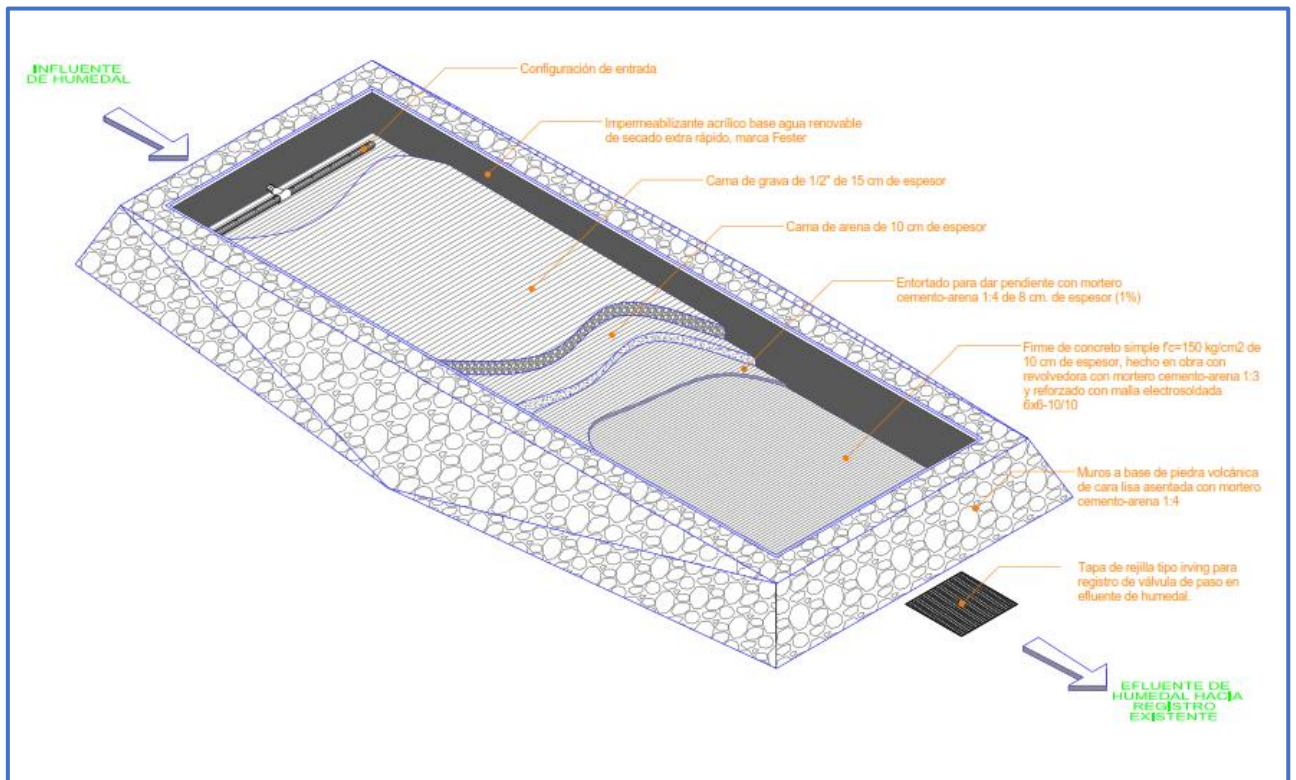
Fuente: (Montiel, 2014)

Figura 17. Detalles constructivo 3 afluente y efluente



Fuente: (Montiel, 2014)

Figura 18. Vista isométrica de humedal superficial de flujo sub superficial



Fuente: (Montiel, 2014)

### **5.3. Diseño ambiental de un humedal sub superficial de flujo horizontal**

RAS (citado por Espinoza, 2014) establece algunos aspectos ambientales referidos a la selección de vegetales para el humedal artificial:

- Para la operación y mantenimiento se recomienda que la superficie del humedal se cubra con vegetación. La elección de la vegetación depende del tipo de residuos, de la radiación solar, la temperatura, la estética, la vida silvestre deseada, las especies nativas y la profundidad del humedal. Es esencial que las raíces tengan siempre acceso a agua en el nivel de los rizomas en todas las condiciones de operación. Para medios muy permeables con alta conductividad hidráulica (tales como la grava), se recomienda que el nivel de agua se mantenga alrededor de 2 a 5 cm por debajo de la superficie del lecho.
- Medio. Cuando se utilice grava como medio que carece de nutrientes, se recomienda que las semillas se planten en un medio fértil con el fin de evitar problemas posteriores.

Núñez (2016) sobre la siembra de la vegetación recomienda que esta se transplante y se utilice la especie emergente *Cyperus papyrus* (papiro), debiendo observar su normal crecimiento, adicionalmente debe evaluarse la presencia de mosquitos y roedores, así como relizar la limpieza de hojas y desechos que puedan caer en el humedal y afecten su normal funcionamiento.

En países tropicales como Colombia, se puede utilizar especies de plantas ornamentales no convencionales, con un valor comercial para la construcción de humedales artificiales, pues además de mejorar la infraestructura del sistema de tratamiento, pueden aportar beneficios económicos a través de la producción de flores (Mena, 2014).

Se ha confirmado en una cantidad significativa de estudios que la presencia de vegetación genera una mayor eficiencia en el tratamiento de aguas residuales, especialmente con el uso de plantas en estado juvenil o en periodo de crecimiento activo (Stottmeister, citado por Mena, 2014).



Von Munch (2009) señala que la instalación de plantas macrófitas deben ser típicas de humedales naturales y riberas de ríos no sumergidos de la localidad de investigación y cumplen una función de proporcionar el ambiente necesario para la fijación microbiana, el crecimiento y la transferencia de oxígeno a la zona de raíz y rizomas.

Mena (2014) señala que las plantas deben ser transplantadas y debe colocarse una por m<sup>2</sup>, para evitar la saturación de raíces a causa de altas densidades de siembra que puedan hacer colapsar el sistema; recomienda la utilización de la totora y debe evitarse la siembra en los extremos del canal hidráulico.

## CONCLUSIONES

1.- El sistema de humedales artificiales es un mecanismo eficiente de tratamiento de aguas residuales domésticas y funciona como un reactor biológico que permite la remoción de materia orgánica (medidos como DBO<sub>5</sub> y DQO), sólidos suspendidos (SS) y nutrientes lo que evita la proliferación de malos olores y permite reusar las aguas tratadas en actividades agropecuarias. Su funcionamiento sólo es posible en sistemas que cuentan con tratamiento primario.

2.- El sistema de humedal artificial con mejor aplicación que pueda adaptarse a las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires es el tipo de flujo sub superficial horizontal, ya que el agua residual al encontrarse bajo la superficie evita la generación de mosquitos y zancudos, como el que vector del dengue.

3.- Las características hidráulicas que tiene un diseño de humedal artificial de flujo sub superficial horizontal para el tratamiento de aguas residuales domésticas son uniformes y están definidas por la Ley de Darcy. El diseño hidráulico está sugerido por Reed et al y Kadlec et al, citado por Espinoza (2014), en la investigación *Natural Systems for Waste Management and Treatment* (capítulo 5).

4.- Las características constructivas que tiene un diseño de un humedal artificial de flujo sub superficial horizontal para el tratamiento de aguas residuales son: profundidad de 0.60m; utilización de sistemas de tuberías plásticas de 2" en la salida y entrada; utilización de grava de 25mm y necesidad de impermeabilizar las paredes y fondo del humedal artificial con geomembrana o similar.

5.-Las características ambientales que tiene un diseño de un humedal artificial de flujo sub superficial horizontal para el tratamiento de aguas residuales son la utilización del carrizo, papiro y totora como vegetación, que permite la transmisión de oxígeno al sistema generando la formación de microorganismos responsables del tratamiento de las aguas residuales.

## **RECOMENDACIONES**

1. A la vista de los resultados obtenidos se concluye que es posible adaptar este sistema para el tratamiento de aguas residuales en la localidad de Buenos Aires – Morropón – Piura; para ello se recomienda realizar investigaciones futuras del tipo experimental con el fin de determinar la correcta aplicación de un humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal con arenas y grava de la zona.
2. Es importante experimentar en la localidad de Buenos Aires – Morropón – Piura, la utilización de vegetales propios de la zona como consideración ambiental, como *Carludovica palmate* (paja toquilla) que pueda servir como insumo para actividades productivas en la localidad de aplicación.
3. Es imprescindible estudiar la aplicación de este sistema que pueda permitir el reuso del agua tratada para riego de vegetales, y de obtener resultados favorables en la bebida de animales, en concordancia con lo establecido en los estándares de calidad ambiental normado en el D.S. 004-2017-MINAM, especialmente en épocas de sequía, como las que sufre en algunas épocas la localidad de Buenos Aires – Morropón – Piura.
4. Se recomienda realizar la tesis para obtención de título profesional de ingeniero civil, con una investigación experimental sobre la aplicación de humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Andreo, P. (2014). Evaluación y diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas. (*Tesis doctoral - Univesridad de Murcia*). Murcia, España.
2. Arias, C., & Brix, H. (s.f.). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 17-24.
3. Baron, L. (2009). *Aguas residuales*. Madrid: El Cid Editor.
4. D.S. N° 01-2010-AG - Reglamento de la ley 29338, Ley de recursos hídricos . (2010). *Diario oficial El Peruano*, 24 de marzo del 2010.
5. Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba: Antequera.
6. EPA. (1993). *Guía para el diseño y construcción de un humedal artificial construido con flujos sub superficiales*. Washington.
7. Espinoza, C. (2014). Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30,000 habitantes . (*Tesis de maestría - Escuela colombiana de ingeniería*). Bogotá, Colombia.
8. Facultad de ciencias químicas, .. (s.f.). *Humedales artificiales*. Veracruz. Obtenido de <https://sites.google.com/site/bioingenieriauv2/unidad-2-analisis-de-la-clasificacion-de-biorreactores-y-su-aplicacion/reactor>
9. Haro, M., & Aponte, N. (2010). Evaluación de un humedal artificial como tratamiento de agua residual en un asentamiento irregular. (*Tesis de licenciatura - Univesridad nacional Autónoma de México*). México D.F.
10. Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México D.F.: McGraw - Hill.
11. Lara, J. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. (*Tesis de maestría - Universidad Politénica de Cataluña*). Barcelona.
12. Lara, J., & Vera, I. (2005). Implantación y evolución de un humedal artificial de flujo subsuperficial en Cogua, Cundinamarca, Colombia. *Ingeniería y Universidad*, 47-63.
13. Larriva, J., & Gonzáles, O. (2017). Modelación hidráulica de humedales artificiales de flujo sub superficial horizontal. *Revista de ingeniería hidráulica y ambiental*.

14. Llagas, W., & Guadalupe, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del instituto de investigaciones FIGMMG*, 85-96.
15. López, I., & Borzacconi, L. (2009). *Introducción al diseño de reactores*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=kOvqsxO8hCg>
16. Lovera, D., Quipuzco, L., Laureano, G., Becerra, C., & Valencia, N. (2006). Adaptación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en la comunidad urbana de Lacabamba, región Ancash-Perú, usando tecnologías de humedales artificiales. *Revista del instituto de investigaciones FIGMMG*, 32-43.
17. Maldonado, V. (2005). Uso de wetlands para el tratamiento y reuso de aguas residuales domésticas. (*Tesis de maestría - Universidad Nacional de Ingeniería*). Lima, Perú.
18. Mena, J. (s.f.). *Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos*. Obtenido de [http://www.alquimiaimasd.com/UserFiles/ficheros/IdiAplicada/2643\\_JMena.pdf](http://www.alquimiaimasd.com/UserFiles/ficheros/IdiAplicada/2643_JMena.pdf)
19. Mena, P. (2014). Evaluación de la eficiencia de tratamiento de aguas residuales domésticas, implementando un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal. (*Tesis de maestría - Universidad de Buenos Aires*). Buenos Aires, Argentina.
20. Ministerio del ambiente-MINAM. (2009). Manual para municipios ecoeficientes. Lima: Enotria. Obtenido de [http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wpcontent/uploads/sites/22/2013/10/manual\\_para\\_municipios\\_ecoeficientes.pdf](http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wpcontent/uploads/sites/22/2013/10/manual_para_municipios_ecoeficientes.pdf)
21. Miranda, J. (2011). *Modelo demostrativo de tratamiento de aguas residuales para enseñanza a nivel escolar*. Lima.
22. Montiel, P. (2014). Humedal Artificial. (*Tesis de licenciatura - Universidad Nacional Autónoma de México*). México D.F., México.
23. Moreno, A. (s.f.). *Cinética química*. Obtenido de Instituto de química - UNAM: [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/CINETICAQUIMICA ACTUALIZADO\\_19881.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/CINETICAQUIMICA ACTUALIZADO_19881.pdf)
24. Moret, I. (2014). *Optimización de lagunas de estabilización mediante el uso de macrofitas*. Tesis de licenciatura - Univesridad de Piura, Piura.
25. Municipalidad provincial de Chulucanas, m. (2014). *Diagnóstico ambiental de la provincia de Morropón*. Chulucanas - Morropón. Obtenido de

- [http://www.munichulucanas.gob.pe/jdownloads/documentos\\_de\\_gestion/diagnostico\\_ambiental\\_de\\_la\\_provincia\\_de\\_morropon.pdf](http://www.munichulucanas.gob.pe/jdownloads/documentos_de_gestion/diagnostico_ambiental_de_la_provincia_de_morropon.pdf)
26. Muñoz, C. (s.f.). Fundamentos de diseño de reactores. 25-33. Obtenido de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lic/munoz\\_c\\_r/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/munoz_c_r/capitulo3.pdf)
  27. Nuñez, R. (2016). Tratamiento de aguas residuales domésticas a nivel familiar, con Humedales Artificiales de. (*Tesis de licenciatura - Univesridad Peruana Unión*). Lima.
  28. Perú. D.S. N° 003-2010-MINAM. (2010). *Diario oficial El Peruano*, 16 de marzo del 2010.
  29. Perú. D.S. N° 004-2017-MINAM. (2017). *Diario oficial El Peruano*, 06 de junio del 2017.
  30. Perú. Ley N° 28611 - Ley general del ambiente. (2005). *Diario oficial El Peruano*. 13 de octubre del 2005.
  31. Perú. Ley N°29338 - Ley de recursos hídricos. (2009). *Diario oficial El Peruano*, 30 de marzo del 2009.
  32. Perú. R.M. 176-2010-VIVIENDA. (2010). *Diario oficial El Peruano*, 05 de Noviembre del 2010.
  33. Perú. R.M. N° 273-2013-VIVIENDA. (2013). *Diario oficial El Peruano*, 24 de octubre del 2013.
  34. Perú. Reglamento nacional de edificaciones. (2016). Lima: Macro.
  35. Ramalho, S. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona: Reverté S.A.
  36. Romaña, J. (2014). Los límites de la Ley de Darcy. (*Tesis de maestría - Univesridad Nacional de Colombia*). Medellín.
  37. Saavedra, B. (2017). *Aplicación de macrofitas en flotación como ayuda en el tratamiento de aguas residuales en la laguna UDEP*. Tesis de licenciatura - Universidad de Piura, Piura.
  38. Sáenz, R. (2002). El rol del ingeniero civil en el campo de la ingeniería sanitaria y ambiental en el siglo XXI. *IX Congreso nacional de ingeniería civil*, (págs. 1-13). San José.
  39. Sànchez, F. (s.f.). Ley de darcy. Conductividad hidráulilca. 1-9. España. Obtenido de [http://hidrologia.usal.es/temas/Ley\\_Darcy.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Ley_Darcy.pdf)
  40. Sánchez, H., & Reyes, C. (1998). *Metodología y diseños en la investigación científica*. Lima: Mantaro.

41. Sierra, O., & López, G. (2013). Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales. *Kuxulkab - revista de divulgación*, 47-55.
42. Silva, A., & Zamora, H. (2005). Humedales artificiales. (*Trabajo de grado - Universidad de Colombia*). Manizales, Colombia. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/1106/1/angelasofiasilvahernandariozamora.2005.pdf>
43. Soto, J. (2016). Estudio de aplicabilidad de humedales artificiales para la mejora de la calidad de las aguas en los meandros abandonados del río Segura . (*Tesis de maestría - Universidad Politécnica de Valencia*). Valencia, España.
44. Tito, R. (2015). *Tratamiento de aguas residuales grises domésticas con la especie paraguíta Cyperus alternifolius en humedales artificiales, Urbanización Zárate - San Juan de Lurigancho 2015*. Tesis de licenciatura - Universidad César vallejo, Lima.
45. Valderrama, S. (2015). *Pasos para elaborar proyectos de investigación científica*. Lima: San Marcos .
46. Vara, A. (2015). *7 pasos para elaborar una tesis*. Lima: Macro.
47. Von Münch, E. (2009). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas grises y aguas residuales en países de desarrollo. Alemania. Obtenido de <http://www.rotaria.net/peru3/rotaria/files/Manual%20Humedal.pdf>
48. Winpenny, J., & Heinz, I. (2013). *Reutilización del agua en agricultura: ¿Beneficio para todos?* Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura .
49. Zapata, M. (2011). Mejora de gestión de la calidad del agua en las cuencas piloto. *Tratamiento de aguas residuales*, (págs. 1-31). Lima.

## ANEXO 01. Matriz de consistencia

<b>MATRIZ DE CONSISTENCIA</b>				
<b>DISEÑO HIDRÁULICO, CONSTRUCTIVO Y AMBIENTAL DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS</b>				
<b>PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>HIPOTESIS</b>	<b>VARIABLE</b>	<b>METODOLOGIA</b>
<p><b>Problema general</b> ¿Cómo es el funcionamiento del diseño de los humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas que pueda adaptarse en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017?</p> <p><b>Problemas específicos</b> 1. ¿Qué características hidráulicas tiene un diseño de humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal para que funcione como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas y se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017?  2.- ¿Qué características constructivas tiene un diseño de humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal para que funcione como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas y se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017?  3.- ¿Qué características ambientales tiene un diseño de humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal para que funcione como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas y se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017?</p>	<p><b>Objetivo general</b> Describir el funcionamiento de humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas que se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017.</p> <p><b>Objetivos específicos</b> 1.- Describir las características hidráulicas que tiene un diseño de humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal para que funcione como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas y se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017.  2.- Describir las características constructivas que tiene un diseño de humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal para que funcione como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas y se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017.  3.- Describir las características ambientales que tiene un diseño de un humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal para que funcione como mecanismo de tratamiento de aguas residuales domésticas y se pueda adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, 2017.</p>	<p><b>Hipótesis general</b> Los sistemas de humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal funcionan como mecanismo para el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas y es posible adaptarse en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires – Morropón - Piura.</p> <p><b>Hipótesis específicas</b>  1.- Es posible determinar las características hidráulicas de un humedal artificial sub superficial tipo horizontal para adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, si se evalúan experiencias de aplicación en el tratamiento de aguas residuales domésticas en comunidades rurales con climas tropicales y sub tropicales.  2.- Es posible determinar las características constructivas de un humedal artificial sub superficial horizontal para adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, si se evalúan experiencias de aplicación en el tratamiento de aguas residuales domésticas en comunidades rurales con climas tropicales y sub tropicales.  3.- Es posible determinar las características ambientales de un humedal artificial sub superficial horizontal para adaptar en las viviendas rurales del distrito de Buenos Aires, si se evalúan experiencias de aplicación en el tratamiento de aguas residuales domésticas en comunidades rurales con climas tropicales y sub tropicales.</p>	<p><b>Univariable</b> Humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal.</p> <p><b>Indicadores</b> 1. Características hidráulicas. 2. Características constructivas 3. Características ambientales</p>	<p><b>Investigación</b> <b>Tipo:</b> Cualitativa <b>Nivel:</b> Exploratorio - descriptivo <b>Diseño:</b> No experimental - transversal <b>Población y muestra:</b> <b>Población:</b> La población de estudio está conformada por todas las investigaciones experimentales de diseños de humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal en el tratamiento de aguas residuales domésticas implementados en comunidades rurales con climas tropicales y sub tropicales <b>Muestra - Unidad de análisis:</b> Tres investigaciones experimentales de diseños de humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal en el tratamiento de aguas residuales domésticas implementados en comunidades rurales con climas tropicales y sub tropicales. <b>Técnicas:</b> a) La observación. b) El análisis de contenido. c) Técnica de categorización que ha permitido la reducción y organización de los datos a unidades llamadas categorías, estas son: Consideraciones hidráulicas, constructivas y ambientales. <b>Técnica de procesamiento de datos:</b> a) Adquisición de información en dos páginas web. b) Revisión documental. c) Elaboración de guías documentales d) Elaboración de matriz de organización y categorización de datos.</p>



## ANEXO 02. Instrumentos de recolección y procesamiento de datos

### 1. Guía de revisión documental

VARIABLE	DEFINICIÓN
<b>Autor</b>	
<b>Año</b>	
<b>Título</b>	
<b>Diseño de investigación</b>	
<b>Lugar de ubicación</b>	
<b>Institución - universidad</b>	

Mediante esta guía se anotó los datos de las investigaciones seleccionadas en el procedimiento de muestra dirigida. Las condiciones de selección tomaron en cuenta los criterios de inclusión y exclusión recomendados por Vara (2015), que fueron:

DESCRIPCIÓN	CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN
Tema de investigación	Aplicación de humedales artificiales.
Tipo de investigación	Experimental
Tipo de humedal artificial	De flujo sub superficial tipo horizontal.
Tratamiento	Aguas residuales domésticas.
Localización	Viviendas o predios ubicados en climas tropicales y/o subtropicales.
Características	Que contenga el diseño hidráulico, constructivo y ambiental de un humedal artificial de flujo sub superficial tipo horizontal.
Año de elaboración	Realizados entre los años 2014-2017.

### 2. Matriz de categorización y organización del funcionamiento de humedales artificiales

Investigación	Unidad de análisis 1	Unidad de análisis 2	Unidad de análisis 3
<b>Resumen</b>			
<b>¿Necesita tratamiento primario?</b>			
<b>Ubicación geográfica</b>			
<b>Clima de la localidad de investigación</b>			
<b>Tipo de diseño de humedal artificial</b>			
<b>Tratamiento de aguas residuales</b>			
<b>Remoción de DBO<sub>5</sub> – Relación Afluente - Efluente</b>			
<b>Porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub></b>			
<b>Remoción de DQO – Relación Afluente - Efluente</b>			

<b>Porcentaje de remoción de DQO</b>			
<b>Remoción de sólidos – relación Afluente - Efluente</b>			
<b>Porcentaje de remoción de SS</b>			
<b>Operación</b>			
<b>Mantenimiento</b>			
<b>Conclusiones</b>			

Mediante esta matriz se describió el funcionamiento de los humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal, así como los principales coeficientes de remoción de DBO5, DQO y SS. A través de esta matriz se pudo conocer los experimentos realizados por las tres unidades de análisis en la aplicación de este sistema en comunidades rurales con climas tropicales o sub tropicales.

### 3. Matriz de categorización y organización de las características hidráulicas, constructivas y ambientales de humedales artificiales

<b>Investigación</b>	<b>Unidad de análisis 1</b>	<b>Unidad de análisis 2</b>	<b>Unidad de análisis 3</b>
<b>Características hidráulicas</b>			
<b>Características constructivas</b>			
<b>Características ambientales</b>			

Mediante esta matriz se describió las características hidráulicas, constructivas y ambientales de los humedales artificiales de flujo sub superficial tipo horizontal. A través de esta matriz se pudieron obtener las características comunes y/o especiales que se obtuvieron de los experimentos realizados por las tres unidades de análisis en la aplicación de este sistema en comunidades rurales con climas tropicales o sub tropicales.