

**CONSTRUCCIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL A NIVEL DE LABORATORIO  
VIVO, EN EL PREDIO “MI RANCHITO”, EN LA VEREDA OLARTE, LOCALIDAD  
USME – BOGOTÁ**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**



**LEIDY CAROLINA GÓMEZ RAMIREZ  
JEYSON GONZALO GARCÍA ECHAVARRÍA**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C  
2018**

**CONSTRUCCIÓN DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL A NIVEL DE  
LABORATORIO VIVO, EN EL PREDIO “MI RANCHITO”, EN LA VEREDA  
OLARTE, LOCALIDAD USME – BOGOTÁ**

**LEIDY CAROLINA GÓMEZ RAMIREZ  
JEYSON GONZALO GARCÍA ECHAVARRÍA**

**Trabajo de grado para optar al título de  
INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR  
FELIPE SANTAMARIA ÁLZATE  
INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO, ESP., M.SC.**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C  
2018**



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

\_\_\_\_\_  
Firma del presidente del jurado

\_\_\_\_\_  
Firma del jurado

\_\_\_\_\_  
Firma del jurado

Bogotá, 22 de mayo del 2018

*Dedico esta tesis primeramente a Dios, que fue el que me permitió culminar con éxito esta hermosa etapa de mi vida, en la cual pude entender y valorar cada una de las bendiciones con las cuales él me rodea.*

*Este trabajo va dedicado especialmente a la memoria de Ana María Medina, por su acompañamiento durante 17 años y a Sara Ramírez Gómez, ellas fueron la causa de todo lo que hoy puedo presentar como tesis, ellas son culpables del éxito de esta misma, gracias a Dios por ese ángel que ya no está conmigo, gracias abuela por llegar a nuestras vidas y decirnos "Siempre caminare a tu lado". Por último, doy gracias a mi hija Sara Ramírez Gómez que fue y será el motor de mi vida, gracias por cinco años en familia sacrificados, por entender que el éxito demanda algunos sacrificios y que el compartir poco tiempo con ella, hacia parte de estos sacrificios.*

*Leidy Carolina Gómez Ramírez*

*Este Trabajo de Grado es dedicado a Dios por darme la sabiduría para el desarrollo del trabajo, a mis padres, hermanas y madrina por su amor, confianza y comprensión, durante este camino de aprendizaje. Por último, a mi compañera de trabajo por compartir conmigo esta experiencia y a su apoyo incondicional.*

*Jeyson Gonzalo García Echavarría*

Los autores expresan sus agradecimientos a:

El Ing. Felipe Santamaría por permitir ser el director y apoyo durante la elaboración del trabajo.

Lorena Gómez, Luz Ramírez y Luz Echavarría por su colaboración para la construcción del humedal artificial.

Sebastián Trujillo y Santiago Zambrano por su apoyo y dedicación en la construcción del humedal artificial.

Estefanía Otálora y Esteban Forero por su apoyo y preocupación durante la elaboración del trabajo.

Los propietarios del predio “Mi Ranchito” por permitir la construcción del humedal artificial.

Todas aquellas personas que de una u otra manera ayudaron al desarrollo del trabajo.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN.....</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>15</b>
1.1. ANTECEDENTES.....	15
1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
1.2.1. Descripción del Problema.....	17
1.2.2. Formulación del Problema.....	17
1.3. OBJETIVOS.....	18
1.3.1. Objetivo General.....	18
1.3.2. Objetivos Específicos.....	18
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	18
1.5. DELIMITACIÓN.....	19
1.5.1. Espacio.....	19
1.5.2. Tiempo.....	19
1.5.3. Contenido.....	19
1.5.4. Alcance.....	19
<b>2. MARCO REFERENCIAL.....</b>	<b>20</b>
2.1. MARCO TEÓRICO.....	20
2.2. MARCO CONCEPTUAL.....	26
2.3. MARCO LEGAL.....	29
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>31</b>
<b>4. DISEÑO METODOLÓGICO.....</b>	<b>33</b>
4.1. PARÁMETROS DE DISEÑO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL (HA).....	33
4.1.1. Tipo de Flujo del HA.....	33
4.1.2. Diseño del HA.....	34
4.1.3. Estrato del HA.....	38
4.1.4. Vegetación del HA.....	42



4.2. PROCESO CONSTRUCTIVO DEL HA .....	44
4.2.1. Localización y Replanteo.....	44
4.2.2. Excavación del Terreno.....	45
4.2.3. Instalación de Tubería.....	45
4.2.4. Construcción de Cajas de Inspección.....	46
4.2.5. Impermeabilización.....	47
4.2.6. Relleno.....	48
4.2.7. Inoculación de vegetación.....	48
4.3. MODELACIÓN MATEMÁTICA .....	49
4.3.1. Módulo de Dispersión .....	49
4.4. MODELACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE MODEL MUSE (MODFLOW) ..	51
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>54</b>
<b>6. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>57</b>
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>62</b>
<b>8. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>64</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>69</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Comparacion entre diferentes sistemas de humedales.....	25
<b>Tabla 2 .</b> Parámetro para el vertimiento de (DBO <sub>5</sub> ).....	30
<b>Tabla 3.</b> Calculo del área superficial - Método EPA.....	35
<b>Tabla 4.</b> Calculo de las dimensiones – EPA.....	35
<b>Tabla 5.</b> Calculo del área superficial - Método Delgadillo.....	36
<b>Tabla 6.</b> Calculo de las dimensiones - Método Delgadillo.....	37
<b>Tabla 7.</b> Comparación de diseño del humedal artificial.....	37
<b>Tabla 8.</b> Análisis granulométrico.....	39
<b>Tabla 9.</b> Coeficiente de uniformidad y curvatura.....	41
<b>Tabla 10.</b> Cálculo del módulo de dispersión.....	50
<b>Tabla 11.</b> Datos iniciales del modelo ModFlow.....	51
<b>Tabla 12.</b> Cálculo del tiempo de inyección.....	52
<b>Tabla 13.</b> Datos ingresados al modelo ModFlow.....	53
<b>Tabla 14.</b> Resultados de la Demanda Bioquímica de Oxígeno.....	54

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 2.</b> Tratamientos de las AR.....	20
<b>Figura 3.</b> Clasificación de los humedales artificiales. ....	22
<b>Figura 4.</b> Humedal de superficie libre.....	23
<b>Figura 5.</b> Humedal subsuperficial de flujo horizontal.....	24
<b>Figura 6.</b> Humedal subsuperficial de flujo vertical. ....	24
<b>Figura 1.</b> Compuestos de las AR. ....	27
<b>Figura 7.</b> Distribución de la grava en el humedal artificial. ....	40
<b>Figura 8.</b> Curva granulométrica y tamaños efectivos. ....	40
<b>Figura 9.</b> Tipos de vegetación HA: a) Veg. emergente, b) Veg. sumergida y c) Veg. flotante.....	43
<b>Figura 10.</b> Localización y replanteo.....	44
<b>Figura 11.</b> Excación de cajas de inspección, HA y tubería. ....	45
<b>Figura 12.</b> Instalación de tubería de entrada y salida del humedal y conexión. ...	46
<b>Figura 13.</b> Construcción de cajas de inspección. ....	47
<b>Figura 14.</b> Impermeabilización. ....	47
<b>Figura 15.</b> Relleno.....	48
<b>Figura 16.</b> Inoculación de vegetación.....	48
<b>Figura 17.</b> Ejecución del modelo ModFlow. ....	55
<b>Figura 18.</b> Conductividad hidráulica Kx en el humedal artificial (m/s). ....	55
<b>Figura 19.</b> Variación de cotas de la lámina de agua (m.s.n.m). ....	56
<b>Figura 20.</b> Resultados de simulación, transporte de contaminantes (mgO <sub>2</sub> /L).....	56
<b>Figura 21.</b> a). Vegetación nueva en el estrato. b) Retención de materia orgánica. ....	59
<b>Figura 22.</b> Proceso de adaptación del H A. (a) Enero del 2018 (b) Abril del 2018. ....	60
<b>Figura 23.</b> Comparación entre los resultados de ensayos de laboratorio y simulación en ModelMuse. ....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS

AR: Agua Residual.

ARnD: Agua residual no Doméstica.

HA: Humedal Artificial.

EPA: Environmental Protection Agency.

DBO<sub>5</sub>: Demanda Bioquímica de Oxígeno.

FWS: Humedales Artificiales a Superficie libre.

SFS: Humedales Artificiales Subsuperficial.

HFS: Humedales Artificiales Subsuperficial de flujo horizontal.

VFS: Humedales Artificiales Subsuperficial de flujo vertical.

USGS: Servicio Geológico de los Estados Unidos.

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

CAR: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

UASB: Reactor anaerobio de Flujo Ascendente.

MO: Materia Orgánica.

## RESUMEN

El trabajo consiste en el diseño, construcción y evaluación de un humedal artificial a nivel de laboratorio vivo, como tratamiento alternativo de las aguas residuales producidas en el predio “Mi Ranchito”, este sistema se implementa en áreas pequeñas, sin acceso a un sistema de alcantarillado y con problemas de proliferación de malos olores.

El diseño del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal, se realizó de acuerdo a la metodología de la Agencia de Protección de Estados Unidos (EPA), ya que se adapta a las características topográficas del terreno y facilita su construcción porque, hace una relación L:W (2:1). Para la evaluación, se realizó un seguimiento durante 4 meses a partir de su construcción, donde se realizaron ensayos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y una simulación de transporte de contaminantes mediante el software ModelMouse.

En los 4 meses de funcionamiento, se encontró retención de materia orgánica en el estrato, reproducción de vegetación y crecimiento de nueva, debido al favorable proceso de adaptación del sistema. En el análisis de resultados, se obtiene que el humedal artificial tiene un porcentaje de remoción de materia orgánica del 77%, frente a un 82% calculado de acuerdo a los resultados de simulación de transporte de contaminantes.

**Palabras Claves:** Humedal artificial, tratamiento alternativo, aguas residuales, Demanda Bioquímica de Oxígeno, materia orgánica.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo consiste en el tratamiento de las aguas residuales provenientes del predio “Mi Ranchito” por medio de la construcción de un humedal artificial, al no contar con acceso a un sistema de alcantarillado causando problemas de proliferación de malos olores.

El objetivo de esta investigación es evaluar el funcionamiento de un humedal artificial a nivel de laboratorio vivo, para el tratamiento de las aguas residuales producidas en el predio. Además, la implementación de un sistema alternativo es una herramienta que permite dar cumplimiento a la normatividad para vertimientos de la autoridad ambiental competente.

Para el desarrollo del trabajo se realiza un análisis fisicoquímico de las aguas residuales, para identificar el tipo de humedal artificial que se adopte a las necesidades del predio. Posteriormente, se lleva a cabo el diseño y construcción del humedal artificial, teniendo en cuenta los parámetros obtenidos y requisitos del propietario, para así llegar a la mejor alternativa de tratamiento. Por último, se toman muestras de la materia orgánica (expresada en  $DBO_5$ ) durante un periodo de 4 meses, para evaluar el funcionamiento y la eficiencia de remoción del humedal artificial.

En los siguientes 8 capítulos, se tiene: 1. Generalidades: Muestra los antecedentes, problema, objeto e importancia de la investigación. 2. Marco Referencial: Describe la teoría, conceptos y resoluciones necesarias para el desarrollo del trabajo. 3. Metodología: Muestra el método a usar, fuentes de información y fases del trabajo. 4. Diseño Metodológico: Presenta los parámetros de diseño, construcción, modelación matemática y en el software ModelMuse del humedal artificial. 5. Resultados: Muestra el producto de los ensayos de laboratorio y modelación mediante ModelMuse. 6. Análisis de Resultados: Evalúa el funcionamiento del humedal artificial. 7. Conclusiones: Aportes significativos de la investigación. 8. Recomendaciones: Cosas a tener en cuenta en el trabajo.

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. ANTECEDENTES

Los humedales artificiales como sistema de tratamiento de las aguas residuales, comenzaron a utilizarse en 1950 por la Dra. Seide y el Dr. Reinhold Kickuth en el Instituto Max Plank, Alemania, donde se desarrolló un tratamiento conocido como “Root Zone Method”, que corresponde a un humedal de flujo subsuperficial relleno de arcilla. El primer estudio de un humedal artificial construido de flujo subsuperficial a escala real se realizó en 1974, en Wolverton, Mississippi.

En el año 2015, la academia de Ciencias en China realizó un estudio de los humedales artificiales de flujo subsuperficial, con el objetivo de implantar un nuevo tratamiento de las aguas residuales domésticas, denominado “Humedal artificial multi-capa”, el cual consiste en que el agua residual fluya dentro o debajo de una capa superficial de tierra, descomponiendo la materia orgánica a través de procesos microbianos. Los resultados indican que cuando la carga hidráulica alcanza aproximadamente 0,44 m/d y con una duración de retención hidráulica de 3 días, el efecto de remoción de DBO<sub>5</sub> es del 87,9%<sup>1</sup>.

En Colombia, se han construido humedales artificiales de flujo subsuperficial, con el objetivo de realizar pruebas piloto para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, con caudales y poblaciones de diseño pequeñas<sup>2</sup>. A continuación, se muestran algunos de los casos de humedales artificiales construidos en Colombia:

En Cogua Cundinamarca, la Universidad Javeriana construyó en el año 2004 un humedal artificial piloto de flujo subsuperficial. El humedal artificial manejó un caudal promedio de 1,34 m<sup>3</sup>/d, un afluente en DBO<sub>5</sub> de 132 mg/L y un efluente de 44 mg/L. El reactor anaerobio UASB\* fue una celda de 2 m de ancho por 5,8 m de largo, con una profundidad efectiva de 0,6 m, es decir un área del humedal de 11,6 m<sup>2</sup>, con un tiempo de retención hidráulica de 1,6 días y una carga hidráulica de 0,23 m/d. Con este sistema se obtuvieron remociones promedio de DBO<sub>5</sub> entre el 66 y 80%<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Shibao Lu, Liang Pei, and Xiao Bai, ‘Study on Method of Domestic Wastewater Treatment through New-Type Multi-Layer Artificial Wetland’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40.34 (2014), 11207–14 <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.165>>.

<sup>2</sup> Carlos Ariel Díaz Acero, ‘Tratamiento de Agua Residual a Través de Humedales’, *V Congreso Internacional de Ingeniería Civil*, 2014, 1–8.

\* Reactor anaerobio de Flujo Ascendente.

<sup>3</sup> Carlos R Lara and Jaime Díaz, ‘Postratamiento Del Efluente de Un Reactor Uasb Por Medio de Un Humedal Artificial’.

En el año 2009, en la Vereda la Bananera en Pereira se utilizaron humedales horizontales de flujo subsuperficial, como tratamiento complementario para el tratamiento de las aguas residuales domésticas. Para lo cual, se usaron cuatro humedales con un área de 90 m<sup>2</sup> cada uno, construidos a escala real para el tratamiento secundario del efluente de un tanque séptico. Los humedales estuvieron sometidos a un caudal medio de 0,27 l/s, para una carga hidráulica de 2542 m<sup>3</sup>/ha\*d y un tiempo de retención hidráulica de 1,23 días. Obteniendo promedios de remoción de 49,58 % para DBO<sub>5</sub><sup>4</sup>.

En la ciudad de Bogotá, la Universidad Nacional realizó un prototipo de humedal artificial de configuración simple y eficiente denominado "HUMEDAR – I". El sistema consiste en un reactor anaerobio de compartimientos paralelos a flujo pistón, seguido de un humedal artificial de alta tasa, conformado por macrófitas nativas y comunes, soportadas sobre un sustrato de material plástico reciclado. Debido al humedal, se lograron niveles de remoción promedio de DBO<sub>5</sub> en un 45 %, para un tiempo de retención hidráulica de 2,77 días<sup>5</sup>.

La autoridad ambiental competente, en este caso la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), donde se encuentra ubicado el predio "Mi Ranchito", ha solicitado el adecuado manejo de las aguas residuales a nivel Veredal (junta de acción comunal). La implementación de un humedal artificial en el predio, proporciona un adecuado tratamiento de las aguas residuales en la remoción de materia orgánica, permitiendo un acercamiento para que el propietario pueda tener una herramienta jurídica, con la cual solicite el permiso de vertimiento.

La construcción de un humedal artificial, es viable, porque se cuenta con el terreno disponible, generación de las aguas residuales en el predio y la problemática actual. Este trabajo se puede desarrollar, por lo que es una zona rural que no cuenta con un sistema de alcantarillado. Dentro del énfasis de la universidad está el recurso hídrico, donde uno de los objetivos es la conservación de las fuentes de agua, mediante el tratamiento de las aguas residuales

---

<sup>4</sup> Adalberto Arroyave, 'Efectos Del Tipo De Vegetación Y De Las Variaciones De Profundidad En La Eficiencia De Remoción De Patógenos En Humedales Construidos De Flujo Subsuperficial', 2010.

<sup>5</sup> Alejandra OTÁLORA R., 'Evaluación Del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Mediante Humedales Artificiales de Alta Tasa En La Locación Petrolera de Caño Gandúl', 2011, 163.



## 1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

**1.2.1. Descripción del Problema.** En la Vereda Olarte, localidad de Usme, se encuentra ubicado el predio “Mi Ranchito”. La propiedad no cuenta con un sistema apropiado de descarga de las aguas residuales, al no poseer un sistema de alcantarillado. El sistema de desagüe no cuenta con una trampa de grasas\* ni un sistema de degradación de materia orgánica, para el tratamiento de las aguas residuales que son vertidas a una acequia aledaña. El sistema actual, cuenta con tubería flexible de 3 pulgadas de diámetro, en PVC y polietileno de alta densidad.

La contaminación generada por el vertimiento puede ocasionar la proliferación de plagas, malos olores y vectores, transmisores de enfermedades. Es por esto, que se requiere una pronta solución que permita un adecuado manejo de las aguas residuales generadas en el predio, tal y como lo ha venido solicitando la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

Aunque existen diversas soluciones en el tratamiento de las aguas residuales, la construcción de un humedal artificial, puede llegar a ser una solución adecuada para el tipo de vertimiento y carga contaminante de las aguas de desecho producidas en el predio.

**1.2.2. Formulación del Problema.** ¿Cómo funcionaría en el predio “Mi Ranchito”, un sistema alternativo de tratamiento de aguas residuales, mediante humedales artificiales, para la remoción de carga orgánica?

---

\* “Consiste en una caja cilíndrica con tapa y dos orificios, uno de entrada y uno de salida, con dos placas para desviar los flujos, su función es interceptar las grasas y jabones presentes en el agua” J V Morales, *Cucunub{á}: Modelo Para Un Desarrollo Sostenible* (Universidad de Bogot{á} Jorge Tadeo Lozano, 2000) <[https://books.google.com.co/books?id=LOpB\\_Y6eKd4C](https://books.google.com.co/books?id=LOpB_Y6eKd4C)>.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo General**

- Evaluar el funcionamiento de un humedal artificial a nivel de laboratorio vivo, para el tratamiento de las aguas residuales en el predio “Mi Ranchito”, en la Vereda Olarte, localidad Usme.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Determinar los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales generadas en el predio “Mi Ranchito”.
- Identificar el tipo de humedal artificial más adecuado, para el tratamiento de las aguas residuales del predio “Mi Ranchito”.
- Diseñar un humedal artificial, para la remoción de la materia orgánica, producidas por el predio.
- Construir un humedal artificial con las características necesarias para la remoción de materia orgánica.

### **1.4. JUSTIFICACIÓN**

La autoridad ambiental competente, en este caso la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), donde se encuentra ubicado el predio “Mi Ranchito”, ha solicitado el adecuado manejo de las aguas residuales a nivel Veredal (junta de acción comunal). La implementación de un humedal artificial en el predio, proporciona un adecuado tratamiento de las aguas residuales en la remoción de materia orgánica, permitiendo un acercamiento para que el propietario pueda tener una herramienta jurídica, con la cual solicite el permiso de vertimiento.

La construcción de un humedal artificial, es viable, porque se cuenta con el terreno disponible, generación de las aguas residuales en el predio y la problemática actual. Este trabajo se puede desarrollar, por lo que es una zona rural que no cuenta con un sistema de alcantarillado. Dentro del énfasis de la universidad está el recurso

hídrico, donde uno de los objetivos es la conservación de las fuentes de agua, mediante el tratamiento de las aguas residuales.

## **1.5. DELIMITACIÓN**

**1.5.1. Espacio.** El proyecto se realizó en el predio “Mi Ranchito” en la Vereda Olarte, ya que es una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales in situ, donde no se tiene acceso a un sistema de alcantarillado y tiene problemas de proliferación de malos olores. Además, se requiero contratar los servicios del laboratorio de análisis químicos y microbiológicos BioPolab, para ensayos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) a la entrada y salida del humedal artificial.

**1.5.2. Tiempo.** El trabajo de investigación comenzó el 23 de octubre del 2017 y finalizo el 2 de mayo del 2018. El diseño y construcción del humedal artificial, se realizó durante el mes de diciembre del 2017, con un seguimiento de 4 (cuatro) meses.

**1.5.3. Contenido.** El proyecto contiene el diseño, construcción y evaluación de un humedal artificial a nivel real, que permita la remoción de materia orgánica de las aguas residuales producidas en el predio “Mi Ranchito”.

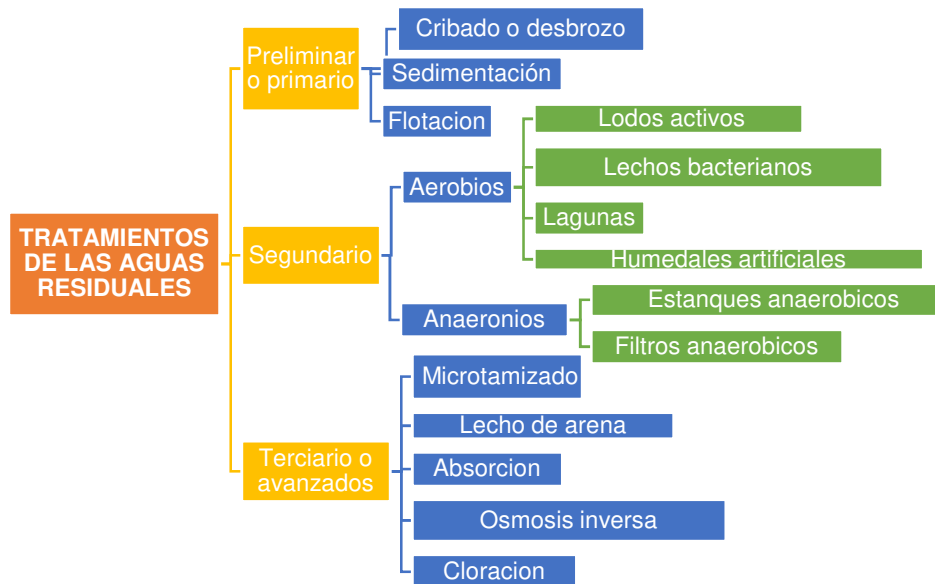
**1.5.4. Alcance.** El alcance del proyecto consiste en la evaluación y funcionamiento de un humedal artificial, para la remoción de DBO<sub>5</sub> en las aguas residuales producidas por el predio “Mi Ranchito”.

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1. MARCO TEÓRICO

Para mejorar la calidad del agua residual que es vertida a fuentes hídricas, existen 3 (tres) tratamientos, el preliminar o primario, secundario y terciario, como se muestra en la figura.

**Figura 1.** Tratamientos de las AR.



**Fuente.** Autores.

De los 3 (tres) tratamientos mostrados en la Figura 2, se hablará del tratamiento secundario, debido a que ofrece procesos biológicos que facilitan la remoción de materia orgánica.

En el tratamiento secundario, se encuentran los lodos activados, es una mezcla completa\*, su nombre proviene de la producción de una masa capaz de estabilizar

---

\* Consiste en la distribución del agua residual y el lodo activo por todo un tanque.

un residuo<sup>6</sup> en un medio aerobio<sup>\*\*</sup>. Consiste en un reactor, donde se mantiene en suspensión un cultivo microbiano, capaz de asimilar la materia orgánica presente en el agua servida. El proceso requiere un sistema de aireación y de agitación, que suministre el oxígeno requerido por las bacterias encargadas de la depuración de las aguas residuales<sup>7</sup>.

Los lechos bacterianos, “son depósitos rellenos de un material de gran superficie específica, natural o artificial, sobre los que se distribuye el agua a tratar uniformemente a lo largo de la superficie de todo el lecho. Los microorganismos depuradores presentes en el agua forman una película sobre dicho relleno, en la que la parte exterior se encuentra en condiciones aerobias debido a la aireación natural en el depósito”<sup>8</sup>.

Las lagunas aerobias, no utilizan equipos de aireación, el oxígeno se obtiene de la superficie natural de aireación y de las algas que producen oxígeno por fotosíntesis. El oxígeno liberado por las algas en la fotosíntesis se utiliza en las bacterias para la degradación aerobia de la materia orgánica<sup>9</sup>.

Los humedales artificiales, son sistemas de fitodepuración de las aguas servidas. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de plantas acuáticas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las plantas acuáticas, hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual es depurada<sup>10</sup>.

La implementación de humedales artificiales, para el tratamiento biológico de las aguas residuales, es uno de los modelos de investigación y construcción que se ha

---

<sup>6</sup> L Méndez and others, ‘Tratamiento De Aguas Residuales Mediante Lodos Activados a Escala De Laboratorio’, *Revista Del Instituto de Investigación FIGMMG*, 7 (2004), 74–83 <[http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/33982176/a10.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1481546914&Signature=uNQsTsPgd9TGRDyHHyHWusYermE%3D&response-content-disposition=inline%3Bfilename%3D74\\_TRATAMIENTO\\_DE\\_AGUAS\\_RESIDUALES\\_MEDIA.pdf](http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/33982176/a10.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1481546914&Signature=uNQsTsPgd9TGRDyHHyHWusYermE%3D&response-content-disposition=inline%3Bfilename%3D74_TRATAMIENTO_DE_AGUAS_RESIDUALES_MEDIA.pdf)>.

<sup>\*\*</sup> Presencia de oxígeno.

<sup>7</sup> Jonathan Lopez, ‘Tratamiento de Aguas Residuales. Aplicación de Humedales Artificiales.’, 2015.

<sup>8</sup> La Iglesia Gandarillas Jaime, ‘Módulo Gestión de Aguas Residuales Y Reutilización Índice’, 2016, p. 16.

<sup>9</sup> Jonathan Lopez, ‘Tratamiento de Aguas Residuales. Aplicación de Humedales Artificiales.’, 2015.

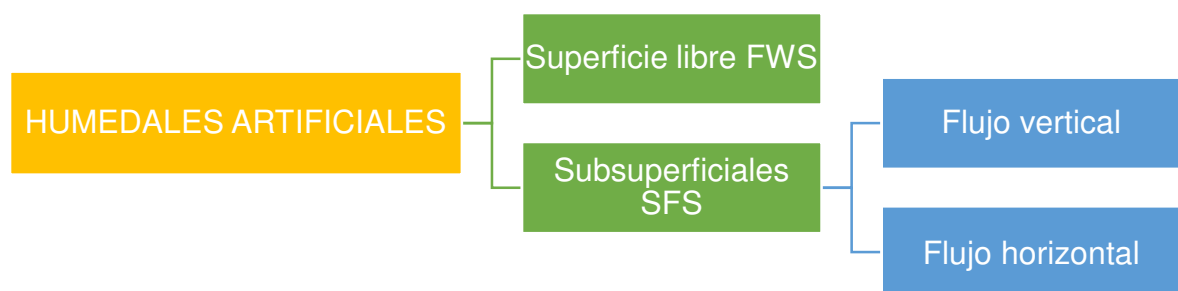
<sup>10</sup> Oscar Delgadillo, Alan Camacho, and Mauricio Andrade Serie, *Depuración de Aguas Residuales Por Medio de Humedales Artificiales*, 2010 <[http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion\\_de\\_aguas\\_residuales\\_por\\_medio\\_de\\_humedales\\_artificiales.pdf%5Cnhttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales](http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf%5Cnhttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales)>.

desarrollado desde el siglo XX<sup>11</sup>, debido a que puede tratar con altos niveles de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), sólidos suspendidos (SS) y nitrógeno<sup>12</sup>.

Los humedales artificiales, utilizan una amplia variedad de macrófitas emergentes (plantas acuáticas que salen), como Typha, Phragmites, communis, Juncus, Scirpus y Carex<sup>13</sup>. Su presencia puede mejorar la calidad del tratamiento de las aguas residuales, debido a su capacidad para absorber cargas excesivas de nutrientes<sup>14</sup>.

A partir de lo anterior, los humedales artificiales pueden ser clasificados en:

**Figura 2.** Clasificación de los humedales artificiales.



**Fuente.** Autores.

Humedales Artificiales a Superficie libre (FWS): Son aquellos donde el agua circula a través de los tallos de las plantas, está expuesta directamente a la atmósfera,

<sup>11</sup> Ines Restrepo and others, *Avances En Investigación Y Desarrollo de Agua Y Saneamiento Para El Cumplimiento de Las Metas Del Milenio*, Colección Ciencias Físicas, Exactas Y Naturales (Universidad del Valle, 2007) <<https://books.google.com.ec/books?id=vpFqgpFHBmYC&pg=PA202&dq=agua+residual+domestic&hl=es&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwi97r2P5c7NAhWG7R4KHVxIDA4Q6AEIQjAD#v=onepage&q=agua+residual+domestica&f=false>>.

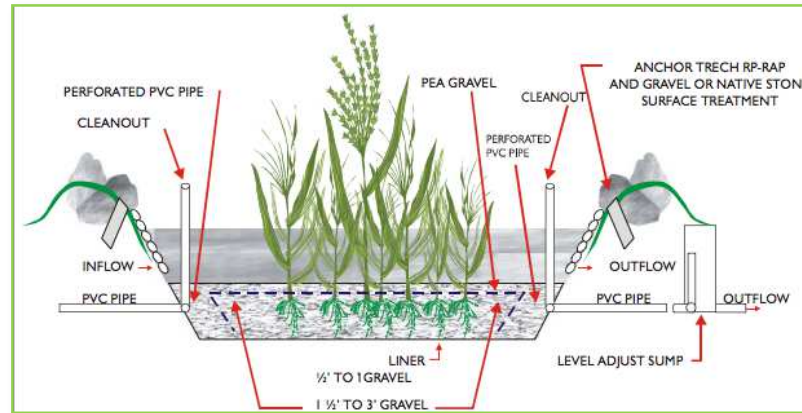
<sup>12</sup> Dwdoiq Gh and Qjhqlhutr Hvwllyq Pelhqwdo, 'Depuración de Aguas Residuales Municipales Con Humedales Artificiales', 1999.

<sup>13</sup>Ronald W Crites and others, *Natural Wastewater Treatment Systems*, 2006 <[https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(98\)80320-6](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(98)80320-6)>.

<sup>14</sup>Ronald W Crites and others, *Natural Wastewater Treatment Systems*, 2006 <[https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(98\)80320-6](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(98)80320-6)>.

donde el fondo está constituido por suelo relativamente impermeable y niveles de agua poco profundos que oscilan entre 0.1 y 0.6 metros<sup>15</sup>.

**Figura 3.** Humedal de superficie libre.



**Fuente.** <https://sites.google.com/site/bioingenieriauv15/unidad-1-sistemas-de-depuracion-de-agua/1-1-humedales>.

Humadales Artificiales Subsuperficiales (SFS): Consisten en un filtro biológico de una capa porosa (piedra volcánica, grava), en el cual las plantas macrófitas se siembran en la superficie del lecho filtrante y las aguas residuales pre tratadas atraviesan de forma horizontal o vertical el lecho filtrante, en estos sistemas el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio granular<sup>16</sup>.

Flujo horizontal: En la Imagen 2 se muestra la sección transversal de un humedal artificial, en estos sistemas el agua residual fluye horizontalmente en forma permanente, a través de un medio poroso debajo de la superficie del lecho filtrante<sup>17</sup>. La profundidad del lecho puede ser entre 0,45 m a 1 m y tiene una pendiente de 0,5 % a 1 %<sup>18</sup>.

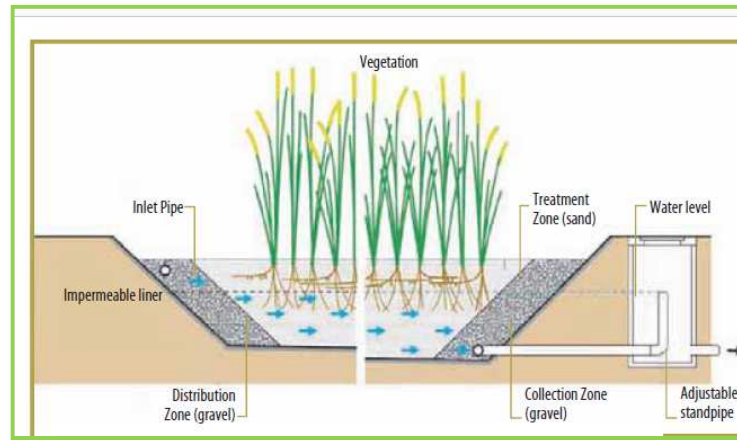
<sup>15</sup> Sergio Adrián Arias Martínez and others, 'Fitorremediación Con Humadales Artificiales Para El Tratamiento de Aguas Residuales Porcinas', *Informador Técnico (Colombia)*, 74 (2010), 12–22.

<sup>16</sup> Sergio Adrián Arias Martínez and others, 'Fitorremediación Con Humadales Artificiales Para El Tratamiento de Aguas Residuales Porcinas', *Informador Técnico (Colombia)*, 74 (2010), 12–22.

<sup>17</sup> Dr. Roshan R. Shrestha, *Constructed Wetlands Manual*, 2008 <[www.unhabitat.org](http://www.unhabitat.org)>.

<sup>18</sup> Oscar Delgadillo, Alan Camacho, and Mauricio Andrade Serie, *Depuración de Aguas Residuales Por Medio de Humadales Artificiales*, 2010 <[http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion\\_de\\_aguas\\_residuales\\_por](http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por)

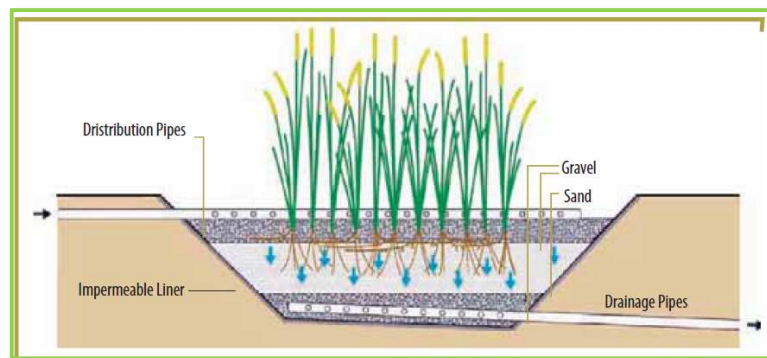
**Figura 4.** Humedal subsuperficial de flujo horizontal.



**Fuente.** Dr. Roshan R. Shrestha, *Constructed Wetlands Manual*, 2008 <[www.unhabitat.org](http://www.unhabitat.org)>.

Flujo vertical: Estos humedales artificiales se llenan con agua residual que se vierte o dosifica desde la superficie como se observa en la Imagen 3 del humedal (arriba), usando un sistema mecánico de dosificación. Las aguas se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal<sup>19</sup>.

**Figura 5.** Humedal subsuperficial de flujo vertical.



**Fuente.** Dr. Roshan R. Shrestha, *Constructed Wetlands Manual*, 2008 <[www.unhabitat.org](http://www.unhabitat.org)>.

Para conocer las ventajas y desventajas que tienen los humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial, se presenta a continuación un cuadro comparativo, con el fin de elegir el posible tipo de humedal artificial, que se adopte a las características demandas por el predio “Mi Ranchito”.

[\\_medio\\_de\\_humedales\\_artificiales.pdf%5Cnhttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales>](http://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales)

<sup>19</sup> Dr. Roshan R. Shrestha, *Constructed Wetlands Manual*, 2008 <[www.unhabitat.org](http://www.unhabitat.org)>.



**Tabla 1.** Comparacion entre diferentes sistemas de humedales.

	<b>FLUJO SUPERFICIAL</b>	<b>FLUJO SUBSUPERFICIAL</b>
<b>TRATAMIENTO</b>	Tratamiento de flujos secundarios (aguas ya tratadas por otros medios, ej. Lagunas, biodiscos fangos activados etc.	Para tratar primarios (aguas pretratadas ej tanque IMHOFF, pozos sépticos) .
<b>OPERACIÓN</b>	Opera con baja carga orgánica.	Altas tazas de carga orgánica.
<b>OLOR</b>	Puede ser controlado.	No existe.
<b>INSECTOS</b>	Control es mas caro.	No existe.
<b>PROTECCIÓN TÉRMICA</b>	Mala, a las bajas temperaturas afectan al proceso de remoción.	Buena, por acumulación de restos vegetales y el flujo subterráneo el agua mantiene una temperatura casi constante.
<b>ÁREA</b>	Requiere superficies de gran tamaño	Requiere de superficies de gran tamaño.
<b>COSTO</b>	Menor costo en relación al subsuperficial.	Mayor costo debido al material granular que puede llegar a incrementar el precio hasta un 30%.
<b>VALOR DE ECOSISTEMA</b>	Mayor valor como ecosistema para la vida salvaje, el agua es accesible a la fauna.	Menor valor como ecosistema para la vida, el agua es difícilmente accesible a la fauna.
<b>USOS GENERALES</b>	Son de restauración y creación de nuevos ecosistemas.	Tratamiento de las aguas residuales principalmente para casas aisladas y núcleos menores de 200 habitantes.
<b>OPERACIÓN</b>	Son tratamientos adimensionales a los sistemas convencionales usados para el tratamiento terciario y el tratamiento de calidad.	Pueden utilizarse como tratamiento secundario.

**Fuente.** Oscar Delgadillo, Alan Camacho, and Mauricio Andrade Serie, *Depuración de Aguas Residuales Por Medio de Humedales Artificiales*, 2010  
[http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion\\_de\\_aguas\\_residuales\\_por\\_medio\\_de\\_humedales\\_artificiales.pdf](http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf)  
<http://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales>.

## 2.2. MARCO CONCEPTUAL

La materia orgánica (MO), representa gran parte de la contaminación del agua residual (AR), debido a que se agota el oxígeno disuelto; está compuesta de carbono, hidrogeno, oxigeno, nitrógeno, fosforo, azufre, hierro y elementos comunes a todos los compuestos orgánicos<sup>20</sup>.

Dentro de la MO en el AR se encuentran las proteínas, son el principal constituyente de los organismos animales, sin embargo, las plantas también tienen un bajo contenido, un 40 a 60 % del agua residual tiene proteínas<sup>21</sup>. Los carbohidratos, están ampliamente distribuidos en la naturaleza, el 25 al 50 % del AR tiene carbohidratos, incluye azúcares, almidones, celulosa y fibra de madera; los almidones son más estables, pueden convertirse en azúcares por actividad microbiana; la celulosa y fibra de madera se conoce como fibra, son solubles y resistentes a la descomposición en las aguas residuales<sup>22</sup>. Los aceites y grasas, son compuestos de glicerol y alcohol, elementos muy estables, difíciles de descomponer por bacterias en las AR, por lo tanto, tienen que ser removidas antes del tratamiento o traerán problemas en la descomposición de la materia orgánica. Los surfactantes, son moléculas grandes, ligeramente solubles en agua y que producen espuma. Se conocen como detergentes, estos pueden causar grandes problemas en la vegetación de los humedales artificiales<sup>23</sup>.

Las aguas residuales o aguas servidas, son aquellas que provienen de actividades humanas de origen urbano y rural, llevan en su composición agua y otros componentes orgánicos e inorgánicos que generalmente se vierten a fuentes hídricas<sup>24</sup>. En las aguas servidas se encuentran compuestos químicos y biológicos, los cuales se clasifican como se muestra en la Figura 1.

---

<sup>20</sup>A Orozco, *Bioingeniería de Aguas Residuales* (Acodal, 2005) <<https://books.google.com.co/books?id=t5w5EZf1VhMC>>.

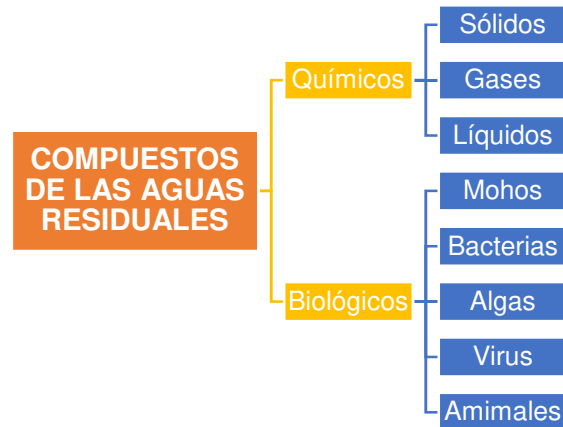
<sup>21</sup> R R Olmos, R S Marqués, and F V Moreto, *El Agua En El Medio Ambiente: Muestreo Y Análisis* (Universidad Autónoma de Baja California, 2003) <<https://books.google.com.co/books?id=b8l-xhcHPEYC>>.

<sup>22</sup> A Orozco, *Bioingeniería de Aguas Residuales* (Acodal, 2005) <<https://books.google.com.co/books?id=t5w5EZf1VhMC>>.

<sup>23</sup>A Orozco, *Bioingeniería de Aguas Residuales* (Acodal, 2005) <<https://books.google.com.co/books?id=t5w5EZf1VhMC>>.

<sup>24</sup> M S Calvo, *Aguas Residuales: Tratamiento Por Humedales Artificiales*, Colección Ingeniería Del Medio Ambiente Series (Mundi-Prensa, 1999) <<https://books.google.com.co/books?id=kkaNOWAACAAJ>>.

**Figura 6.** Compuestos de las AR.



**Fuente.** Autores.

Generalmente las aguas residuales contienen grandes cantidades de sólidos, algunos de ellos son partículas gruesas que se depositan por gravedad en fuentes receptoras, se les conoce como sólidos sedimentables, se componen de un 70% de sólidos orgánicos\* y 30% sólidos inorgánicos\*\*. Los sólidos en suspensión, son partículas flotantes que son fáciles de distinguir a simple vista, generalmente contienen un 68% de sólidos orgánicos y un 32% de sólidos inorgánicos. Por último, se encuentran los sólidos disueltos, generalmente se compone en un 40% de productos orgánicos y un 60% de sólidos inorgánicos<sup>25</sup>.

Algunos gases normalmente se encuentran en las aguas residuales, como el oxígeno disuelto (OD), es uno de los principales parámetros para tratamiento de aguas residuales (TAR) y evaluación de calidad de agua, indica la presencia de oxígeno en el agua. El ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) se forma al descomponerse en un medio anaeróbico, tiene contenido de azufre y se manifiesta por fuertes olores. El anhídrido carbónico, se produce en las fermentaciones de los compuestos orgánicos (CO<sub>2</sub>) en aguas residuales y el metano, se forma a partir de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica<sup>26</sup>.

---

\* Son aquellos sólidos que pueden ser descompuestos por la acción natural de organismos vivos como lombrices, hongos y bacterias principalmente

\*\* Son aquellos sólidos que no pueden ser degradados naturalmente, si esto es posible sufren una descomposición demasiado lenta

<sup>25</sup> Nicolas Cortez and Diana Cristancho, 'TRATAMIENTO DE BAJO IMPACTO EN LAS AGUAS RESIDUALES DEL HOSMIC' (Universidad Militar Nueva Granada, 2005).

<sup>26</sup> Nicolas Cortez and Diana Cristancho, 'TRATAMIENTO DE BAJO IMPACTO EN LAS AGUAS RESIDUALES DEL HOSMIC' (Universidad Militar Nueva Granada, 2005).

Las bacterias pueden ser Inofensivas, útiles y perjudiciales al hombre, las útiles están formadas por organismos saprofitos\* que son importantes en la estabilización de la materia orgánica, las cuales, mediante sus enzimas, “transforman la materia orgánica compleja a otros compuestos más simples como los compuestos orgánicos”<sup>27</sup>.

Para conocer el nivel de contaminación orgánica del agua servida, se han descrito los siguientes parámetros de calidad:

- ❖ Carbón orgánico total (COT): Medida del contenido total de carbono presente en el agua residual, es la suma del carbón orgánico disuelto (COD) y el carbón orgánico en partículas (COP)<sup>28</sup>. Se considera en la actualidad, como el mejor parámetro para evaluar el contenido total de carbono, en una muestra de AR.
- ❖ Demanda total de oxígeno (DOT): “Es la cantidad de oxígeno necesario para llevar a todos los componentes de una muestra a su grado de oxidación máxima”<sup>29</sup>, se realiza de una manera teórica o por estequiometría.
- ❖ Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>): Es la cantidad necesaria de oxígeno disuelto en el agua, para la degradación de materia orgánica mediante procesos biológicos. Esta medición se efectúa según un protocolo normalizado en cinco días, lo que explica el término DBO<sub>5</sub>.
- ❖ Demanda Química de Oxígeno (DQO): “Determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo”<sup>30</sup>.

---

\* Su alimentación, consiste en sustancias orgánicas en estado de descomposición.

<sup>27</sup> Carmen Vargas, “Lagunas de estabilización” Teoría, Diseño, Construcción, Operación, Evaluación Y Mantenimiento’, 1996, p. 14.

<sup>28</sup> Bureau Veritas, *Manual Para La Formación En Medio Ambiente* (LEX NOVA, S.A.U., 2008) <<https://books.google.com.co/books?id=J7rMDpW49ZQC>>.

<sup>29</sup> M G Rodríguez, *Depuración de Aguas Residuales: Modelización de Procesos de Lodos Activos*, Biblioteca De Ciencias (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2006) <[https://books.google.com.co/books?id=qOu2R\\_xo2voC](https://books.google.com.co/books?id=qOu2R_xo2voC)>.

<sup>30</sup> R Hernán, ‘Demanda Química de Oxígeno Por Reflujo Cerrado Y Voluntaria’, *Instituto de Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales*, 2007, p. 11 <<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Química+de+Oxígeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>>.

- ❖ Nitrógeno: Es el componente principal de las proteínas, junto al fósforo, es un nutriente que ayuda al crecimiento de plantas, algas y bacterias, indispensables en el tratamiento del agua residual. También se tiene el nitrógeno total, que “comprende varias formas: Nitrógeno orgánico, que se determina como NTK; amoníaco, que es el producto de la digestión del nitrógeno orgánico, por lo que el nitrógeno total comprende también el NH<sub>3</sub>; los Nitritos y nitratos, que son producto de la oxidación del NTK”<sup>31</sup>.
  
- ❖ Fósforo: Parte de la cantidad de fósforo en el agua residual proviene de los desechos humanos, actividades industriales, detergentes sintéticos y productos de limpieza<sup>32</sup>. Este elemento contiene nutrientes que favorecen el crecimiento excesivo de algas, es por esto que se debe controlar el contenido de fósforo en el agua residual. “El fósforo se encuentra en disolución acuosa como ortofosfatos, polifosfatos o fosforo orgánico”<sup>33</sup>.

### 2.3. MARCO LEGAL

La resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Desarrollo Sostenible, establece los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. También se encuentran los parámetros y sanciones que exigen las identidades para el buen uso y cumplimiento de los vertimientos<sup>34</sup>.

Para destinar las aguas se debe contar con un plan de ordenamiento, algunos de los aspectos más importantes que se tienen en cuenta son: los usos existentes, las proyecciones de usos de agua por aumento de demanda, los criterios de calidad, normas vigentes y las preservaciones de las características naturales del recurso<sup>35</sup>.

---

<sup>31</sup> A Orozco, *Bioingeniería de Aguas Residuales* (Acodal, 2005) <<https://books.google.com.co/books?id=t5w5EZf1VhMC>>.

<sup>32</sup> Ramón Sans Fonfría and Joan de Pablo Ribas, *Ingeniería Ambiental: Contaminación Y Tratamientos*, Coleccion Productiva (Marcombo, 1989) <<https://books.google.com.co/books?id=kumplOJs6T0C>>.

<sup>33</sup> José Villaseñor Camacho, *Eliminación Biológica de Fósforo En Aguas Residuales Urbanas*, Tesis Doctorales (Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, 2001) <<https://books.google.com.co/books?id=8Vlu05kqFEgC>>.

<sup>34</sup> Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 'Resolucion Vertimientos 631 2015', 2015, p. 62.

<sup>35</sup> Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 'Resolucion Vertimientos 631 2015', 2015, p. 62.

De acuerdo a la resolución 0631 del 2015 en el Artículo 8, se encuentran los parámetros fisicoquímicos con sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales (ARD y ARnD) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos superficiales. A partir de lo anterior, el valor máximo de DBO<sub>5</sub> es de 90 mgO<sub>2</sub>/L.

En resolución 0330 de junio del 2017 en los tratamientos descentralizados, para el diseño de los humedales artificiales se deberá tener en cuenta los siguientes aspectos: caudal y características del afluente, tipo de vegetación que se va a emplear<sup>36</sup>.

A continuación, se muestra los rangos de eficiencia en los procesos de tratamiento secundario según la resolución 0330:

**Tabla 2 .** Parámetro para el vertimiento de (DBO<sub>5</sub>).

<b>PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AR</b>	<b>REMOCIÓN (%)</b>
Demanda Bioquímica de Oxígeno para desechos domesticos	80-90

**Fuente.** Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, Resolución 0330 'Por La Cual Se Adopta El Reglamento Técnico Para El Sector de Agua Potable Y Saneamiento Básico - RAS Y Se Derogan Las Resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 Y 2320 de 2009', 2017, p. 182

<sup>36</sup> Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, *Resolucion 0330 'Por La Cual Se Adopta El Reglamento Técnico Para El Sector de Agua Potable Y Seneamiento Básico - RAS Y Se Derogan Las Resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 Y 2320 de 2009'*, 2017, p. 182.

### 3. METODOLOGÍA

Para la metodología del trabajo, se empleará el método cuantitativo, el cual consiste en seguir una secuencia lógica de pasos para la recopilación de información y análisis de datos; permitiendo dar respuesta a la pregunta de investigación. Para este estudio se utilizarán fuentes de información primarias, entre las cuales están: artículos, tesis y libros.

A continuación, se presentan las fases del trabajo:

**Fase I.** Reconocimiento en campo del terreno, donde se recopilará la siguiente información:

- ❖ Ubicación: Latitud, altitud y masas de agua.
- ❖ Clima: Temperatura, y humedad.
- ❖ Suelo: Capacidad de infiltración del agua.

**Fase II.** Análisis fisicoquímico del agua residual proveniente de las descargas del vertimiento (recopilación de muestras del AR). Se elegirá el tipo de Flujo, vegetación y sustrato del humedal artificial, que se adopta a las características demandas por el predio “Mi Ranchito”.

**Fase III.** Diseño hidráulico, donde se anexará memorias de cálculo y planos del humedal artificial, según el estudio técnico del análisis fisicoquímico del agua residual producida en el predio “Mi Ranchito”.

**Fase IV.** Construcción y puesta en marcha del humedal artificial, a partir de las siguientes actividades:

- ❖ Descapote: Esta actividad da inicio a la construcción del sistema de tratamiento. Su finalidad es la de retirar la capa vegetal que se encuentren en el sitio donde se construirá el humedal artificial.

- ❖ Levantamiento topográfico y replanteo: Una vez obtenido el plano definido en la fase 3, se procede, a realizar el trazo, que consiste en delimitar y marcar en el terreno las áreas en las cuales se construirán las diferentes estructuras necesarias para la implementación del humedal artificial.
- ❖ Excavación: Una vez definida en el terreno, se procede a excavar el volumen del humedal artificial de acuerdo a diseño realizado.
- ❖ Impermeabilización del área de construcción, por medio de una geomembrana.
- ❖ Relleno: Se procede a colocar un estrato de material granular en el área del geotextil.
- ❖ Construcción de estructuras de entrada y salida: Ensamblado del sistema de drenaje de conducción (tubería de entrada y salida).
- ❖ Inoculación de Vegetación: Es la última etapa en la construcción de un sistema de humedales artificiales. Esta actividad se realiza una vez el material granular se ha colocado y se han instalado todas las conducciones.

**Fase V:** Seguimiento y Control del tratamiento de las AR, se tomarán muestras de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) durante un periodo de 4 (cuatro) meses, para evaluar funcionamiento del humedal artificial en el predio “Mi Ranchito”.

**Fase VI.** Conclusiones y recomendaciones de acuerdo a los resultados obtenidos en el seguimiento y control del humedal artificial.



## 4. DISEÑO METODOLÓGICO

### 4.1. PARÁMETROS DE DISEÑO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL (HA)

**4.1.1. Tipo de Flujo del HA.** Una de las alternativas para el tratamiento de las aguas residuales propuestas por ingenieros es utilizar mecanismos existentes en la naturaleza, denominados “sistemas de tratamiento naturales”. Entre estos sistemas encontramos los humedales artificiales (flujo superficial y flujo subsuperficial). Los humedales artificiales requieren la misma cantidad de energía por cada kilogramo de contaminante degradado que los sistemas convencionales, esta fuente de energía es tomada de la naturaleza (energía solar, energía cinética del viento y energía química acumulada en la biomasa)<sup>37</sup>.

Para el diseño y construcción del humedal artificial se consideró los parámetros exigidos por el propietario, los cuales son:

- ❖ Evitar los malos olores.
- ❖ Fácil mantenimiento.
- ❖ Evitar la propagación de los vectores.
- ❖ Disminuir la carga orgánica presente en el predio.

De acuerdo a lo anterior y la información de la Tabla 1, se elige un humedal artificial de flujo subsuperficial, porque se adopta a los parámetros exigidos por el propietario. Los humedales de flujo subsuperficial cumplen con características muy similares; son clasificados según el sentido de circulación del fluido (horizontal HFS y vertical VFS). El tipo de flujo que se adapta a las características del predio es el horizontal, ya que maneja caudales bajos e intermitentes. Una de las ventajas que ofrece es el tiempo de retención hidráulico, ya que es mucho mayor al VFS, lo cual va a garantizar una mayor remoción de DBO<sub>5</sub>, fosforo y nitrógeno presente en el agua<sup>38</sup>.

---

<sup>37</sup> Javier and Mena Sanz, ‘Depuración de Aguas Residuales Con Humedales Artificiales : Ventajas de Los Sistemas Híbridos’, *Congreso Nacional de Medio Ambiente*, 2010, 1–25 <[http://www.alquimiaimasd.com/UserFiles/ficheros/IdiAplicada/2643\\_JMena.pdf](http://www.alquimiaimasd.com/UserFiles/ficheros/IdiAplicada/2643_JMena.pdf)>.

<sup>38</sup> Arda Yalcuk and Aysenur Ugurlu, ‘Comparison of Horizontal and Vertical Constructed Wetland Systems for Landfill Leachate Treatment’, *Bioresource Technology*, 100.9 (2009), 2521–26 <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.029>>.

**4.1.2. Diseño del HA.** Para el diseño del humedal artificial se tomaron dos metodologías con la finalidad de escoger la más adecuada para la topografía del predio. El primer método de diseño se tomó de la “Guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujos subsuperficial” de la Environmental Protection Agency (EPA)<sup>39</sup>.

Para calcular el área de la superficie es necesario utilizar la Ecuación 1 de eliminación de DBO<sub>5</sub> de primer orden<sup>40</sup>.

$$A_s = (L)(W) = Q \left( \ln \frac{C_o}{C_e} \right) + K_T \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Según Arrhenius:

$$K_T = K_{20}(\theta) = K^{T-20^\circ C} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

---

<sup>39</sup> EPA, 'GUIA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO CON FLUJOS SUBSUPERFICIALES', 1993, p. 27 <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/40001CXS.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1991+Thru+1994&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>> [accessed 17 April 2018].

<sup>40</sup> EPA, 'GUIA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO CON FLUJOS SUBSUPERFICIALES', 1993, p. 27 <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/40001CXS.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1991+Thru+1994&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>> [accessed 17 April 2018].

**Tabla 3.** Calculo del área superficial - Método EPA.

<b>CALCULO DEL ÁREA SUPERFICIAL H.A</b>	
<b>Variables</b>	<b>Valor</b>
Q = Caudal de Diseño del Humedal ( m <sup>3</sup> /día)	0,6
Ce= Concentración Efluente (mg/L)	525
Co= Concentración Afluente (mg/L)	1049
T= Temperatura (°C)	18
K20= Constante de temperatura del AR	1,104
KT= Constante de Reacción de primer orden (d <sup>-1</sup> )	0,98
h= Profundidad del humedal (m)	0,75
n= Porosidad del Medio Granular	35%
Área superficial de humedal (m <sup>2</sup> )	2

**Fuente.** Autores

Para las dimensiones del humedal se hizo la relación Largo ancho 2:1.

**Tabla 4.** Calculo de las dimensiones – EPA.

<b>DIMENSIONES DEL H.A</b>	
<b>Variables</b>	<b>Valor</b>
L*W (m <sup>2</sup> )	2
L= Largo (m)	2W
W= ancho (m)	1
L= Largo (m)	2
S = Pendiente (m/m)	0,005
Ks= Conductividad Hidráulica (m/día)	1000

**Fuente.** Autores

Para la siguiente metodología se tomó el libro “Depuración de las aguas residuales por medio de humedales artificiales” en donde es muy importante tener en cuenta los siguientes criterios:

- ❖ Se considera que el flujo a través del medio poroso es de forma uniforme.
- ❖ La ley de Darcy describe el flujo a través del medio poroso.

El cálculo del área superficial se realiza en función al parámetro concentración de DB0<sub>5</sub>. El área se calcula a través de la Ecuación 3<sup>41</sup>.

$$A_s = \frac{Q * \ln\left(\frac{C_0}{C}\right)}{KT * h * n} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

$$K_T = 1.1.04 * 1.06^{T-20^{\circ}C} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

**Tabla 5.** Calculo del área superficial - Método Delgadillo.

<b>CALCULO DEL ÁREA SUPERFICIAL DEL H.A</b>	
<b>Variables</b>	<b>Valor</b>
Q = Caudal de Diseño del Humedal ( m <sup>3</sup> /día)	0,6
C= Concentración Efluente (mg/L)	525
Co= Concentración Afluente (mg/L)	1049
T= Temperatura (°C)	18
KT= Constante de Reacción de primer orden (d <sup>-1</sup> )	0,98
h= Profundidad del humedal (m)	0,75
n= Porosidad del Medio Granular	35%
Área superficial de humedal (m <sup>2</sup> )	1,6

**Fuente.** Autores

Para las dimensiones del humedal se calculó el área de la sección del humedal para determinar el ancho y largo.

$$A_c = \frac{Q}{kS * S} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

<sup>41</sup> Oscar Delgadillo, Alan Camacho, and Mauricio Andrade Serie, *Depuración de Aguas Residuales Por Medio de Humedales Artificiales*, 2010  
[http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion\\_de\\_aguas\\_residuales\\_por\\_medio\\_de\\_humedales\\_artificiales.pdf%5Cnhttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales](http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf%5Cnhttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales).

$$W = \frac{A_c}{h} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$L = \frac{A_s}{W} \quad (\text{Ecuación 7})$$

**Tabla 6.** Calculo de las dimensiones - Método Delgadillo.

<b>DIMENSIONES DEL H.A</b>	
<b>Variables</b>	<b>Valor</b>
Ks= Conductividad Hidráulica (m/día)	1000
S = Pendiente (m/m)	0,005
Ac= Área de la Sección del Humedal (m <sup>2</sup> )	1,2
Ancho del Humedal (m)	1,6
Largo del Humedal (m)	1

**Fuente.** Autores

A continuación, se realiza una comparación de las dos metodologías para el diseño del humedal:

**Tabla 7.** Comparación de diseño del humedal artificial.

<b>METODOLOGÍA</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>E.P.A</b>	<b>Delgadillo</b>
Área (As)	m <sup>2</sup>	2	1,6
Ancho (W)	m	1	1,6
Largo (L)	m	2	1

**Fuente.** Autores

En la Tabla 7 se puede observar las dimensiones del HA de acuerdo a Environmental Protection Agency y Delgadillo, las dos metodologías son diferentes, pero en los resultados se acercan al mismo valor porque ambas toman como principio de la ley de Darcy, en donde describe el flujo a través de un medio poroso.

De acuerdo lo anterior se escogió la metodología de la EPA, porque la relación L:W permite hacer una construcción adecuada a las características del predio (Ver Anexo 5).

Para determinar el tiempo de retención hidráulico se utilizó la siguiente Ecuación:

$$\text{Tiempo de retención: } \frac{\text{Volumen de HA } m^3}{\text{Caudal } \frac{m^3}{d}} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$\text{Tiempo de retención: } \frac{2m * 1m * 0.75 m}{0.6 \frac{m^3}{d}}$$

*Tiempo de retención: 3 días*

**4.1.3. Estrato del HA.** Existen numerosos estudios que proporcionan datos acerca de la importancia que tiene el estrato en los humedales artificiales; debido a que tiene una gran influencia en los procesos de depuración en las aguas residuales. El estrato sirve de soporte a la vegetación, permitiendo la fijación de la población microbiana (en forma de biopelícula), para la eliminación de los contaminantes presentes en el agua. La formación de biopelícula en el estrato permite la absorción de nutrientes (materia orgánica, nitrógeno y fosforo) en los ribosomas de la planta.

El tipo de material que se utiliza en los estratos son: arena grava y roca, para el diseño y construcción del humedal artificial se recomienda utilizar grava. Según Ishadeep Khanijo en su artículo "Nutrient Removal from Wastewater by Wetland System" señala en los resultados que los microorganismos que degradan la materia orgánica, forman una biopelícula alrededor de la grava y de las raíces de las plantas, proporcionando una mayor eficiencia en la remoción de DBO<sub>5</sub><sup>42</sup>. Sin embargo, no solo el material influye en la remoción de materia orgánica, también el tamaño del estrato. Se recomienda utilizar grava con menos de 19 mm de diámetro, si se utiliza grava con diámetros muy grandes, se incrementa la velocidad de paso del agua, resultando un flujo turbulento que no cumpla la ley de Darcy para el diseño. La grava

---

<sup>42</sup> Ishadeep Khanijo, 'Nutrient Removal from Wastewater by Wetland System', *Wetlands*, 2002, 10 <<http://home.eng.iastate.edu/~tge/ce421-521/ishadeep.pdf>>.

de menor tamaño presenta a su vez un mayor contacto en el área superficial para la actividad microbiana y la adsorción de sustrato<sup>43</sup>.

De acuerdo a lo anterior, se utilizó grava con un diámetro de 12.50 mm (1/2"), 9.50 mm (3/8") y 4.75 mm (#4), debido a los beneficios mencionados. Para esto, se realizó un análisis granulométrico, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Análisis granulométrico.

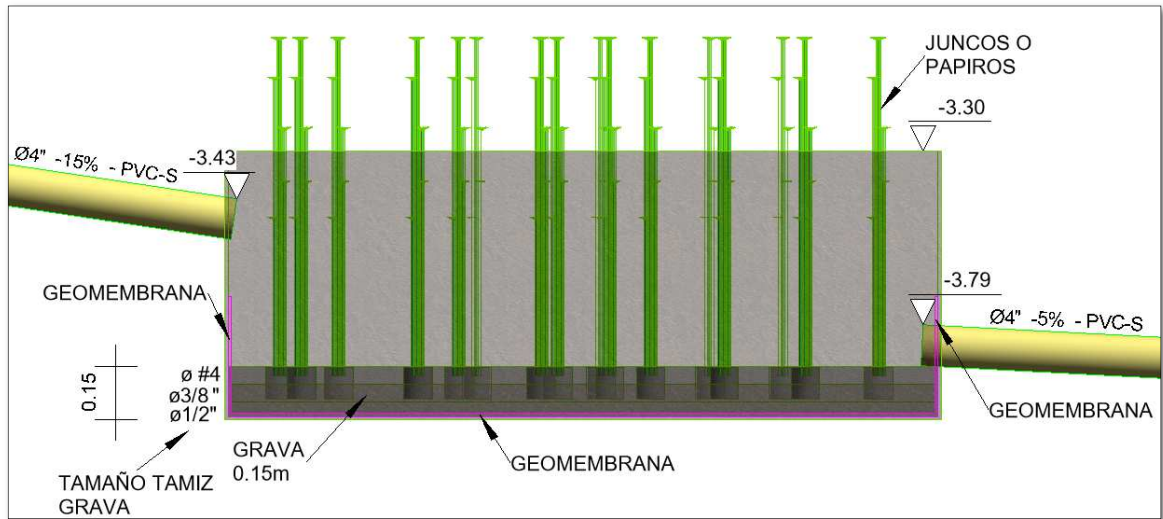
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b>					
<b># Tamiz</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>Peso Retenido (Kg)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Retenido Acumulado</b>	<b>% Pasa</b>
3/4"	19	0	0	0	100
1/2"	12,5	21,38	38,54	38,54	61,46
3/8"	9,5	13,66	24,63	63,17	36,83
N° 4	4,75	15,6	28,12	91,3	8,7
Fondo		4,83	8,7	100	0
$\Sigma$		55,47	100		

**Fuente.** Autores

En la Tabla 8 se observa que la mayor cantidad de grava es la de 12.50 mm (1/2") de diámetro, por ser la más grande. La cantidad en el fondo no fue depositada en el humedal artificial al ser un agregado fino, el cual puede ocasionar la pérdida de porosidad del material granular. Además, muestra la distribución del material de acuerdo a su diámetro, en donde el 38.54% es de 12.50 mm (1/2"), el 24.63% es de 9.50 mm (3/8") y un 28.12% es de 4.75 mm (#4). A partir de esto, se realizó la distribución de la grava en el humedal artificial (ver Figura 7).

<sup>43</sup> Facul Tao and D E Ingeniería Ambiental, 'Daniel Arturo Peña Orocaja', 2012.

**Figura 7.** Distribución de la grava en el humedal artificial.



**Fuente.** Autores

Con base en la Tabla 8, se realizó el cálculo del coeficiente de uniformidad (CU) y coeficiente de curvatura (CC), mediante las siguientes expresiones:

$$CU = \frac{D60}{D10} \quad \text{(Ecuación 9)}$$

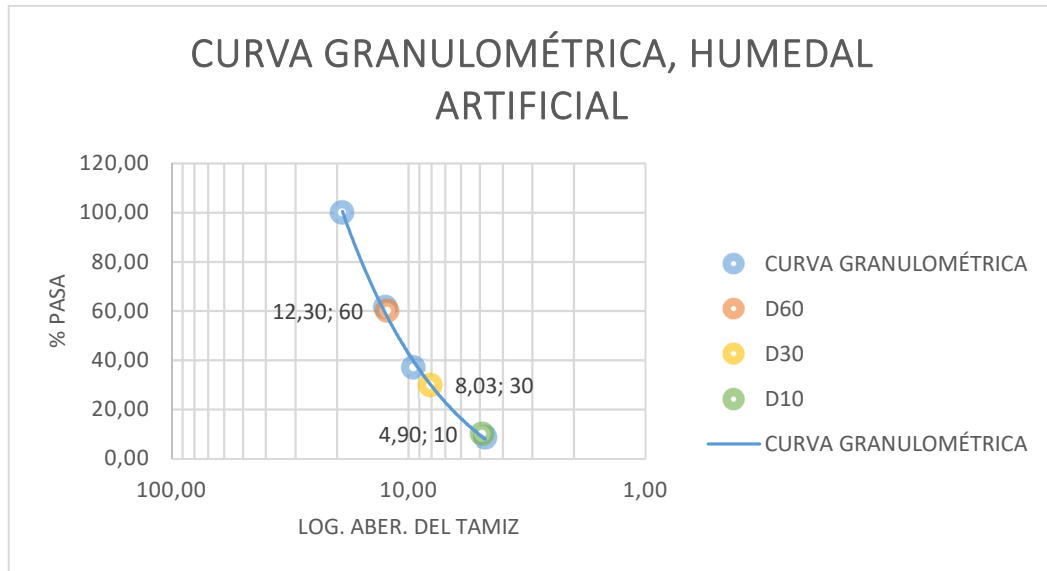
$$CC = \frac{D30^2}{D10 * D60} \quad \text{(Ecuación 10)}$$

donde D10, D30 y D60 son el tamaño efectivo para un 10, 30 y 60 % del porcentaje del material que pasa.

La Figura 8 muestra los valores de D10, D30 y D60 en la curva granulométrica construida de acuerdo a la Tabla 8, donde el eje de las abscisas es el logaritmo (base 10) de la abertura del tamiz y el eje de las ordenadas es porcentaje que pasa.

**Figura 8.** Curva granulométrica y tamaños efectivos.





**Fuente.** Autores

Teniendo en cuenta lo anterior, y aplicando la Ecuación 9 y 10, se obtienen los valores indicados en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Coeficiente de uniformidad y curvatura.

COEFICIENTES	
Variables	Valor
CU= Coeficiente de Uniformidad (~)	2,51
CC= Coeficiente de Curvatura (~)	1,07

**Fuente.** Autores

De acuerdo a la Tabla 9 y al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el coeficiente de uniformidad es bajo<sup>44</sup>, por lo cual se considera una grava mal gradada (GP), esto indica que no hay una variación significativa en el tamaño de la grava (ausencia de tamaños intermedios). Sin embargo, la granulometría es adecuada para ser usada como estrato en el humedal artificial, de acuerdo a la Environmental Protection Agency.

<sup>44</sup> Alberto Alvarez and Pabón De, *ICPC - Medellín*.

**4.1.4. Vegetación del HA.** La vegetación es uno de los principales componentes para el diseño y construcción del HA, sus funciones son: Absorción de nutrientes fosforo, nitrógeno y materia orgánica presentes en el AR; este proceso se realiza en las raíces y ribosomas de la planta, airear el sistema y facilitar oxígeno a los microorganismos existentes en el AR, eliminación de contaminantes atreves de sus tejidos y filtración de los sólidos<sup>45</sup>.

Existen tres tipos de vegetación en los humedales artificiales:

- ❖ Vegetación Emergente: Son plantas enraizadas en el estrato y se desarrollan sobre la superficie del agua, tienen una gran capacidad de fotosíntesis y crecimiento<sup>46</sup>.
- ❖ Vegetación Flotante: Este tipo de planta se encuentra sobre el agua, manteniendo sus raíces sumergidas, sin estar fijadas a un soporte<sup>47</sup>.
- ❖ Vegetación Sumergida: Están sumergidas en el agua, muestran menor velocidad de productividad que los otros dos tipos de vegetación, esto es debido a que, bajo el agua, la intensidad de la luz y la difusión del CO<sub>2</sub> son menores<sup>48</sup>.

---

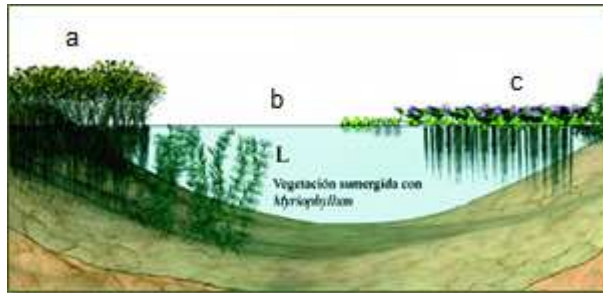
<sup>45</sup>Oscar Delgadillo, Alan Camacho, and Mauricio Andrade Serie, *Depuración de Aguas Residuales Por Medio de Humedales Artificiales*, 2010 <[http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion\\_de\\_aguas\\_residuales\\_por\\_medio\\_de\\_humedales\\_artificiales.pdf%5Cnhttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales](http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf%5Cnhttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales)>.

<sup>46</sup>Jesús Fernández González, 'Humedales Artificiales Para Depuración.', *Manual de fitodepuración.Filtros de Macrofitas En Flotación.*, 2002, 79–80.

<sup>47</sup> Jesús Fernández González, 'Humedales Artificiales Para Depuración.', *Manual de fitodepuración.Filtros de Macrofitas En Flotación.*, 2002, 79–80.

<sup>48</sup> Jesús Fernández González, 'Humedales Artificiales Para Depuración.', *Manual de fitodepuración.Filtros de Macrofitas En Flotación.*, 2002, 79–80.

**Figura 9.** Tipos de vegetación HA: a) Veg. emergente, b) Veg. sumergida y c) Veg. flotante.



**Fuente.** Juliana Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Juliana Hernández, and J Orlando Rangel, 'Caldasía.', *Caldasía*, 2009 <<https://revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/36112>> [accessed 26 March 2018].

Partiendo de lo anterior se escogió la vegetación emergente; porque ofrece varios beneficios, uno de ellos es que las raíces se fijan al estrato permitiendo la absorción de nutrientes y remoción de materia orgánica. Otro beneficio es que el crecimiento, fotosíntesis y reproducción es mayor que los otros dos tipos de vegetación<sup>49</sup>.

La remoción de materia orgánica y absorción de nutrientes depende de muchos factores: de la especie, tamaño, época del año, edad de la planta y de las condiciones oxidativas de las raíces (las plantas suministran oxígeno a sus propias raíces para mantener el lecho en condiciones aeróbicas). Esta cantidad de oxígeno transportado al lecho es uno de los factores de investigación, Según Pérez Salazar Sasa Marín en su artículo "Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales", afirman que la especie *Cyperus papyrus* (papiro), presenta ciertas características que le permite un buen desempeño en la remoción de materia orgánica y nutrientes (en el tratamiento de las aguas residuales domésticas), porque tiene grandes ribosomas, raíces, toleran temperaturas bajas y pH entre 6 a 8, entre otras; además su capacidad de reproducción y crecimiento son altos<sup>50</sup>. De acuerdo a lo anterior se

<sup>49</sup> MA ELENA PÉREZ LÓPEZ, "Selección de Plantas Acuáticas Para Establecer Humedales En El Estado de Durango", *Tesis Para La Obtencion Del Grado de Doctor En Ciencia Y Tecnología Ambiental*, 2009, 109.

<sup>50</sup> Thaneeya Perbangkhem and Chongchin Polprasert, 'Biomass Production of Papyrus (*Cyperus Papyrus*) in Constructed Wetland Treating Low-Strength Domestic Wastewater', *Bioresource Technology*, 101.2 (2010), 833–35 <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.062>>.

escogió la especie *Cyperus papyrus*, porque se adapta a las características del predio, como la temperatura, pH y la remoción de  $DBO_5$ .

## 4.2. PROCESO CONSTRUCTIVO DEL HA

Este proceso tiene como objeto dar una guía para la construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial. La información que a continuación se da es una alternativa de construcción de un HA que se realizó en el predio “Mi Ranchito”. Esta alternativa se puede utilizar en áreas pequeñas, que no cuenten con un sistema de alcantarillado y tengan que hacer disposición de las aguas residuales in situ.

**4.2.1. Localización y Replanteo.** Se realizó un levantamiento topográfico para determinar las cotas rasantes del pozo séptico existente y cota clave de las tuberías existentes, con el fin de ubicar la tubería a instalar, cajas de inspección a construir y el HA. Una vez generado el plano (ver Anexo 4) se procede a delimitar y marcar las áreas en donde se ubicarán los diferentes componentes necesarios para la construcción del HA.

**Figura 10.** Localización y replanteo.



a) Localización del humedal.



b) Levantamiento topográfico.



c) Localización de la caja de inspección.

**Fuente.** Autores.

**4.2.2. Excavación del Terreno.** Después de delimitar y marcar las áreas donde se ubicó los diferentes componentes del humedal artificial, se procede a la excavación de la tubería con una profundidad de 0.15 m a 0.45 m y una longitud de 18 metros. Las cajas de inspección de 0.60 m\*0.60 m; aguas arriba del humedal artificial tiene una profundidad de 0.45 m y aguas abajo de 0.50 m. La excavación del humedal artificial se realizó de acuerdo al diseño (1m\*2m\*0.75m).

**Figura 11.** Excación de cajas de inspección, HA y tubería.



*a) Excavación del humedal artificial.*



*b) Excavación de cajas de inspección.*



*c) Excavación de la tubería.*

**Fuente.** Autores

**4.2.3. Instalación de Tubería.** Se realizó una conexión utilizando una Tee de  $\varnothing 3" \times \varnothing 2"$  entre la tubería del baño y de la cocina, debido a que el desagüe de la cocina iba directo a la zanja aledaña, lo cual no permitía la llegada del AR al pozo de inspección, por esto se generó un sólo colector a la llegada del pozo séptico, que hacen una descarga de las AR (producidas por el predio) al HA (ver Figura 12). El sistema de desagüe y colector de entrada del HA fue instalado con una tubería en PVC sanitaria de 4" (cuatro pulgadas) de diámetro y una longitud de 18 metros.

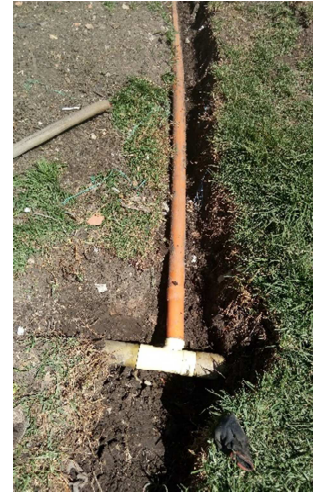
**Figura 12.** Instalación de tubería de entrada y salida del humedal y conexión.



*a) Instalación de la tubería de entrada y salida del humedal.*



*b) Estado actual de la tubería del baño, cocina y lavadero.*



*c) Conexión de la tubería del baño cocina y lavadero.*

**Fuente.** Autores

**4.2.4. Construcción de Cajas de Inspección.** Se utilizó ladrillo recocido común para construcción de las cajas de inspección. El ladrillo se colocó por hiladas de abajo hacia arriba en el contorno de la caja hasta alcanzar la altura deseada. Luego de tener el fondo y paredes de la caja, se pañeta con mortero de 1:4 con un espesor de 2 cm. La base consiste en una losa de concreto de 10 cm de espesor con una dosificación 1:2:3 fundido sobre una capa de recebo. Después se construyó la cañuela de sección semicircular, con un radio igual al de la tubería. Las cajas tienen 0.6\*0.60 m<sup>2</sup> con profundidades de 0.45 m y 0.50 m. La tapa tiene un refuerzo con varillas de diámetro de 3/8" y fundida en concreto.

**Figura 13.** Construcción de cajas de inspección.



*a) Caja de inspección de entrada.*



*b) Refuerzo de la tapa de entrada.*



*c) Fundida de la caja de inspección.*

**Fuente.** Autores

**4.2.5. Impermeabilización.** Consiste en colocar una geomembrana GEOPROTEC que cubre la mitad de las paredes laterales y área superficial del humedal artificial.

**Figura 14.** Impermeabilización.



*a) Compactación del suelo.*



*b) Instalación de la Geomembrana.*



*c) Geomembrana.*

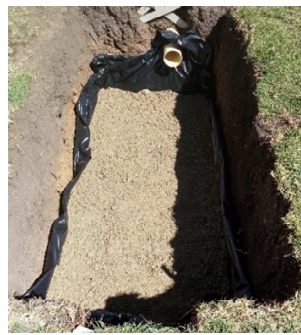
**Fuente.** Autores

**4.2.6. Relleno.** Antes de colocar la grava, se agregó una capa de arena para evitar fisuras en la geomembrana. Para la grava se realizó un ensayo de granulometría con los siguientes tamices ½", 3/8" y #4.

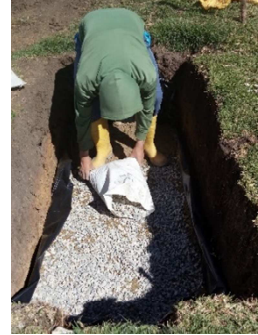
**Figura 15.** Relleno.



a) Ensayo de granulometría.



b) Capa de arena.



c) Capa de grava.

**Fuente.** Autores

**4.2.7. Inoculación de vegetación.** El proceso que se utilizó para inoculación de vegetación fue la plantación, que consiste en el trasplante de los tallos de las plantas a utilizar, las cuales fueron papiros. Las raíces se colocaron a 10 cm por debajo de la superficie del estrato. Posteriormente, el lecho debe inundarse con agua hasta la superficie o rociarse con frecuencia, pero siempre se debe tener el cuidado de que el nivel del agua no sobrepase la altura de las plantas.

**Figura 16.** Inoculación de vegetación.



**Fuente.** Autores



### 4.3. MODELACIÓN MATEMÁTICA

**4.3.1. Módulo de Dispersión.** El módulo de dispersión es un parámetro que permite conocer, si se presenta flujo pistón o mezcla completa en los humedales artificiales. La condición ideal en un humedal artificial es que el flujo sea pistón, por lo que el fluido que entra al sistema, lo hace de forma continua sin que se mezcle con cualquier otro elemento durante su recorrido por el humedal artificial. Caso contrario ocurre en la mezcla completa, donde una agitación perfecta ocasiona que en todos los puntos del humedal artificial la composición y propiedades físicas del fluido sean iguales<sup>51</sup>.

Para determinar el módulo de dispersión, se emplea la Ecuación 10.

$$\frac{D}{vL} = \alpha * \frac{u}{u^*} * \frac{W^2}{Lh} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

- ❖  $D/vL$  es el módulo de dispersión.
- ❖  $\alpha$  es una constante que depende de la forma de la sección transversal. Para efectos de cálculo se toma  $\alpha=1$ .
- ❖  $u$  es la velocidad media del flujo en el humedal artificial (m/d).
- ❖  $u^*$  es la velocidad cortante o dinámica.
- ❖  $W$  es el ancho del humedal artificial.
- ❖  $L$  es la longitud del humedal artificial.
- ❖  $h$  es la profundidad del humedal artificial.

---

<sup>51</sup> Ing I López and Ing L Borzacconi, 'INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE REACTORES 2009 Facultad de Ingeniería', 2009, p. 16.

La Tabla 10 muestra el valor del módulo de dispersión, donde este es pequeño y tiende a cero, por lo tanto, se considera una dispersión despreciable (tiende a ser un flujo pistón). La presencia de flujo pistón en el humedal artificial, se podría asumir la no existencia de zonas muertas y no posibles cortos circuitos<sup>52</sup>.

**Tabla 10.** Cálculo del módulo de dispersión.

<b>CÁLCULO DEL MÓDULO DE DISPERSIÓN</b>	
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
Q= Caudal de Diseño (m <sup>3</sup> /s)	6,94E-06
f= Coeficiente de fricción (~)	4,00E-02
D= Diámetro (m)	0,1016
μ= Viscosidad Dinámica (N*s)/m <sup>2</sup>	0,001139
d= Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	999,1
Re= Número de Reynolds (~)	1,60E+03
V=u= Velocidad Media del Flujo (m/s)	4,63E-06
v=u*= Velocidad Cortante (m/s)	0,02
α (~)	1
u= Velocidad Media del Flujo (m/d)	0,4
u*= Velocidad Cortante (m/d)	1551,1535
W= Ancho del Humedal (m)	1
L= Longitud del Humedal (m)	2
h= Profundidad del Humedal (m)	0,75
D/vL= Módulo de Dispersión (~)	0,0001719

**Fuente.** Autores

<sup>52</sup> Josué Bernardo, 'Modelación Hidráulica de Humedales Artificiales de Flujo Sub-Superficial Horizontal', *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, XXXVIII.1 (2017), 3–16.

#### 4.4. MODELACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE MODEL MUSE (MODFLOW)

ModelMuse es una interfaz gráfica de usuario desarrollada por el Servicio Geológico de los EE.UU. (USGS), para modelos ModFlow. ModFlow permite la modelación tridimensional del flujo de aguas subterráneas mediante el uso de puntos, líneas y polígonos<sup>53</sup>.

En este capítulo se utilizará para simular el flujo de un humedal artificial, con base en la metodología propuesta por Saavedra Liz, en su trabajo “Modelación hidráulica y de calidad del agua acoplada para humedales, mediante Processing Modflow”<sup>54</sup>, ajustada a las condiciones hidráulicas y ambientales del humedal artificial.

La Tabla 11 muestra los datos iniciales necesarios para la creación del modelo ModFlow en ModelMuse.

**Tabla 11.** Datos iniciales del modelo ModFlow.

DATOS INICIALES DEL MODELO		
	Variables	Valor
<b>Grilla</b>	Número de Columnas	8
	Número de Filas	4
	Ancho de Columna (m)	0,25
	Ancho de Fila (m)	0,25
<b>Coordenadas Grilla*</b> (Esquina Superior Izquierda)	Coordenada X (m)	2000
	Coordenada Y (m)	2000
	Coordenada Z (m)	2000
<b>Capas</b>	Model_Top (m)	2000
	Fondo_Humedal_Artificial (m)	1999,25

**Fuente.** Autores

<sup>53</sup> Richard B. Winston, ‘ModelMuse: A Graphical User Interface for MODFLOW-2005 and PHAST’, *U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A29*, 2009, 52 p <<http://pubs.usgs.gov/tm/tm6A29/tm6A29.pdf>>.

<sup>54</sup> SAAVEDRA FLECHAS LIZ, ‘Modelación Hidráulica Y De Calidad Del Agua Acoplada Para Humedales , Mediante Processing Modflow’, *Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería*, 2013.

\* Las coordenadas presentadas, fueron asumidas para la creación del modelo.

Para la simulación del humedal artificial es necesario conocer el tiempo de inyección, para esto se tienen las siguientes ecuaciones:

$$v = Kx * \frac{\Delta h}{L} \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$t = \frac{x}{v} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Aplicando la Ecuación 1 y sustituyendo en la Ecuación 2, se obtiene el valor del tiempo de inyección (ver Tabla 12).

**Tabla 12.** Cálculo del tiempo de inyección.

<b>CÁLCULO DEL TIEMPO DE INYECCIÓN</b>	
<b>Variables</b>	<b>Valor</b>
Kx= Conductividad Hidráulica (m/s) *	0,001157
Δh= Pérdida (m)	0,36
L= Ancho de Columna (m)	0,25
x= Longitud del humedal Artificial (m)	2
v= Velocidad (m/s)	0,001666
Tiempo de Inyección (s)	1200

**Fuente.** Autores

\* Se recomienda tomar el 10% del valor original, para evitar colmatación en el estrato Oscar Delgadillo, Alan Camacho, and Mauricio Andrade Serie, *Depuración de Aguas Residuales Por Medio de Humedales Artificiales*, 2010  
[http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion\\_de\\_aguas\\_residuales\\_por\\_medio\\_de\\_humedales\\_artificiales.pdf%5Cnhttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuraci-on-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales](http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf%5Cnhttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuraci-on-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales).

A continuación, se muestran los datos ingresados al modelo Modflow para la simulación del flujo y el transporte de contaminantes del humedal artificial (ver Tabla 13).

**Tabla 13.** Datos ingresados al modelo ModFlow.

<b>DATOS INGRESADOS AL MODELO</b>		
	<b>Variables</b>	<b>Valor</b>
<b>Flujo</b>	Kx= Conductividad Hidráulica (m/s)	0,01157
	Cabeza Hidráulica Inicial (m)	1999,41
	Cabeza Hidráulica Final (m)	1999,26
<b>Transporte Contaminantes</b>	Densidad de la Grava (g/m <sup>3</sup> )	1587000
	Coefficiente de Dispersión Longitudinal (~)	1**
	Porosidad (~)	0,35
	Sorption_Parameter1 (m <sup>3</sup> /g)	9,33E-06
	Sorption_Parameter2 (~)	0,002
	Concentración (mgO <sub>2</sub> /L)	1884***
	Tiempo de Retención (s)	259200
	Tiempo de Inyección (s)	1200
Número de Iteraciones	10000****	

**Fuente.** Autores

En la tabla anterior se encuentra el parámetro Sorption\_Parameter1, que es el coeficiente de distribución y el Sorption\_Parameter2, el coeficiente de transferencia de primer orden; los valores presentados fueron tomados al ser valores típicos para estos parámetros.

\*\* Valor por defecto del programa. Un valor menor genera resultados desfavorables en el modelo.

\*\*\* Obtenido mediante ensayos de laboratorio (muestra tomada en la caja de inspección localizada antes del humedal artificial).

\*\*\*\* Se asume, teniendo en cuenta el tiempo de retención hidráulico.

## 5. RESULTADOS

Para determinar la concentración de materia orgánica presente en el agua residual, se realizaron ensayos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) aguas arriba y aguas abajo del humedal artificial. Las muestras fueron tomadas teniendo en cuenta los lineamientos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)<sup>55</sup>.

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) realizados en el laboratorio de análisis químicos y microbiológicos BioPolab (ver Tabla 14 y Anexo 1, 2 y 3).

**Tabla 14.** Resultados de la Demanda Bioquímica de Oxígeno.

<b>DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO DBO<sub>5</sub> (mgO<sub>2</sub>/L)</b>		
<b>Fecha</b>	<b>Entrada del Humedal</b>	<b>Salida del Humedal</b>
<b>27/10/2017</b>	1049*	-
<b>6/04/2018</b>	1884	440

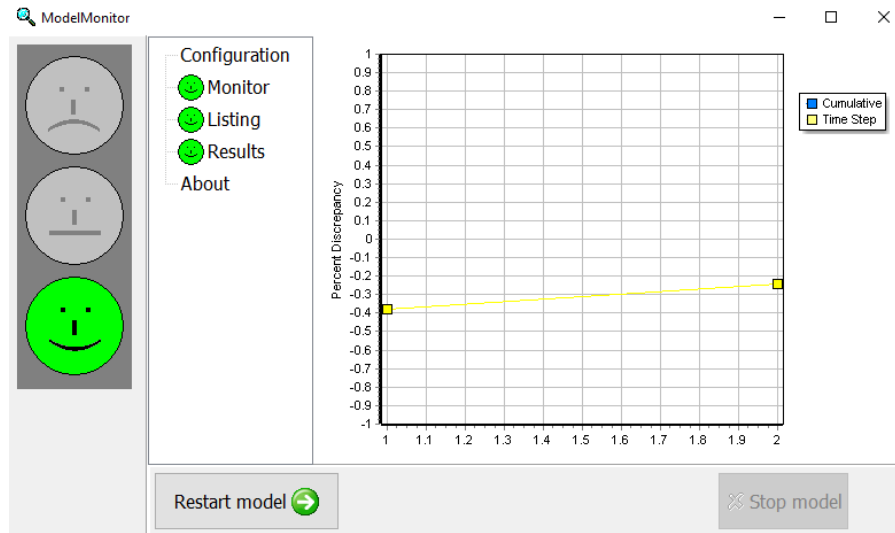
**Fuente.** Autores

Durante la modelación del humedal artificial con el software ModelMuse (ModFlow), se tiene los siguientes resultados: conductividad hidráulica, cotas de variación de la lámina de agua en él HA y concentraciones del contaminante (ver Figura 17,18,19 y 20).

---

<sup>55</sup> IDEAM, 'Informe IDEAM Sobre El Tratamiento de Aguas', 2015  
<<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021318/03TextoCompleto.pdf>>.  
\*Valor empleado para el dimensionamiento del humedal artificial.

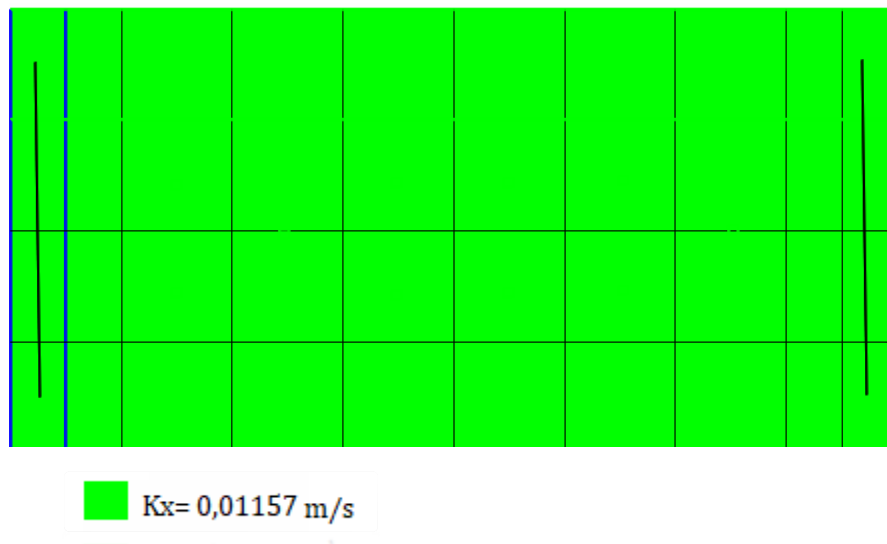
Figura 17. Ejecución del modelo ModFlow.



Fuente. ModelMuse

A continuación, se muestra la conductividad hidráulica del estrato, donde su función es transmitir el flujo del agua en el medio poroso<sup>56</sup>. El valor de conductividad hidráulica es de 1000 m/d equivalente a 0,01157 m/s, con una porosidad de 0,35.

Figura 18. Conductividad hidráulica  $K_x$  en el humedal artificial (m/s).

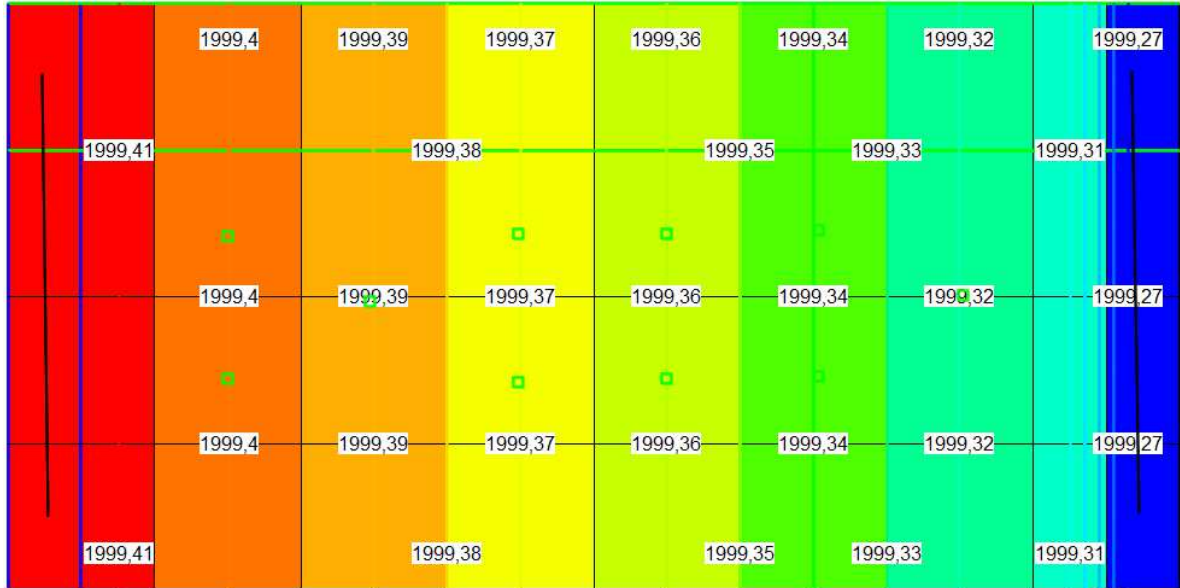


Fuente. ModelMuse

<sup>56</sup> Guilherme Manuel and Pereira Correia, 'Assessment of Clogging in Constructed Wetlands', 2016, 1–7.

En la Figura 19 se presenta como se reduce la lámina de agua en el transcurso del humedal, llegando a una diferencia de alturas de 15 cm.

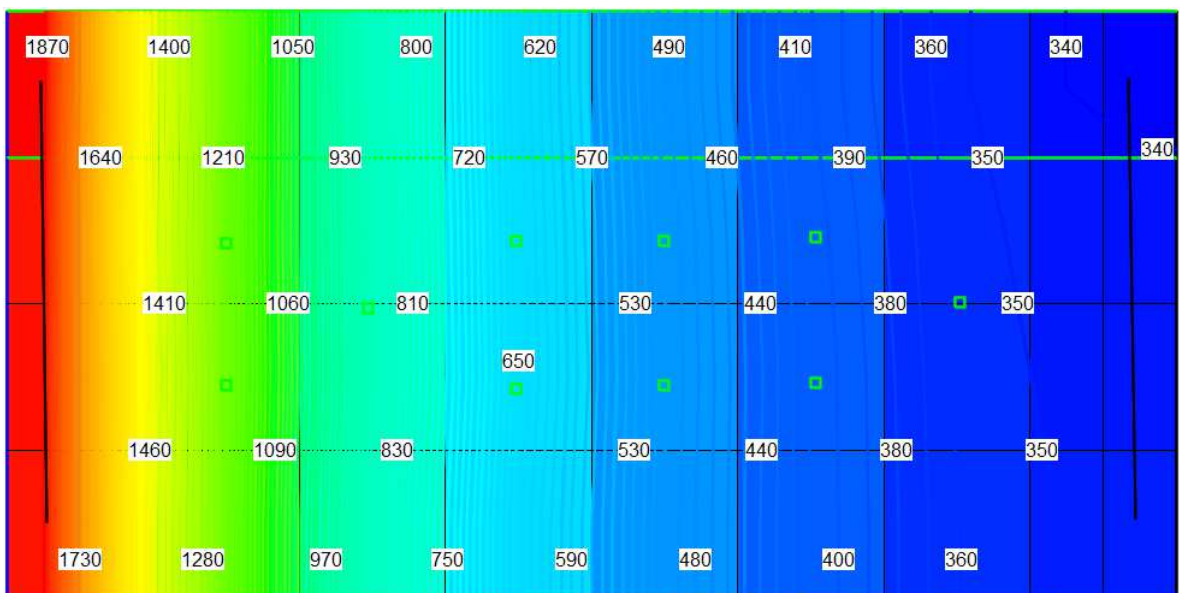
**Figura 19.** Variación de cotas de la lámina de agua (m.s.n.m).



**Fuente.** ModelMuse

La siguiente figura muestra como entra el contaminante (DBO<sub>5</sub>) y disminuye a medida que pasa por el humedal artificial, con un tiempo de retención de 3 días.

**Figura 20.** Resultados de simulación, transporte de contaminantes (mgO<sub>2</sub>/L).



**Fuente.** ModelMuse



## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Teniendo en cuenta los valores de concentración mostrados en la Tabla 14, se calcula el porcentaje de remoción de materia orgánica que tiene el humedal artificial, como se muestra a continuación:

$$\% \text{ Remoción} = \left( \frac{\text{Entrada DBO}_5 - \text{salida DBO}_5}{\text{Entrada DBO}_5} \right) * 100 \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$\% \text{ Remoción} = \left( \frac{1884 \frac{\text{mgO}_2}{\text{L}} - 440 \frac{\text{mgO}_2}{\text{L}}}{1884 \frac{\text{mgO}_2}{\text{L}}} \right) * 100$$

$$\% \text{ Remoción} \cong 77 \%$$

De acuerdo a lo anterior, con los valores de concentración reportados en la entrada y salida del HA, se tiene un porcentaje de remoción de materia orgánica del 77% en cuatro meses de funcionamiento, es un porcentaje de degradabilidad considerable para un sistema de tratamiento natural, que se está adaptado.

En la resolución 0330 del 8 de junio del 2017, en la sección 4 de tratamientos centralizados - Artículo 184, el porcentaje de remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) para un sistema de tratamiento secundario debe estar entre el 80% y 90%<sup>57</sup>, lo cual indica que el resultado del 77% de remoción en la concentración (DBO<sub>5</sub>) del HA se acerca a la eficiencia necesaria para los procesos de tratamiento de las ARD.

---

<sup>57</sup> Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, Resolución 0330 'Por La Cual Se Adopta El Reglamento Técnico Para El Sector de Agua Potable Y Saneamiento Básico - RAS Y Se Derogan Las Resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 Y 2320 de 2009', 2017, p. 182

En la Tabla 14 se muestran los resultados de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) a la salida del pozo séptico (entrada del HA), como se puede observar estos valores son altos, esto posiblemente se debe a que el pozo séptico haya llegado al límite de su vida útil o este colmatado provocando una recepción hidráulica.

De acuerdo lo anterior, se asumió un valor de DBO<sub>5</sub> de 90 mg/L, este es el límite máximo permisible en los vertimientos puntuales de aguas residuales domesticas según resolución 0631 de 2015 (Del Ministerio de Desarrollo Sostenible)<sup>58</sup>, para determinar qué valor de concentración del contaminante debería entrar al humedal artificial, sabiendo que tiene una remoción del 77%.

$$DBO_5 \text{ entrada} = \frac{\text{salida } DBO_5}{1 - \% \text{remoción}} \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$DBO_5 \text{ entrada} = \frac{90 \frac{mgO_2}{L}}{1 - .77}$$

$$DBO_5 \text{ entrada} = 391 \frac{mgO_2}{L}$$

El valor de entrada del HA debería ser de 391  $\frac{mgO_2}{L}$  para cumplir el valor de 90  $\frac{mgO_2}{L}$  exigido por la resolución 0631 de 2015.

En los cuatro meses de funcionamiento del HA, se encontró que en el estrato la materia orgánica se está reteniendo a la entrada, este proceso facilita la adsorción de nutrientes y materia orgánica por parte de la vegetación. Asimismo, la presencia de oxígeno en el agua, materia orgánica y nutrientes permite el crecimiento de nueva vegetación. A partir de lo anterior, la descomposición, absorción de nutrientes y presencia de oxígeno hacen que la concentración de materia orgánica (DBO<sub>5</sub>) disminuya a la salida del HA (Ver Figura 21).

---

<sup>58</sup> Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 'Resolucion Vertimientos 631 2015', 2015, p. 62.

**Figura 21.** a). Vegetación nueva en el estrato. b) Retención de materia orgánica.



(a)



(b)

**Fuente.** Autores

Según Perbangkhem y Polprasert en su artículo “Biomass production of papyrus (*Cyperus papyrus*) in constructed wetland treating low-strength domestic wastewater”, manifiestan que el papiro tiene una baja reproducción, sin embargo, en este estudio se encontró que tiene una tasa de reproducción alta, esto atribuido a las condiciones climáticas imperantes del predio (ver Figura 22). Uno de los beneficios que ofrece la reproducción de la vegetación es que incrementa la densidad de los tallos y ribosomas en el lecho, generando una mayor absorción de nutrientes y materia orgánica en las aguas residuales producidas en el predio. Otro de los beneficios que aporta es el incremento de biomasa del papiro, es que probablemente ayuda a oxidar la materia orgánica remanente, haciendo que disminuya el transporte de contaminantes que pasa por él HA.

**Figura 22.** Proceso de adaptación del H A. (a) Enero del 2018 (b) Abril del 2018.



(a)



(b)

**Fuente.** Autores

De acuerdo a los resultados de simulación (transporte de contaminantes) en ModelMuse mostrados en la Figura 20, se tiene que a la salida del HA el valor de concentración reportado es de 340 mg/L. Reemplazando nuevamente en la Ecuación 14, se tiene el siguiente porcentaje de remoción:

$$\% \text{ Remoción} = \left( \frac{1884 \frac{\text{mgO}_2}{\text{L}} - 340 \frac{\text{mgO}_2}{\text{L}}}{1884 \frac{\text{mgO}_2}{\text{L}}} \right) * 100$$

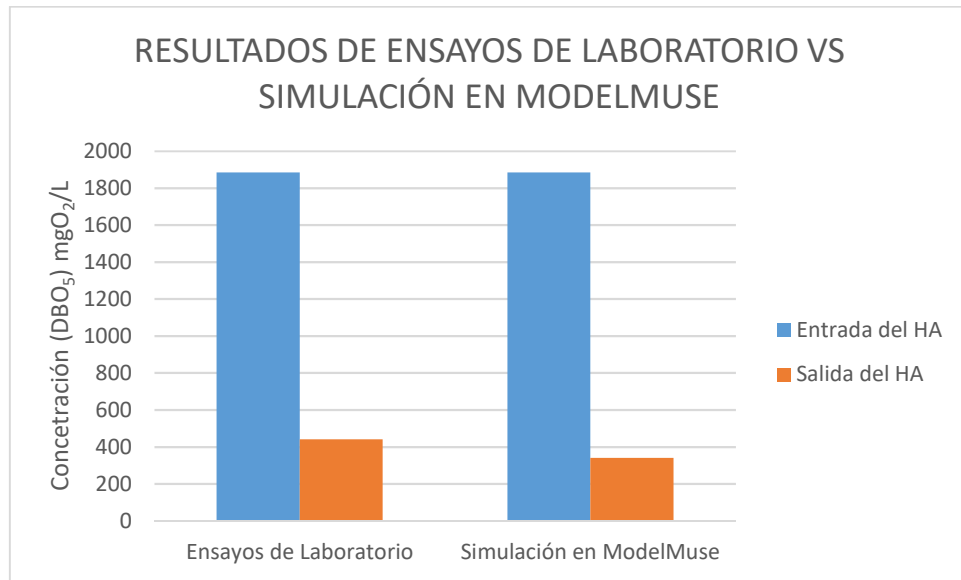
$$\% \text{ Remoción} \cong 82 \%$$

Lo anterior, muestra que el porcentaje de remoción es del 82 %, lo cual daría cumplimiento a lo estipulado por la resolución 0330 del 8 de junio del 2017, en la sección 4 de tratamientos centralizados - Artículo 184<sup>59</sup>.

<sup>59</sup> Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, Resolución 0330 'Por La Cual Se Adopta El Reglamento Técnico Para El Sector de Agua Potable Y Saneamiento Básico - RAS Y Se Derogan Las Resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 Y 2320 de 2009', 2017, p. 182

Para realizar un análisis comparativo y gráfico entre los resultados de los ensayos de laboratorio y los de simulación en ModelMuse, se muestra la siguiente figura:

**Figura 23.** Comparación entre los resultados de ensayos de laboratorio y simulación en ModelMuse.



**Fuente.** Autores

En la Figura 23 se puede observar que la concentración de salida en la simulación es menor a la del ensayo de laboratorio, porque los valores de concentración en el modelo ModFlow están sujetos a la variación de los datos ingresados y datos asumidos.

Existen estudios que proporcionan información sobre el funcionamiento de la vegetación, según Pérez Salazar en su artículo “Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales”, donde se usó como vegetación, papiros y él HA fue sometido a concentraciones (DBO<sub>5</sub>) bajas. En él HA construido en Usme, se encontró que la vegetación resiste concentraciones de materia orgánica altas respecto a las típicas, lo cual propone un estudio de implementación de papiros para la construcción de futuros HA en Usme con cargas altas de DBO<sub>5</sub>, teniendo en cuenta parámetros ambientales e hidráulicos.

## 7. CONCLUSIONES

Durante los 4 meses de funcionamiento del humedal artificial en el predio “Mi Ranchito”, se ha observado la maduración y reproducción de vegetación (papiros), debido al favorable proceso de adaptación del sistema a las condiciones ambientales de la zona; ocasionando un porcentaje de remoción de materia orgánica aceptable, con bajo impacto de malos olores y disminución de contaminación de la acequia aledaña.

En la evaluación del HA se encontró que el estrato está reteniendo materia orgánica a la entrada, facilitando la descomposición y adsorción de nutrientes por parte de la vegetación (papiros), probablemente esto se da por la formación de la biopelícula entre las raíces de las plantas y el estrato, ocasionando una reducción del contaminante ( $DBO_5$ ) en el transcurso del HA.

La implementación de un modelo ModFlow en ModelMuse, fue una herramienta que permitió comprender el funcionamiento del humedal artificial. Sin embargo, los valores de concentración pueden variar, por los datos ingresados y asumidos en el modelo.

De acuerdo a los resultados de laboratorio de Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) reportados a la entrada y salida del humedal artificial, se obtiene que el porcentaje de remoción es de 77%, lo cual es un valor considerable para el poco tiempo que tiene el humedal artificial y a las altas cargas de concentración ( $DBO_5$ ), debido al mal funcionamiento del pozo séptico.

El tipo de humedal artificial más adecuado para el tratamiento de las aguas residuales es el subsuperficial de flujo horizontal, porque permite bajos caudales e intermitentes y su tiempo de retención es mayor al superficial. Además, por costos este tipo de humedal es más económico para construir.

Para el diseño del humedal artificial se utilizó la metodología de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), porque se adapta a las características topográficas del predio y hace una relación L:W (2:1) facilitando el proceso constructivo.

De acuerdo a los resultados de concentración de materia orgánica a la salida del pozo séptico, se tomó la concentración de 1049 mgO<sub>2</sub>/L para el diseño, asumiendo que la eficiencia de remoción de materia orgánica fuera del 50%, lo cual muestra que en los análisis de resultados el humedal artificial amplió el porcentaje de remoción a un 77%, siendo mayor a lo esperado inicialmente.

Para la construcción del humedal artificial se realizó un ensayo de granulometría en el material poroso con la finalidad de obtener diámetros 1/2", 3/8" y #4 como material de soporte, ya que, si se utiliza grava con diámetros muy grandes, se incrementa la velocidad de paso del agua, resultando un flujo turbulento que no cumpla la ley de Darcy en el diseño, afectando el funcionamiento del humedal artificial.

La construcción de un humedal artificial, es una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales in situ, en lugares donde se dispone de un área pequeña, sin acceso a un sistema de alcantarillado y con problemas de proliferación de malos olores.

## 8. RECOMENDACIONES

- ❖ Para verificar el porcentaje de remoción materia orgánica en el humedal artificial, se recomienda realizar más ensayos de laboratorio de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y mayor seguimiento del sistema.
  
- ❖ Se recomienda en el modelo ModFlow, realizar un estudio del coeficiente de distribución (Sorption\_Parameter1) y coeficiente de transferencia de primer orden (Sorption\_Parameter2,) para obtener una mayor precisión en los resultados de transporte de contaminantes; ya que estos dependen de la temperatura, que varía de acuerdo a las condiciones climatológicas de la zona de estudio.
  
- ❖ Realizar ensayos de laboratorio de parámetros fisicoquímicos, que permitan determinar el porcentaje de remoción de nutrientes como nitrógeno y fosforo, para presentar los posibles beneficios de remoción en el humedal artificial.
  
- ❖ Se recomienda para el humedal artificial de la finca “Mi Ranchito”, suspender el uso del pozo séptico y hacer directamente la disposición de las aguas residuales al humedal artificial, debido a un mal funcionamiento del pozo séptico, por altos valores de concentraciones de materia orgánica (DBO<sub>5</sub>) reportados a la entrada del humedal artificial.
  
- ❖ Colocar la trampa de grasa en el predio “Mi Ranchito”, para evitar que estos materiales (grasas y aceites) entren al sistema de tratamiento e interfiera en el proceso de degradación de la materia orgánica por parte de los microorganismos.
  
- ❖ Mantenimiento periódico de la vegetación (papiros), al menos una vez por semana, mediante cortes diagonales en los tallos marchitos, para permitir el crecimiento y reproducción de nuevos tallos.



## BIBLIOGRAFÍA

Alvarez, Alberto, and Pabón De, *ICPC - Medellín*

Arias Martínez, Sergio Adrián, Ferney Mauricio Betancur Toro, Gonzalo Gómez Rojas, Juan Pablo Salazar Giraldo, and Marta Lucía Hernández Ángel, 'Fitorremediación Con Humedales Artificiales Para El Tratamiento de Aguas Residuales Porcinas', *Informador Técnico (Colombia)*, 74 (2010), 12–22

Arroyave, Adalberto, 'Efectos Del Tipo De Vegetación Y De Las Variaciones De Profundidad En La Eficiencia De Remoción De Patógenos En Humedales Construidos De Flujo Subsuperficial', 2010

Bernardo, Josué, 'Modelación Hidráulica de Humedales Artificiales de Flujo Sub-Superficial Horizontal', *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, XXXVIII (2017), 3–16

Calvo, M S, *Aguas Residuales: Tratamiento Por Humedales Artificiales*, Colección Ingeniería Del Medio Ambiente Series (Mundi-Prensa, 1999) <<https://books.google.com.co/books?id=kkaNOWAACAAJ>>

Cortez, Nicolas, and Diana Cristancho, 'TRATAMIENTO DE BAJO IMPACTO EN LAS AGUAS RESIDUALES DEL HOSMIC' (Universidad Militar Nueva Granada, 2005)

Crites, Ronald W, Joe Middlebrooks, Sherwood C Reed, and Francis Group, *Natural Wastewater Treatment Systems*, 2006 <[https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(98\)80320-6](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(98)80320-6)>

Delgadillo, Oscar, Alan Camacho, and Mauricio Andrade Serie, *Depuración de Aguas Residuales Por Medio de Humedales Artificiales*, 2010 <[http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion\\_de\\_aguas\\_residuales\\_por\\_medio\\_de\\_humedales\\_artificiales.pdf](http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf)> <<http://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales>>

Díaz Acero, Carlos Ariel, 'Tratamiento de Agua Residual a Través de Humedales', *V Congreso Internacional de Ingeniería Civil*, 2014, 1–8

Dr. Roshan R. Shrestha, *Constructed Wetlands Manual*, 2008 <[www.unhabitat.org](http://www.unhabitat.org)>

EPA, 'GUIA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO CON FLUJOS SUBSUPERFICIALES', 1993, p. 27 <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/40001CXS.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EP A&Index=1991+Thru+1994&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>> [accessed 17 April 2018]

Fonfría, Ramón Sans, and Joan de Pablo Ribas, *Ingeniería Ambiental: Contaminación Y*

*Tratamientos*, Coleccion Productica (Marcombo, 1989)  
<<https://books.google.com.co/books?id=kumplOJs6T0C>>

Gh, Dwdoiq, and Qjhqihutd Hvwlyq Pelhqwdo, 'Depuración de Aguas Residuales Municipales Con Humedales Artificiales', 1999

González, Jesús Fernández, 'Humedales Artificiales Para Depuración.', *Manual de fitodepuración.Filtros de Macrofitas En Flotación.*, 2002, 79–80

Hernán, R, 'Demanda Química de Oxígeno Por Reflujo Cerrado Y Voluntaria', *Instituto de Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales*, 2007, p. 11  
<<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Química+de+Oxígeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>>

IDEAM, 'Informe IDEAM Sobre El Tratamiento de Aguas', 2015  
<<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021318/03TextoCompleto.pdf>>

Jaime, La Iglesia Gandarillas, 'Módulo Gestión de Aguas Residuales Y Reutilización Índice', 2016, p. 16

Javier, and Mena Sanz, 'Depuración de Aguas Residuales Con Humedales Artificiales: Ventajas de Los Sistemas Híbridos', *Congreso Nacional de Medio Ambiente*, 2010, 1–25  
<[http://www.alquimiaimasd.com/UserFiles/ficheros/IdiAplicada/2643\\_JMena.pdf](http://www.alquimiaimasd.com/UserFiles/ficheros/IdiAplicada/2643_JMena.pdf)>

Khanijo, Ishadeep, 'Nutrient Removal from Wastewater by Wetland System', *Wetlands*, 2002, 10 <<http://home.eng.iastate.edu/~tge/ce421-521/ishadeep.pdf>>

Lara, Carlos R, and Jaime Díaz, 'Postratamiento Del Efluente de Un Reactor Uasb Por Medio de Un Humedal Artificial'

López, Ing I, and Ing L Borzacconi, 'INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE REACTORES 2009 Facultad de Ingeniería', 2009, p. 16

Lopez, Jonathan, 'Tratamiento de Aguas Residuales. Aplicación de Humedales Artificiales.', 2015

LÓPEZ, MA ELENA PÉREZ, "'Selección de Plantas Acuáticas Para Establecer Humedales En El Estado de Durango"', *Tesis Para La Obtencion Del Grado de Doctor En Ciencia Y Tecnología Ambiental*, 2009, 109

Lu, Shibao, Liang Pei, and Xiao Bai, 'Study on Method of Domestic Wastewater Treatment through New-Type Multi-Layer Artificial Wetland', *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (2014), 11207–14 <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.165>>

Manuel, Guilherme, and Pereira Correia, 'Assessment of Clogging in Constructed Wetlands', 2016, 1–7

Méndez, L, V Miyashiro, R Rojas, M Cotrado, and N Carrasco, 'Tratamiento De Aguas

Residuales Mediante Lodos Activados a Escala De Laboratorio', *Revista Del Instituto de Investigación FIGMMG*, 7 (2004), 74–83  
<[http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/33982176/a10.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1481546914&Signature=uNQsTsPgd9TGRDyHHyH WusYermE%3D&response-content-disposition=inline%3B filename%3D74\\_TRATAMIENTO\\_DE\\_AGUAS\\_RESIDUALES\\_MEDIA.pdf](http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/33982176/a10.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1481546914&Signature=uNQsTsPgd9TGRDyHHyH WusYermE%3D&response-content-disposition=inline%3B filename%3D74_TRATAMIENTO_DE_AGUAS_RESIDUALES_MEDIA.pdf)>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 'Resolucion Vertimientos 631 2015', 2015, p. 62

Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, *Resolucion 0330 'Por La Cual Se Adopta El Reglamento Técnico Para El Sector de Agua Potable Y Saneamiento Básico - RAS Y Se Derogan Las Resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 Y 2320 de 2009'*, 2017, p. 182

Morales, J V, *Cucunubá: Modelo Para Un Desarrollo Sostenible* (Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2000) <[https://books.google.com.co/books?id=L0pB\\_Y6eKd4C](https://books.google.com.co/books?id=L0pB_Y6eKd4C)>

Olmos, R R, R S Marqués, and F V Moreto, *El Agua En El Medio Ambiente: Muestreo Y Análisis* (Universidad Autónoma de Baja California, 2003) <<https://books.google.com.co/books?id=b8l-xhcHPEYC>>

Orozco, A, *Bioingeniería de Aguas Residuales* (Acodal, 2005) <<https://books.google.com.co/books?id=t5w5EZf1VhMC>>

OTÁLORA R., Alejandra, 'Evaluación Del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Mediante Humedales Artificiales de Alta Tasa En La Locación Petrolera de Caño Gandúl', 2011, 163

Perbangkhem, Thaneeya, and Chongchin Polprasert, 'Biomass Production of Papyrus (Cyperus Papyrus) in Constructed Wetland Treating Low-Strength Domestic Wastewater', *Bioresource Technology*, 101 (2010), 833–35  
<<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.062>>

Pérez, Roy, Carolina Alfaro, Jihad Sasa, and Juan Aguero, 'Evaluación Del Funcionamiento De Un Sistema Alternativo De Humedales Artificiales Para El Tratamiento De Aguas Residuales', *Uniciencia*, 27 (2013), 332–40 <<https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.1998.340812.x>>

Restrepo, Ines, Dario Sanchez, Alberto Galvis, Jhonny Rojas, and Irma Sanabria, *Avances En Investigación Y Desarrollo de Agua Y Saneamiento Para El Cumplimiento de Las Metas Del Milenio*, Colección Ciencias Físicas, Exactas Y Naturales (Universidad del Valle, 2007) <[https://books.google.com.ec/books?id=vpFqgpfHBmYC&pg=PA202&dq=agua+residual+domestica&hl=es&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKewi97r2P5c7NAhWG7R4KHVxIDA4Q6AEIQjAD#v=onepage&q=agua residual domestica&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=vpFqgpfHBmYC&pg=PA202&dq=agua+residual+domestica&hl=es&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKewi97r2P5c7NAhWG7R4KHVxIDA4Q6AEIQjAD#v=onepage&q=agua%20residual%20domestica&f=false)>

Rodriguez, M G, *Depuraci{ó}n de Aguas Residuales: Modelizaci{ó}n de Procesos de Lodos Activos*, Biblioteca De Ciencias (Consejo Superior de Investigaciones Cient{\'i}ficas, 2006) <[https://books.google.com.co/books?id=qOu2R\\_xo2voC](https://books.google.com.co/books?id=qOu2R_xo2voC)>

SAAVEDRA FLECHAS LIZ, 'Modelaci{ó}n Hidr{á}ulica Y De Calidad Del Agua Acoplada Para Humedales , Mediante Processing Modflow', *Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingenier{í}a*, 2013

Tao, Facul, and D E Ingenier{í}a Ambiental, 'Daniel Arturo Pe{ñ}a Orocaja', 2012

Vargas, Carmen, "'Lagunas de estabilizaci{ó}n" Teoria, Dise{ñ}o, Construccin, Operacion, Evaluacion Y Mantenimiento', 1996, p. 14

Veritas, Bureau, *Manual Para La Formaci{ó}n En Medio Ambiente* (LEX NOVA, S.A.U., 2008) <<https://books.google.com.co/books?id=J7rMDpW49ZQC>>

Villase{ñ}or Camacho, Jos{é}, *Eliminaci{ó}n Biol{ó}gica de F{ó}sforo En Aguas Residuales Urbanas*[, Tesis Doctorales (Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, 2001) <<https://books.google.com.co/books?id=8Vlu05kqFEgC>>

Winston, Richard B., 'ModelMuse: A Graphical User Interface for MODFLOW-2005 and PHAST', *U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A29*, 2009, 52 p <<http://pubs.usgs.gov/tm/tm6A29/tm6A29.pdf>>

Yalcuk, Arda, and Aysenur Ugurlu, 'Comparison of Horizontal and Vertical Constructed Wetland Systems for Landfill Leachate Treatment', *Bioresource Technology*, 100 (2009), 2521–26 <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.029>>

## ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Resultados de prueba de laboratorio de DBO <sub>5</sub> a la salida del pozo séptico. ....	70
<b>Anexo 2.</b> Resultados de prueba de laboratorio de DBO <sub>5</sub> en la entrada del HA. ....	72
<b>Anexo 3.</b> Resultados de prueba de laboratorio de DBO <sub>5</sub> de la salida del HA. ....	74
<b>Anexo 4.</b> Planos del HA .....	76
<b>Anexo 5.</b> Memoria de cálculos .....	77

**Anexo 1.** Resultados de prueba de laboratorio de DBO<sub>5</sub> a la salida del pozo séptico.

INFORME DE RESULTADOS N°:		20022				
<b>CLIENTE:</b>	ANDREA LORENA GOMEZ RAMIREZ					
<b>NIT:</b>	1032388748-3	<b>COTIZACIÓN N°:</b>	Lista de precios			
<b>TELÉFONO:</b>	3125171009	<b>ODS:</b>	17-3828			
<b>CONTACTO:</b>	ANDREA LORENA GOMEZ RAMIREZ		<b>CANTIDAD:</b> 1500 ml			
<b>CARGO:</b>	N.E	<b>FECHA DE MUESTREO:</b>	N.E			
<b>DIRECCIÓN:</b>	Av caracas # 35-17 Sur	<b>FECHA DE RECIBIDO:</b>	27/10/2017			
<b>CIUDAD:</b>	Bogotá	<b>TIPO DE EMPAQUE:</b>	VIDRIO ESTÉRIL			
<b>ID. MUESTRA:</b>	17-9104	<b>TIPO DE MUESTREO:</b>	Puntual			
		<b>PUNTO DE CAPTACIÓN/ Orden de servicio cliente:</b>	Finca Mi Rancho -Vda Olarte-Vertimiento.			
		<b>LUGAR DE RECOGIDA:</b>	N.E			
		<b>ALMAC. CONTRAMUESTRA:</b>	Análisis FQ: 15 días			
			Análisis MB: 24 horas			
<i>Fisicoquímica</i>						
FECHA DE ANÁLISIS	PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	NO SE COMPARA CONTRA NINGÚNA NORMA
27/10/2017	DBO5 (A)	1049	mg O2/L	5-Day BOD Test.	SM 5210 B, ASTM D888-12 Método	No Especifica

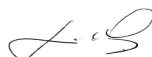
\* Análisis subcontratados

(A) Análisis acreditado por BIOPOLAB ante el IDEAM

Resolución 631 de 2015, "Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones."

- Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.
- Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía ya sea vía telefónico o al correo e inmediatamente será atendida.
- La muestra será almacenada 15 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los análisis y resultados

Documento aprobado por:



Liliana Olmos Ravagli  
Gerente Técnica  
Ing. Química Registro Prof. 14541 Consejo. P de I.Q. de Col.

Fecha de expedición: 7/11/2017

Biopolimeros Industriales Ltda.  
Carrera 18 No. 63a - 50 Piso 6. Bogotá-Colombia  
Telefonos: (+1) 5405700/5406606, Bogotá [www.biopolab.com](http://www.biopolab.com)

**Anexo 2.** Resultados de prueba de laboratorio de DBO<sub>5</sub> en la entrada del HA.



Código: F-ER-02

Versión: 2

Fecha: 26/01/2016

**RESULTADOS DE ANÁLISIS**



INFORME DE RESULTADOS N°:		23708						
<b>CLIENTE:</b>	ANDREA LORENA GOMEZ RAMIREZ							
<b>NIT:</b>	1032388748-3	<b>COTIZACIÓN N°:</b>	Lista de precios	<b>CANTIDAD:</b>	1000 ml	<b>RESPONSABLE MUESTREO:</b>	CLIENTE	
<b>TELÉFONO:</b>	3125171009	<b>ODS:</b>	18-1276	<b>FECHA DE MUESTREO:</b>	6/04/2018	<b>T (° C) MUESTREO:</b>	N.E.	
<b>CONTACTO:</b>	ANDREA LORENA GOMEZ RAMIREZ			<b>FECHA DE RECIBIDO:</b>	6/04/2018	<b>PRODUCTO:</b>	ARD	
<b>CARGO:</b>	N.E.			<b>TIPO DE EMPAQUE:</b>	PLASTICO			
<b>DIRECCIÓN:</b>	Av caracas # 35-17 Sur			<b>PUNTO DE CAPTACIÓN/ Orden de servicio cliente:</b>	Entrada humedal Artificial-Vereda Olarte-Usme Pueblo			
<b>ID. MUESTRA:</b>	18-3310			<b>ALMAC. CONTRAMUESTRA:</b>	Análisis FQ: 15 días	<b>Análisis MB:</b>	24 horas	
<i>Fisicoquímica</i>								
FECHA DE ANÁLISIS	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	NO SE COMPARA CONTRA NINGÚNA NORMA	CONFORMIDAD
6/04/2018	DBO5 (A)	1884	20,6	mg O2/L	5-Day BOD Test.	SM 5210 B, ASTM D888-12 Método	No Especifica	NO APLICA

(A) Parámetro acreditado para las matrices Aguas Residuales y Superficiales

-Estos resultados son válidos únicamente para esta muestra recibida y analizada en el Laboratorio de Fisicoquímica de Biopolab.

- Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.

- Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía ya sea vía telefónico, o al correo e inmediatamente sera atendida

- La muestra será almacenada 15 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los análisis y resultado

Documento aprobado por:

Liliana Olmos Ravagli  
Gerente Técnica

Ing. Química Registro Prof. 14541 Consejo. P de I.Q. de C

Fecha de expedición : 13/04

Carrera 18 No. 63a - 50 Piso 6. Bogotá-Colombia

Telefonos: (+1) 5405700/5406606, Bogotá

[www.biopolab.com](http://www.biopolab.com)

**Anexo 3.** Resultados de prueba de laboratorio de  
DBO<sub>5</sub> de la salida del HA.

RESULTADOS DE ANÁLISIS

INFORME DE RESULTADOS N°: 23709								
<b>CLIENTE:</b> ANDREA LORENA GOMEZ RAMIREZ								
<b>NIT:</b>	1032388748-3	<b>COTIZACIÓN N°:</b>	Lista de precios	<b>CANTIDAD:</b>	1000 ml	<b>RESPONSABLE MUESTREO:</b>	CLIENTE	
<b>TELÉFONO:</b>	3125171009	<b>ODS:</b>	18-1276	<b>FECHA DE MUESTREO:</b>	6/04/2018	<b>T (° C) MUESTREO:</b>	N.E.	
<b>CONTACTO:</b>	ANDREA LORENA GOMEZ RAMIREZ			<b>FECHA DE RECIBIDO:</b>	6/04/2018	<b>PRODUCTO:</b>	ARD	
<b>CARGO:</b>	N.E.			<b>TIPO DE EMPAQUE:</b>	PLASTICO			
<b>DIRECCIÓN:</b>	Av caracas # 35-17 Sur			<b>PUNTO DE CAPTACIÓN/ Orden de servicio cliente:</b>	Salida humedal Artificial-Vereda Olarte-Usme Pueblo			
<b>ID. MUESTRA:</b>	18-3311			<b>ALMAC. CONTRAMUESTRA:</b>	Análisis FQ: 15 días	Análisis MB: 24 horas		
<i>Fisicoquímica</i>								
FECHA DE ANÁLISIS	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	NO SE COMPARA CONTRA NINGÚNA NORMA	CONFORMIDAD
6/04/2018	DBO5 (A)	440	20,6	mg O2/L	5-Day BOD Test.	SM 5210 B, ASTM D888-12 Método	No Especifica	NO APLICA

(A) Parámetro acreditado para las matrices Aguas Residuales y Superficiales  
 -Estos resultados son válidos únicamente para esta muestra recibida y analizada en el Laboratorio de Fisicoquímica de Biopolab.  
 - Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.  
 - Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía ya sea vía telefónico, o al correo e inmediatamente sera atendida  
 - La muestra será almacenada 15 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los análisis y resultados.

Documento aprobado por:

Liliana Olmos Ravagli  
Gerente Técnica  
Ing. Química Registro Prof. 14541 Consejo. P de I.Q. de Col

Fecha de expedición: 13/04/2018

Carrera 18 No. 63a - 50 Piso 6. Bogotá-Colombia  
 Telefonos: (+1) 5405700/5406606, Bogotá  
[www.biopolab.com](http://www.biopolab.com)

## **Anexo 4. Plano del HA**

[Ir a Plano del HA](#)

## **Anexo 5. Memoria de cálculos**

[Ir a Memoria de cálculos](#)