

Tratamiento de aguas residuales domesticas con humedales subsuperficiales para los efluentes
de las instalaciones operativas del embalse de Bucaramanga

Andrea Mileidy Peña Arciniegas, Laura Camila Camacho Gamboa

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniera Civil

Director

Andrés Almeyda Ortiz

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A Dios por llenarme de sabiduría y perseverancia para culminar con éxito mi carrera profesional.

A mi madre, Ligia, por todas sus enseñanzas, su amor, su ejemplo y por ser la razón para seguir cada día adelante.

A mis queridos amigos Rachel y Juan Camilo por todo su apoyo en estos años y por convertirse en esa familia que Dios nos pone en el camino.

A Jhon, por compartir tantos momentos a mi lado, por toda su ayuda y sus consejos.

Andrea Mileidy Peña Arciniegas

Dedicatoria

A mis padres, Olinto y Elizabeth por su apoyo y fe en mí, por ser el pilar en mi vida.

A mi abuela a quien agradezco por lo que soy hoy, quien me ha llenado de amor durante toda mi vida.

A mi tía quien ha sido como una segunda madre y quien ha confiado en mí.

Laura Camila Camacho Gamboa

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Civil, Sede Socorro y su cuerpo de docentes por la formación integral y los conocimientos proporcionados durante nuestro proceso de formación.

Al profesor Andrés Almeyda por su apoyo incondicional en la realización de este proyecto.

A los compañeros de ingeniería civil, quienes se convirtieron en una familia durante este proceso de formación.

A Juan Camilo, quienes han estado desde el primer momento en el que iniciamos este gran reto, gracias por siempre confiar en nosotras, brindarnos su apoyo incondicional.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Teórico.....	15
2.1 Embalse de Bucaramanga	15
2.2 Planteamiento del Problema	15
2.3 Elección de Alternativa Sostenible	16
2.4 Sistema Anaerobio de Flujo Ascendente – FAFA	16
2.5 Humedales Subsuperficiales Horizontales.....	17
2.5.1 Substrato	17
2.5.2 Impermeabilización.....	18
2.6 Fitorremediación	18
2.6.1 Heliconia Psittacorum.....	19
2.7 Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO.....	21
2.8 Sólidos Suspendidos Totales – SST.....	22
2.9 Muestra Tipo Compuesta.....	22
2.10 Muestra Tipo Puntual.....	23
2.11 Norma de Vertimientos.....	23
3. Metodología	24
3.1 Analizar la Caracterización de las Aguas Residuales	25

3.1.1 Marco Referencial.....	25
3.1.2 Análisis de Resultados de Laboratorio	25
3.2 Diseño y Dimensionamiento del Humedal	27
3.2.1 Parámetros de Diseño	27
3.2.2 Características del Humedal	28
3.2.3 Diseño Hidráulico y Dimensionamiento del Humedal	28
3.3 Redacción del Manual de Arranque.....	28
4. Resultados.....	28
5. Conclusiones	60
7. Recomendaciones	60
Referencias Bibliográficas	62
Apéndices.....	68

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Ventajas y Desventajas del Humedal.....	16
Tabla 2. Heliconia Psittacorum especie vegetal utilizada en Fitorremediación.....	19
Tabla 3. Variables Monitoreadas en la Salida de los STAR.....	27
Tabla 4. Resultados de Laboratorio de la Entrada y Salida de los STAR.....	29
Tabla 5. Verificación del Cumplimiento de la Norma.....	30
Tabla 6. Relación del Cargas Contaminantes por cada Punto de STAR.....	31
Tabla 7. Proyección de la población en el embalse de Bucaramanga.....	32
Tabla 8. Dotación Neta Máxima.....	33
Tabla 9. Órdenes de magnitud de la conductividad hidráulica (ks),.....	35
Tabla 10. Carga de los Contaminantes.....	40
Tabla 11. Resultados de los tres Diseños de Humedales.....	49
Tabla 12. Comparación Eficiencia de Remoción.....	51
Tabla 13. Coeficiente de rugosidad.....	52
Tabla 14. Esquema de las zonas de los humedales.....	58

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Especies de Heliconia propias de Santander	21
Figura 2. Diagrama General de la Metodología del Proyecto.....	24
Figura 3. Ubicación Geográfica.	26
Figura 4. Visualización Dimensiones del Sistema.....	43
Figura 5. Plano del Humedal Oficinas Administrativas.....	68
Figura 6. Plano del Humedal Caseta de Captación.....	69
Figura 7. Plano del Humedal Caseta de la Presa.....	70

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Humedal Oficinas Administrativas	68
Apéndice B. Humedal Caseta de Captación.....	69
Apéndice C. Humedal Caseta de la Presa	70

Resumen

Título: Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas con Humedales Subsuperficiales para las Efluentes de las Instalaciones Operativas del Embalse de Bucaramanga*

Autor: Andrea Mileidy Peña Arciniegas, Laura Camila Camacho Gamboa **

Palabras Clave: Humedales artificiales, Aguas residuales domésticas, Calidad de agua, Diseño humedal.

Descripción:

Solo un 42,8% de las aguas residuales urbanas en Colombia son tratadas, según la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, de los 1.122 municipios solo 541 cuentan con algún sistema de saneamiento para aguas residuales.

Actualmente las aguas residuales provenientes de la oficina administrativa y las dos casetas de vigilancia del embalse de Bucaramanga son tratadas con un sistema de Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA), como tratamiento primario de depuración. En el presente trabajo, se diseñaron tres humedales de flujo horizontal subsuperficial como sistema secundario de tratamiento de aguas residuales para los efluentes del embalse de Bucaramanga.

Esto con el fin de realizar la descarga al río Tona con un menor porcentaje de agentes contaminantes. El diseño de los humedales inició con la caracterización de las aguas residuales mediante los ensayos realizados a las casetas de vigilancia y oficinas administrativas del embalse, de ellos se obtuvieron los diferentes valores para el análisis de las variables (DBO, SST y nutrientes), se realizó el dimensionamiento y diseño hidráulico de los 3 humedales, optando como medio de fitorremediación la planta *Heliconia Psittacorum* por su facilidad de adaptación a climas propios de la región, sus propiedades como asimilador de nutrientes, potencial de fitorremediación, y gran biodiversidad de esta planta en el país. Por medio de este diseño se pudo establecer la disminución de los agentes contaminantes (DBO, SST) analizados, posteriormente se realizó un manual de arranque desde la etapa de crecimiento de las plantas y funcionamiento de los humedales propuestos teniendo en cuenta experiencias previas y literatura.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Ingeniero Civil Andrés Almeyda Ortiz

Abstract

Title: Domestic Wastewater Treatment with Subsurface Wetlands for Effluents from the Bucaramanga Reservoir Operating Facilities *

Author: Andrea Mileidy Peña Arciniegas, Laura Camila Camacho Gamboa **

Key Words: Constructed wetlands, Domestic wastewater, Water quality, Wetland design

Description:

Currently, the wastewater from the administrative office and the two guardhouses of the Bucaramanga reservoir are treated with an Upward Flow Anaerobic Filter (FAFA) system, as primary purification treatment. In the present work, three horizontal subsurface flow wetlands were designed as a secondary wastewater treatment system to the effluents from the Bucaramanga reservoir.

This with the purpose to discharge to the Tona River with a lower percentage of pollutants. The design of the wetlands began with the characterization of the wastewater through the tests carried out at the guardhouses and administrative offices of the reservoir (SIAMA), from which the different values were obtained for the analysis of the variables (COD, SST and nutrients), the hydraulic dimensioning and design of the 3 wetlands was carried out, choosing *Heliconia Psittacorum* as a means of phytoremediation due to its ease of adaptation to the climates of the region, its properties as a nutrient assimilator, phytoremediation potential and great biodiversity of this plant in the country. Through this design it was possible to establish the reduction of the pollutants (COD, TSS and nutrients) analysed, then a start-up manual is made from the plant growth stage and operation of the proposed wetlands, taking into account previous experiences and literature.

* Bachelor Thesis

** Physicomencanic Faculty. School of Civil Engineering. Director Civil Engineer Andrés Almeyda Ortiz

Introducción

Una de las principales características de la sociedad moderna es la creciente emisión de sustancias contaminantes al ambiente, en donde se destacan aquellas que proceden de las actividades industriales, mineras, agropecuarias, artesanales y domésticas. En la mayoría de los casos el principal resultado de estas actividades es agua residual. (Delgadillo-López, González-Ramírez, Prieto-García, Villagómez-Ibarra, & Acevedo-Sandoval, 2011).

En algunos casos la disposición final de aguas residuales se realiza sin ningún tipo de tratamiento; en unos, debido al alto costo que implican las tecnologías convencionales y avanzadas, en otros, debido a la falta de conciencia en cuanto al peligro que esto representa para la naturaleza y, por tanto, para la humanidad (Sanz, Martín, & Camacho, 2009).

El 49% de la Región de América Latina y el Caribe tiene servicio de alcantarillado colectándose diariamente 40 millones de metros cúbicos de aguas residuales que se vierten a los ríos, lagos y mares(Pública, n.d.). Las subregiones latinoamericanas presentan diferencias muy marcadas tanto en el aspecto socioeconómico como en sus características físicas, ambientales y tecnológicas. Colombia, en general, cuenta con sistemas para tratar el 20 % de las aguas residuales producidas en el área urbana, pero sólo se da efectivamente en un 10 %.(Montoya, Ceballos, Casas, & Morató, 2010)

En el caso de un país como Colombia, el crecimiento de la población y de los diferentes sectores de producción, dejan en evidencia la gran demanda del recurso hídrico que afronta el país y por consiguiente la alta generación de vertimientos. La escasa cobertura para el tratamiento de aguas residuales que afronta actualmente, hace necesario estudiar diferentes alternativas de tratamiento, con el fin de controlar la contaminación de suelos, aguas subterráneas, cuerpos de agua, y evitar problemas de salubridad (Díaz, 2014).

En la actualidad el embalse de Bucaramanga cuenta con tres efluentes al río Tona producidos por la operatividad de este, de los cuales dos de ellos se localizan en las casetas de vigilancia y otro en las oficinas técnicas, cada uno de ellos compuesto de un sistema primario de tratamiento de aguas residuales el cual es un sistema anaerobio de flujo ascendente, lo que se busca es mejorar la calidad del efluente cumpliendo con los criterios de las normas ambientales.

Por lo tanto, se propone como alternativa sostenible, el diseño de un humedal subsuperficial de flujo horizontal como tratamiento secundario de aguas residuales domésticas que allí se producen, esto por medio de plantas (*Heliconia Psittacorum*) que según (CASE, 2013), se ha logrado demostrar que la especie presenta características adecuadas a las condiciones en los humedales para el tratamiento de aguas residuales, a partir de su capacidad de eliminación de DBO5, DQO y SST, por encima del 70 % de remoción sin detrimento de sus propiedades fisiológicas, esto con el fin de mejorar los valores de contaminantes presentes en la descarga final al río Tona y así poder dar cumplimiento a las exigencias de la normatividad ambiental vigente (resolución 0631 de 2015 norma de vertimientos).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de tratamiento secundario de aguas residuales mediante un humedal subsuperficial de flujo horizontal para los vertimientos de las instalaciones operativas del embalse de Bucaramanga

1.2 Objetivos Específicos

Analizar la caracterización fisicoquímica del agua residual a la entrada y salida del sistema primario de depuración de las casetas de vigilancia y oficina técnica del embalse de Bucaramanga con el fin de verificar el cumplimiento de la resolución 631 del 2015 del Ministerio de Ambiente

Diseñar un humedal de flujo horizontal subsuperficial para los efluentes de las instalaciones operativas del embalse de Bucaramanga, usando un proceso de fitorremediación con *heliconia Psittacorum*, para la remoción de carga de la Demanda Biológica de Oxígeno - DBO y Solidos Suspendidos Totales - SST

Elaborar el procedimiento de arranque y puesta en servicio de los humedales diseñados para el tratamiento de agua residual domestica de las instalaciones operativas del embalse de Bucaramanga.

2. Marco Teórico

2.1 Embalse de Bucaramanga

El embalse de Bucaramanga se encuentra localizado en el departamento de Santander en la parte baja de la subcuenca del río Tona. El embalse cuenta con un área de 54 ha, que almacena un volumen de 18 millones de m^3 de agua y garantiza la provisión de 2000 L/s , equivalente a una reserva de agua para tres meses de consumo en temporada de verano (Fernandez Alzate, 2013).

De igual manera la obra está conformada por una planta de tratamiento de 1.200 L/s de capacidad, una línea de aducción de 3,8 km y una línea de conducción en tubería de 1,2 m de diámetro y de 18 km de longitud hasta el Municipio de Girón.

Con el embalse se espera garantizar un abastecimiento de agua potable para el consumo del área de influencia del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga – AMB para los próximos 25 años (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga – AMB , 2015).

2.2 Planteamiento del problema

En la actualidad el embalse de Bucaramanga cuenta con tres efluentes al río Tona producidos por la operatividad de este, de los cuales dos de ellos se localizan en las casetas de vigilancia y otro en las oficinas administrativas, la localización de estos se encuentra en la Figura 2, cada uno de ellos compuesto de un sistema primario de tratamiento de aguas residuales que corresponde a un sistema anaerobio de flujo ascendente – FAFA.

Por lo tanto, para mejorar la calidad del agua que se vierte al río Tona se propone como alternativa sostenible, el diseño de un humedal subsuperficial de flujo horizontal el cual se ubicara aguas abajo del actual sistema de tratamiento para cada efluente (en total 3) con el fin de ser el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas que allí se producen

2.3 Elección de alternativa sostenible

Tabla 1

Ventajas y Desventajas del Humedal

Ventajas	Desventajas
Permite alcanzar una buena calidad del agua tratada conforme a la normatividad vigente. (Arteaga-Cortez et al., 2019)	Requieren grandes áreas de terreno para su construcción. (Rodríguez, 2003)
Costos de operación, construcción y mantenimiento bajos, comparando con los sistemas tradicionales de tratamiento de aguas residuales (Arteaga-Cortez et al., 2019)	Una de las desventajas de los humedales con flujo subsuperficial es el costo del medio de soporte que se utiliza, es decir el sustrato, así como su traslado y colocación.
Los humedales de flujo horizontal subsuperficial tienen un nivel máximo de agua el cual se regula de tal manera que la biopelícula se mantenga unos centímetros por debajo del nivel de las gravas impidiendo la proliferación zancudos y mosquitos, y también evitando la emisión de malos olores. (Chafloque & Gómez, 2006)	La remoción para fósforo, metales y algunos compuestos orgánicos suelen acumularse con el tiempo unidos a los sedimentos. (Cardona & Vanegas, 2009)

Nota: Esta tabla muestra las ventajas y desventajas de los Humedales

2.4 Sistema Anaerobio De Flujo Ascendente – FAFA

Un sistema anaerobio de flujo ascendente hace referencia a un biorreactor para la depuración de aguas residuales, en el FAFA la materia orgánica es degradada por las bacterias, que ayudan a la creación de una capa de lodos biológicos que depuran los residuos presentes en el agua a medida que circula en el sistema, el cual al finalizar el proceso produce biogás que puede ser almacenado para posterior uso, con lo cual se pretende disminuir el efecto contaminante por generación de CO₂, o CH₄ (Lopez, 2019)

2.5 Humedales Subsuperficiales Horizontales

Los humedales son canales poco profundos que se permanecen saturados por aguas superficiales o subsuperficiales, el agua permanece en el humedal con una frecuencia y duración que permitan mantener saturado el terreno. Los humedales subsuperficiales de flujo horizontal suelen tener aguas con profundidades inferiores a 60 cm, con plantas emergentes. La vegetación permite un ambiente apropiado para la formación de biopelículas (películas bacterianas), facilitando la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permitiendo así un proceso de depuración natural (Andrés, 1999)

En los humedales subsuperficiales, el agua residual atraviesa las gravas y siempre lo hace por debajo de la superficie del medio granular. Además de tener medio soporte, estos sistemas funcionan con vegetación emergente, cuyo papel es fundamental para su buen funcionamiento (Sanz et al., 2009). El diseño de estos sistemas por lo general consiste en un lecho, ya sea de tierra o y grava, y un cultivo de plantas. El agua circula horizontalmente, a través de las raíces de las plantas ingresando en forma permanente. Es vertida desde la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje. El agua residual se trata a medida que fluye a través de un medio poroso por la ayuda de las bacterias aeróbicas y anaeróbicas quienes se alimentan de la materia orgánica y de la asimilación de nutrientes, metales pesados y sustancias toxicas por las plantas que allí habitan (Delgadillo, 2010).

2.5.1 Substrato

El substrato es el entorno donde crecen las plantas, los microorganismos y se realizan los procesos de depuración más importantes. Para el diseño se recomienda utilizar grava con diámetros mínimos de 30 mm (3/4") que parece ser la que funciona mejor. Si se utiliza grava con diámetros

muy grandes de substrato, origina que se incremente la velocidad del paso del agua, resultando en un flujo turbulento y que no se cumpla la ley de Darcy para el diseño. Si se usa grava de tamaño demasiado pequeño, esta disminuye la velocidad del paso de agua originando zonas con presencia de agua en la superficie, lo cual ocasiona la proliferación de zancudos y emisión de malos olores, pero tienen la cualidad de tener una mayor área superficial para la depuración microbiana y la adsorción (Delgadillo, 2010).

2.5.2 Impermeabilización

La impermeabilización del canal asegura la contención del agua residual en el interior evitando las infiltraciones con el fin que no puedan contaminar las aguas subterráneas. La impermeabilización se realiza en los taludes en la entrada y salida de los laterales y del fondo del humedal. En ocasiones es suficiente una apropiada compactación del terreno dependiendo de las condiciones de este. En la mayoría de los casos es necesario realizar rellenos con arcilla compactada o utilizar membranas aislantes. Cuando se usan capas de arcilla para la impermeabilización, esta se compacta de tal forma que se logre una permeabilidad inferior a 10^{-6} cm/s. En un gran número de sistemas de humedales de flujo horizontal se ha usado como medio de impermeabilización láminas sintéticas de caucho etileno propileno– EPDM, de cloruro de polivinilo - PVC o de polietileno de alta densidad – HDPE, como medio de impermeabilización (García Serrano & Corzo Hernández, 2008).

2.6 Fitorremediación

Es el proceso de depuración de agua residual con vegetación, en el cual se ven involucrados el terreno y aire. Los Humedales artificiales de flujo subsuperficial, componen el principal medio

tecnológico, el cual se basa en plantas cuya particularidad principal son la acumulación de sustancias residuales, y la transformación de compuestos orgánicos gracias a sus propiedades biológicas (Carpena & Bernal, 2007).

Un ejemplo de este tipo de plantas son las *heliconia Psittacorum* algunas de sus aplicaciones en la eliminación de agentes se muestran en la tabla 2.

Tabla 2

Heliconia Psittacorum especie vegetal utilizada en Fitorremediación

Espece	Aplicación	Referencia
	Efectos en el crecimiento al riego con lixiviados de rellenos sanitarios	(Torres & Vásquez, 2010)
<i>Heliconia Psittacorum</i>	Eliminación de DBO, DQO, Nitrato, TKN, NH ₄ , oro, Fosfato y SST	(Madera-Parra, Peña-Salamanca, Peña, Rousseau, & Lens, 2015)
	Eliminación de DQO, P-PO ₄ , NH ₄ , NO ₃	(Konnerup, Koottatep, & Brix, 2009)
	Eliminación de Cr (VI) y nitrógeno	(Cortes-Sandoval, Madera-Parra, Peña-Varón, Peña, & Lens, 2013)
	Eliminación de DQO, DBO Y NH ₄	(Cortes-Sandoval et al., 2013)

Nota: Esta tabla presenta algunas de sus aplicaciones en la eliminación de agentes contaminantes por las *Heliconia Psittacorum* (García Serrano & Corzo Hernández, 2008).

2.6.1 *Heliconia Psittacorum*

Las *Heliconias* son plantas rizomatosas, perennes, con un tubo erecto, aéreo y en forma de tallo compuesto por inflorescencias superpuestas de las hojas llamadas pseudotallo. El rizoma se ramifica de forma figurada a partir de brotes en la base del pseudotallo. El crecimiento vegetativo es bastante fornido, a menudo dando lugar a grandes poblaciones. Por lo tanto, dentro del género, hay especies tan bajas como 0.5 m, así como algunas tan altas como 5 m.

Entre sus principales características están el hábito vegetativo, el tamaño, la forma y el color de sus hojas (Criley & Broschat, 1992).

La *Heliconia Psittacorum* es una especie que ciertas características físicas como la profundidad de sus raíces, espesor del tallo, propiedades de las hojas y el proceso de asimilación de los nutrientes lo cual, brinda un alto potencial fitorremediador (Carpena & Bernal, 2007). La *Heliconia* se adapta muy bien en la región andina, su crecimiento se da en las zonas tropicales y particularmente en Colombia hay 94 especies de Heliconias aproximadamente, siendo Colombia el país con más diversidad en este tipo de planta (Sanchez Gil & Velez, 2016).

En la figura 1, se pueden observar algunas especies de *Heliconia* propias de Santander, en la parte izquierda de la figura se encuentra una *Heliconia Psittacorum* procedente de los alrededores de Bucaramanga, en el centro de la figura se encuentra la *Heliconia bihai*, procedente del municipio de San Gil en Santander, en la parte derecha de la figura se encuentra la *Heliconia latispatha* procedente del municipio de cimitarra, las cuales se caracterizan por producir inflorescencias muy coloridas rojas o amarillas, además por extenderse de manera subterránea y contar con una estructura simple la cual no produce troncos leñosos ni ramificaciones (Margarita & Rodríguez, 2013)

Figura 1

Especies de Heliconia propias de Santander



Nota: La figura muestra algunas Especies de Heliconia propias de Santander. Recuperado de: W. W. Thomas, “Conservación e investigación monográfica sobre la flora de América Tropical,” 2019

2.7 Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO

La Demanda Bioquímica o Biológica de Oxígeno – DBO es la medida del oxígeno requerido para el proceso de oxidación de la materia orgánica biodegradable, presente en la cantidad de agua que se tomó como muestra, esto como resultado de la acción de oxidación aerobia (Ramalho, 1990).

Entre más materia orgánica este contenida en una muestra de agua, se necesitará más cantidad de oxígeno para que los microorganismos puedan oxidarla o degradarla. En condiciones normales de laboratorio, la DBO se determina a una temperatura de 20 °C en un tiempo de 5 días, siendo expresado en mg/L O₂ y es conocido como DBO₅ (Lecca & Lizama, 2014).

La DBO₅ es la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos durante los cinco días previos al proceso de biodegradación. La prueba DBO₅, consiste en poner una muestra de residuo en una botella cerrada y así poder medir la concentración de oxígeno disuelto - OD en la muestra

al principio de la prueba y al cabo de cinco días; la diferencia de OD dividida por el volumen de desperdicio - P es DBO (Lecca & Lizama, 2014).

2.8 Solidos Suspendidos Totales – SST

Se ha demostrado que la remoción de solidos suspendidos en humedales construidos presenta una eficiencia de remoción muy positiva y rápida, ya que ocurre principalmente en las zonas de entrada del humedal (del 12 al 20 % de la zona inicial), siendo suficiente un día para alcanzar remociones de alrededor de 90 - 95 %, es decir produciendo efluentes con concentraciones inferiores a 10 mg/L. La remoción de SST ocurre por medio de sedimentación y filtración, gracias a la alta presencia de vegetación, para aumentar los rendimientos en la remoción de SST es importante escoger bien el lecho, usar gravas que se encuentren libres de finos y mantener la granulometría entre 30 y 50 mm (Cardona & Vanegas, 2009).

2.9 Muestra tipo compuesta

La muestra tipo compuesta describe una composición de muestras tipo puntual tomadas en el mismo lugar durante diferente tiempo. Una gran parte este tipo de muestras compuestas se usan para observar concentraciones promedio, las cuales permiten calcular las cargas o la eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales. El uso de muestras compuestas representa un ahorro sustancial en costo y esfuerzo del laboratorio comparativamente con el análisis por separado de un gran número de muestras y su consecuente cálculo de promedio (Laboratorio de Química Ambiental Ideam, 1997).

2.10 Muestra tipo puntual

Una muestra tipo puntual simboliza la estructura original del cuerpo de agua para un lugar, tiempo y circunstancias determinado en que se realizó su captación. Cuando la composición de una fuente es relativamente constante a través de un tiempo prolongado o a lo largo de distancias sustanciales en todas las direcciones, puede decirse que la muestra representa un intervalo de tiempo o un volumen más extensos. En ciertas circunstancias, un cuerpo de agua puede estar representado por muestras simples, como en el caso de algunas aguas de suministro, aguas superficiales, pocas veces, efluentes residuales (Laboratorio de Química Ambiental Ideam, 1997).

2.11 Norma de Vertimientos

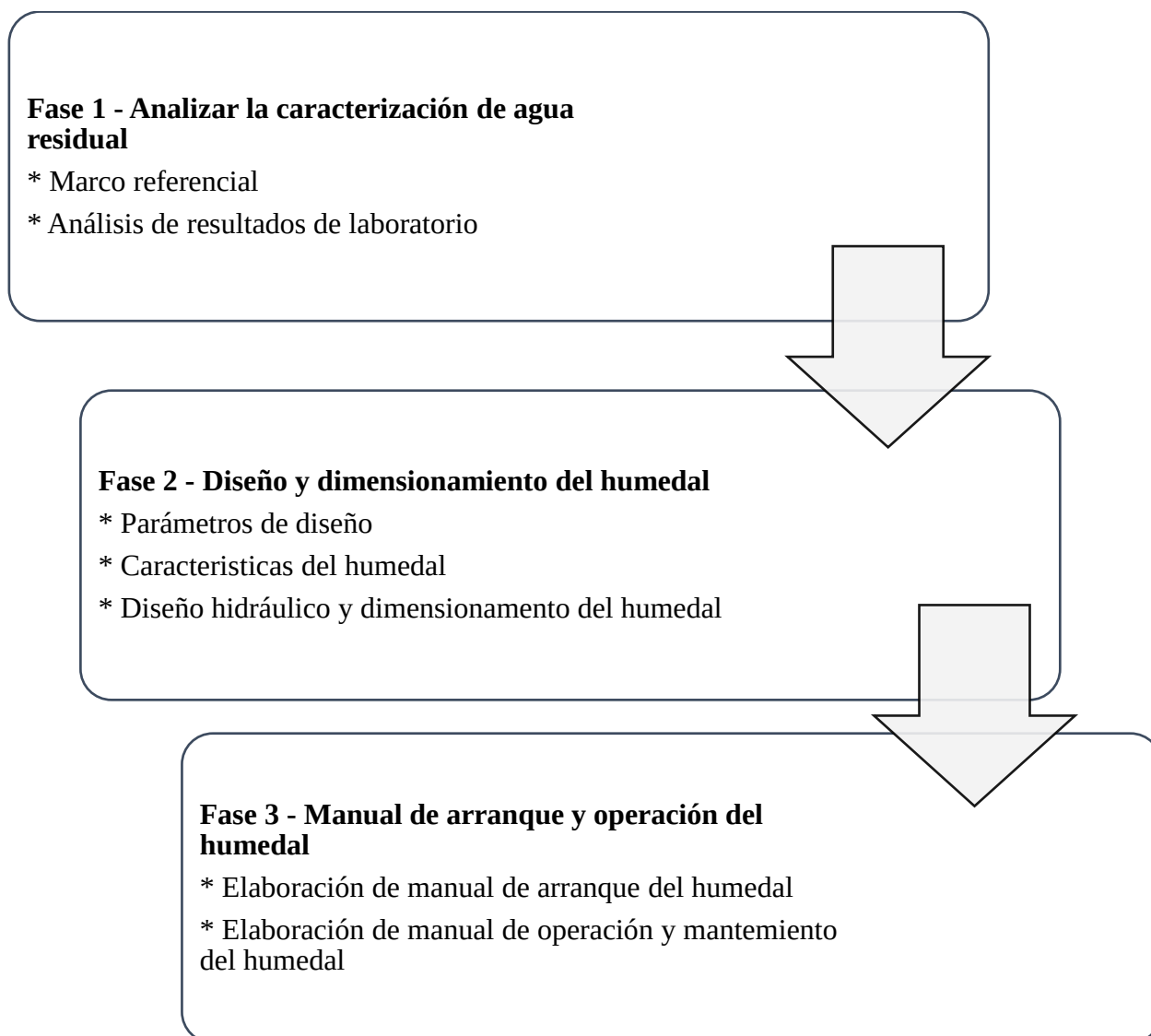
Con el fin de mejorar los valores de contaminantes presentes en la descarga final al río Tona, se realizó la comparación con la Resolución 0631 “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”, con el Decreto 1076 de 2015 “Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”, con la Ley 373 de 1997 “la cual establece el reúso obligatorio de las aguas de origen superficial, subterráneo o lluvias utilizadas en actividades que generen afluentes líquidos, previo a un análisis técnico, socio-económico y de las normas de calidad ambiental”

3. Metodología

El desarrollo metodológico de este trabajo de grado se desarrolló en 3 fases, las cuales se identifican en la figura 2.

Figura 2

Diagrama general de la metodología del proyecto



3.1 Analizar la caracterización de las aguas residuales

Se inicio con la recopilación de información con el fin de establecer los parámetros a analizar en la investigación, esto incluye los resultados ensayos de laboratorios previos.

3.1.1 Marco referencial: contextualización de temas relacionados con la investigación y recopilación de las consideraciones teóricas, incluyendo revisión de literatura en libros, paginas institucionales, revistas científicas relacionadas con experiencias anteriores del diseño y procedimiento para el dimensionamiento de humedales en función de reducción de agentes contaminantes.

3.1.2 Análisis de resultados de laboratorio: Durante el año 2018, el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P realizó por medio de la empresa SIAMA LTDA la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de las casetas de vigilancia y oficinas administrativas del Embalse de Bucaramanga. La medición se llevó a cabo durante los días 14 y 15 de febrero del año 2018.

En la figura 3 se identifican el embalse de Bucaramanga que se encuentra localizado en el departamento de Santander, 600 m aguas arriba de la confluencia de los ríos Tona y Suratá, en el sitio conocido como Puente Tona, vía Bucaramanga -Matanza, además se observan los puntos de ubicación de las casetas de vigilancia y las oficinas administrativas.

Figura 3*Ubicación geográfica. del proyecto*

Nota: La figura muestra la ubicación del área de estudio. Recuperado de: SIAMA LTDA. (15 febrero 2018). Caracterización de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de las casetas de vigilancia y oficinas administrativas del embalse de Bucaramanga. Acueducto metropolitano de Bucaramanga S.A E.S. p, 1, 50

Para el muestreo se siguió el manual de procesos establecido por la empresa aliada del acueducto, se realizó igualmente el aforo del caudal de vertimiento de agua residual.

Con el objetivo de evaluar la calidad del agua residual domestica generada en las oficinas del embalse de Bucaramanga, la empresa SIAMA LTDA realizó monitoreos compuestos durante 8 horas el día 14 de febrero del 2018 en los puntos entradas y salidas de los sistemas de tratamiento de las casetas de vigilancia captación y la presa, y el día 15 de febrero de 2018 en el sistema de tratamiento de las oficinas administrativas. También se realizaron 2 tomas de muestras puntuales sobre el Río Tona aguas arriba y aguas abajo de los vertimientos. Esto se llevó acabo con el objeto

de establecer los niveles de los contaminantes presentes en la descarga final, para poder dar cumplimiento a las exigencias de la normativa ambiental vigente.

En la tabla 3 se presentan las variables monitoreadas en la entrada y salida de los STAR, con sus respectivas unidades de medición.

Tabla 3

Variables monitoreadas en la salida de los STAR

Variable	Unidades	Variable	Unidades
Fósforo Total	mg*P/L	Tensoactivos	mg*SAAM/L
Ortofosfatos	mg*P-PO43-/L	DQO	mg*O2/L
Nitrógeno Total	mg*N/L	DBO5	mg*O2/L
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg*N/L	Grasas y Aceites	mg/L
Nitratos	mg*NO-3-N/L	SST	mg/L
Nitritos	mg*NO-2-N/L	Hidrocarburos Totales	mg/L
Nitrógeno Amoniacal	mg*N/L		

Nota: Esta tabla presenta las variables monitoreadas en la entrada y salida de los STAR

Para el agua residual de las casetas y la oficina se evidenció un muestreo volumétrico con una muestra tipo compuesta de agua residual doméstica, mientras que para la caracterización del agua de río Tona se realizó por medio de una muestra de tipo puntual, con matriz superficial y aforo tipo vadeo.

3.2 Diseño y dimensionamiento del humedal

En esta etapa se definieron los criterios relevantes en el diseño y dimensionamiento de los humedales.

3.2.1 Parámetros de diseño: se determinan los parámetros a tener en cuenta en el diseño según la información suministrada y los valores permisibles de la normatividad ambiental vigente (resolución 0631 de 2015 norma de vertimientos).

3.2.2 Características del humedal: se hizo una caracterización del tipo de suelo por medio de información disponible (revisión bibliográfica), que fueron necesarios para realizar el diseño, definiendo el tipo de planta a utilizar como medio de fitorremediación, optando por las *heliconias Psittacorum* especie nativa de Sur América, ya que según investigaciones cuentan con un gran potencial fisiológico para bioacumular y/o degradar contaminantes con efectos positivos en la biorremediación (CASE, 2013) , así como el uso de grava como medio filtrante (Delgadillo, 2010).

3.2.3 Diseño hidráulico y dimensionamiento del humedal: se dimensionó en función del caudal de diseño, la carga del contaminante, el gradiente hidráulico, el porcentaje de eliminación deseada para DBO y SST.

3.3 Redacción del manual de arranque

En esta etapa se recopiló la información resultante de las fases anteriores y se elaborará un manual que llevará los pasos que se deben utilizar para el dimensionamiento y el arranque del humedal, se incluirá el proceso de arranque que consta principalmente de la saturación de la zona de gravas, seguido de la siembra y adaptación de las *heliconias Psittacorum* en el sistema, como propuesta para el embalse de Bucaramanga.

4. Resultados

Del análisis de la caracterización fisicoquímica realizado por SIAMA LTDA en los puntos de entrada y salida de los sistemas de tratamiento de las casetas de vigilancia captación de la presa y las oficinas administrativas del embalse de Bucaramanga, se muestra en la tabla 4, los resultados de los parámetros establecidos por la resolución 0631 del 2015, Artículo 8 (límites máximos

permisibles para vertimientos puntuales de ARD a cuerpos de aguas superficiales con cargas menores a 625,00 kg/día de DBO₅).

Tabla 4

Resultados de laboratorio de la entrada y salida de los STAR

Variable	Unidades	STAR					
		Oficinas Administrativas		Caseta Captación		Caseta de la Presa	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Temperatura	°C	-	28,1	-	29,4	-	26,2
pH	Unidades pH	-	7,76	-	8,67	-	8,46
Solidos Sedimentables	ml/L	-	0,5	-	<0,1	-	<0,1
Q Prom	L/s	-	0,0292	-	0,0184	-	0,002
Fósforo Total	mg*P/L	-	4,03	-	0,16	-	15,9
Ortofosfatos	mg*P-PO43-/L	-	3,43	-	0,04	-	15,1
Nitrógeno Total	mg*N/L	-	37,9	-	<1,10	-	110
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg*N/L	-	37,9	-	<1,0	-	109
Nitratos	mg*NO-3-N/L	-	<0,1	-	0,11	-	0,23
Nitritos	mg*NO-2-N/L	-	0,013	-	<0,005	-	0,46
Nitrógeno Amoniacal	mg*N/L	-	36,7	-	<0,5	-	103
Tensoactivos	mg*SAAM/L	-	0,5	-	<0,27	-	4,25
DQO	mg*O2/L	140	46,2	458	<0,15	205	108
DBO5	mg*O2/L	64,9	15,4	196	2	77,5	32,3
Grasas y Aceites	mg/L	25,4	<6,3	22,4	<6,3	8,3	<6,3
SST	mg/L	52	<10	94	<10	75	<10
Hidrocarburos Totales	mg/L	-	0,402	-	<0,2	-	4,52

Nota: Esta tabla muestra los resultados de los parámetros establecidos por la resolución 0631 del 2015, Artículo 8

En la tabla 5 se comparan los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica de los parámetros establecidos por la resolución 0631 del 2015, Artículo 8.

Tabla 5

Verificación del cumplimiento de la Norma

STAR						
Variable	Unidades	Oficinas Administrativas	Caseta de Captación	Caseta de la Presa	Resolución 631 de 2015	Cumple / No Cumple
		Salida	Salida	Salida		
Temperatura Muestra	°C	28,1	29,4	26,2	< 40 °C	Cumple
pH	Unidades de pH	7,76	8,67	8,46	6 – 9	Cumple
Solidos Sedimentables	ml/L	0,5	<0,1	<0,1	< 5	Cumple
Fósforo Total	mg*P/L	4,03	0,16	15,9	Análisis y Reporte	Cumple
Ortofosfatos	mg*P-PO43-/L	3,43	0,04	15,1	Análisis y Reporte	Cumple
Nitrógeno Total	mg*N/L	37,9	<1,10	110	Análisis y Reporte	Cumple
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg*N/L	37,9	<1,0	109	Análisis y Reporte	Cumple
Nitratos	mg*NO-3-N/L	<0,1	0,11	0,23	Análisis y Reporte	Cumple
Nitritos	mg*NO-2-N/L	0,013	<0,005	0,46	Análisis y Reporte	Cumple
Nitrógeno Amoniacal	mg*N/L	36,7	<0,5	103	Análisis y Reporte	Cumple
Tensoactivos	mg*SAAM/L	0,5	<0,27	4,25	Análisis y Reporte	Cumple
DQO	mg*O2/L	46,2	<0,15	108	180	Cumple
DBO5	mg*O2/L	15,4	2	32,3	90	Cumple
Grasas y Aceites	mg/L	<6,3	<6,3	<6,3	20	Cumple
SST	mg/L	<10	<10	<10	100	Cumple
Hidrocarburos Totales	mg/L	0,402	<0,2	4,52	Análisis y Reporte	Cumple

Nota: Esta tabla muestra la comparación de los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica de los parámetros establecidos por la resolución 0631 del 2015, Artículo 8.

En la tabla 5 se evidencia que todos los parámetros cumplen con la resolución 0631 del 2015, Artículo 8, este proyecto busca mejorar la calidad del agua, aumentar eficiencia de tratamiento e

igualmente aumentar la capacidad de tratamiento de agua residual puesto que existen visitas extemporáneas al embalse.

El artículo 2.2.3.3.9.14 del decreto 1076 del 2015 indica los porcentajes de remoción de las variables SST, grasas y aceites y DBO₅. Por tal razón en la tabla 6 se reporta la relación de cargas contaminantes por punto y los porcentajes de remoción respectivos de los STAR de las oficinas administrativas, casetas de vigilancia de la presa y captación.

Tabla 6

Relación del cargas contaminantes por cada punto de STAR

Variable	Unidades	Oficinas Administrativas	STAR Casetta de Captación	Casetta de la Presa
		% Remoción 1	% Remoción 2	% Remoción 3
DBO₅	kg O ₂ /día	76,27	99,94	99,62
Grasas y Aceites	Kg/día	75,2	98,48	99,31
SST	Kg/día	80,77	99,42	99,88

Nota: Esta tabla muestra 6 se reporta la relación de cargas contaminantes por punto y los porcentajes de remoción respectivos de los STAR según El artículo 2.2.3.3.9.14 del decreto 1076 del 2015

Los datos reportados de DBO₅, Grasas y Aceites en las oficinas administrativas indican que están por debajo del porcentaje permitido por el artículo 2.2.3.3.9.14 del decreto 1076 del 2015 (>80%)

Una vez obtenida la comparación con la resolución 0631 del 2015 y el decreto 1076 del 2015 se inició con el dimensionamiento para el humedal de flujo horizontal subsuperficial, el cual se realiza en dos etapas: en la primera se determina la superficie necesaria de tratamiento (dimensionamiento biológico) y en la segunda se establecen las dimensiones geométricas del sistema (dimensionamiento hidráulico).

A continuación, se inicia el diseño y dimensionamiento paso a paso para las casetas administrativas y de vigilancia.

Población – P

Para este estudio se proyectaron poblaciones para las oficinas administrativas y las casetas tanto de la presa como de captación y se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7

Proyección de la población en el embalse de Bucaramanga

Zona	Total, Personas (Actual)
Oficinas Administrativas	12
Caseta de Captación	4
Caseta de la Presa	4
Total	20

Nota: Esta tabla muestra la proyectaron de la población para cada zona de estudio

Caudal de Diseño – Q

El caudal de diseño corresponde caudal máximo diario generado por la población de la zona, este caudal vario de acuerdo con el caudal neto, el coeficiente k_1 y el porcentaje de perdidas

En la Tabla 8 se muestra la Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida, para el caso de estudio se toma el valor de 140 l/Hab*día (Ministerio de Vivienda, 2017), dado que la altura sobre el nivel del mar en la que se encuentran las casetas de vigilancia y oficinas administrativas del Embalse de Bucaramanga es de 886 m.s.n.m. (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB), 2015)

Tabla 8*Dotación Neta Máxima*

Altura Promedio Sobre el Nivel del Mar de la Zona Atendida	Dotación Neta Máxima (L /Hab*Día)
>2000 m.s.n.m	120
1000 - 2000 m.s.n.m	130
<1000 m.s.n.m	140

Nota: Esta tabla muestra la Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida (Ministerio de Vivienda, 2017)

Donde:

Q_N : Caudal Neto, en $\frac{m^3}{día}$

Hab: Habitante, en número de habitantes

DN: Dotación Neta, según resolución 0330, en $\frac{L}{Hab*Día}$

$$Q = \frac{Hab * DN}{1000} \quad \text{Ecu. 1}$$

$$Q = \frac{12 * 140}{1000}$$

$$Q_N = 1,680 \left[\frac{m^3}{día} \right]$$

Para el cálculo del caudal máximo diario es necesario usar el coeficiente k_1 , el coeficiente de retorno C_r y el porcentaje de pérdidas del sistema los cuales se definen a continuación:

El coeficiente k_1 de consumo diario, se consigue de una relación entre el consumo diario mayor y el medio consumo diario, usando datos tomados en un período de un año. Como se refiere

a un sistema nuevo, el valor del coeficiente de consumo máximo diario, k_1 será 1,30 (EPA (U.S.), 1988)

Y para finalizar el porcentaje de pérdidas del sistema corresponde a las generadas por los componentes del sistema como las aducciones, conducciones y redes, al igual, se integran las necesidades de las plantas de tratamiento de agua potable y según la Resolución 0330 de 2017, estas no deben superar el 25%, este valor fue utilizado para realizar los cálculos pertinentes (Silva, Sofía, Zamora, & Darío, 2005)

Donde:

Q_{MD} : Caudal Máximo Diario, en $\frac{m^3}{día}$

Q_N : Caudal Neto, en $\frac{m^3}{día}$

k_1 : Factor k_1

% P : Porcentaje de Perdidas

$$Q_{MD} = \frac{Q_N}{1 - \%P} * k_1 \quad \text{Ecu. 2}$$

$$Q_{MD} = \frac{1,680}{1 - (0,25)} * (1,3)$$

$$Q_{MD} = 2,912 \left[\frac{m^3}{día} \right]$$

Conductividad Hidráulica – K_s Porosidad Grava – n

La conductividad hidráulica varía en función de la cantidad y del tamaño de los poros del medio granular utilizado. En la Tabla 9 se muestran órdenes de magnitud estimados de la K_s para algunos materiales granulares limpios que podrían utilizarse como sustrato en estos sistemas. La K_s con

el paso del tiempo se va reduciendo por retención de sólidos y crecimiento de la biopelícula, especialmente en la zona de entrada. Es por ello que se recomienda adoptar un factor de seguridad para K_s de 7 como mínimo (García Serrano & Corzo Hernández, 2008).

Tabla 9

Órdenes de magnitud de la conductividad hidráulica (k_s),

Tiempo de Substrato	Tamaño Efectivo	Porosidad	Conductividad Hidráulica
	$D_{10} [mm]$	$n [\%]$	$K_s \left[\frac{m^3}{m^2} * d \right]$
Arenas Granulares	2	28-32	100-1000
Arenas Gravasas	8	30-35	500-5000
Gravas Finas	16	35-38	1000-10000
Gravas Medianas	32	36-40	10000-50000
Rocas Pequeñas	128	38-45	50000-250000

Nota: Esta tabla muestra el Órdenes de magnitud de la conductividad hidráulica (k_s) en función del tipo de material granular utilizado como substrato en un humedal construido de flujo subsuperficial (Reed, Crites, & Middlebrooks, 1995).

Para el análisis se obtuvo un valor de $K_s = 10000 \frac{m^3}{m^2} * día$, ya que el diámetro de las gravas es de 36 y 40 mm. Para el valor de la porosidad se toma un $n = 36\%$ el cual correspondiente a gravas medias, de acuerdo a estudios previos se recomienda multiplicar el valor del K_s por 0,1 (10%) (Delgadillo, 2010) para evitar problemas de atascamiento por acumulación de raíces, lodos y otros contaminantes, además se adopta un factor de seguridad para K_s de 7 (García Serrano & Corzo Hernández, 2008).

De acuerdo con lo anterior $K_s = 142,85 \frac{m^3}{m^2} * d$, el cual se utilizará para el análisis.

Profundidad Humedal – h_T

Para calcular la profundidad que tendrá el humedal se debe tener en cuenta, el borde libre y el crecimiento que logran las raíces de la especie vegetal, en el caso de estudio se utilizó *Heliconia Psittacorum* especie baja de 0,5 m (Criley & Broschat, 1992).

$$h = 0,5 [m] \quad \text{Ecu. 3}$$

Area Superficial – A_S **Opción 1 – General rule of thumbs**

Para el diseño del humedal se toma como dato aproximado del Área Per Cápita del Humedal un valor de $\vartheta = 1,5 \frac{m^2}{Hab}$ (Carlos A Madera P, 2018), además para cada humedal se toma el número de habitantes según la tabla 8.

Donde:

A_S : Área Superficial del Humedal, en m^2

ϑ : Dato Aproximado del Área Percapita del Humedal, en $\frac{m^2}{Hab}$

Hab: Habitante, en número de habitantes

$$A_S = \vartheta * Hab \quad \text{Ecu. 4}$$

$$A_S = 1,5 * 12$$

$$A_S = 18 [m^2]$$

Opción 2 – EPA (U.S)

Para el diseño del humedal según el manual de humedales construidos de aguas residuales municipales EPA(U.S), se supone que la remoción de DBO debe ser del 80% es decir (1/0,2) (EPA (U.S.), 1988); se ha logrado demostrar que este valor es óptimo para este tipo de estudio, además se toma el valor de porosidad $n = 0,36$, escogiendo como material del lecho gravas medianas, con altura promedio del sistema $h = 0,5 \text{ m}$ y tomando la temperatura de los ensayos como $T = 28,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Lara Borrero, 1999)

Donde:

A_S : Área Superficial del Humedal, en m^2

C_e : Concentración en el Efluente, en mg/l

C_o : Concentración en el Afluente, en mg/l

K_T : Constante de Reaccion de Primer Orden Dependiente de la Temperatura, en d^{-1}

θ : Tiempo de Retención Hidráulico, en día

h : Profundidad media del Humedad, en m

n : Posrosidad, en %

Q_{MD} : Caudal que entra al Humedal $\frac{\text{m}^3}{\text{día}}$

$$K_T = 1,104 * (1,06)^{T-20} \quad \text{Ecu. 5}$$

$$K_T = 1,104 * (1,06)^{28,1-20}$$

$$K_T = 1,77[\text{d}^{-1}]$$

$$A_S = \frac{Q * \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_T * h * n} \quad \text{Ecu. 6}$$

$$A_s = \frac{2,912 * \ln\left(\frac{1}{0,2}\right)}{1,77 * 0,5 * 0,36}$$

$$A_s = 14,72[m^2]$$

De acuerdo al análisis de la información recopilada (EPA (U.S.), 1988) y a los resultados obtenidos por los ensayos de laboratorios previos se establece que el área optima es la que se calcula de acuerdo al método de la RAS 2000, pues este método cuenta con más parámetros, los cuales nos ayudan a dar un área más aproximada a la realidad y nos arroja el valor de

$$A_s = 14,72 [m^2].$$

Borde Libre – b_l

El borde libre se considera la distancia vertical desde la superficie del agua hasta la parte superior del canal. El borde libre debe ser lo suficientemente grande para prevenir que se desborde el agua, en el diseño es común el uso de bordes libres que varían desde menos del 5% a más del 30% de la profundidad del flujo (CHOW, 1994).

Donde:

b_l : Borde Libre, en m

h : Crecimiento especie Vegetal, en m

h_T : Profundidad del Humedal Total, en m

$$b_l = h * 25\%$$

Ecu. 7

$$b_l = 0,5 * 25\%$$

$$b_l = 0,125 [m]$$

$$h_T = h + b_l \quad \text{Ecu. 8}$$

$$h_T = 0,5 + 0,125$$

$$h_T = 0,625 [m]$$

Volumen – V

Este es dado por el largo el ancho y la altura del humedal

Donde:

V: Volumen del Humedal, en m^3

A_S : Área Superficial del Humedal, en m^2

h: Profundidad media del Humedad, en m

$$V = A_S * h \quad \text{Ecu. 9}$$

$$V = 14,72 * 0,5$$

$$V = 7,359 [m^3]$$

Tiempo de Retención Hidráulica – θ

El tiempo de retención hidráulico teórico es la relación entre el volumen del humedal disponible para el flujo, que incluye los efectos de reducción del volumen por vegetación (porosidad) y el caudal (Silva et al., 2005).

Donde:

Q_{MD} : Caudal medio, en $m^3/día$

V: Volumen del Humedal, en m^3

A_S : Área Superficial del Humedal, en m^2

n : Porosidad, en %

θ : Tiempo de Retención Hidráulico, en *día*

$$Q_{MD} = \frac{V}{\theta} \quad \text{Ecu. 10}$$

$$\theta = \frac{A_s * h * n}{Q_{MD}} \quad \text{Ecu. 11}$$

$$\theta = \frac{14,72 * 0,5 * 0,36}{2,320}$$

$$\theta = 0,909 = 1 \text{ día}$$

Carga del Contaminante – C

Es la cantidad de contaminante concentrado en el agua del sistema primario de tratamiento de aguas residuales del embalse – FAFA.

En la tabla 10 se encuentran los datos para las carga de DBO5 y SST teniendo en cuenta la Resolución 0631 de 2015 (Ambiente Y Desarrollo Sostenible, 2015), la cual relaciona los parámetros fisicoquímicos para conocer los valores máximos permisibles, para los vertimientos de aguas residuales domesticas a cuerpos de aguas superficiales, según esta resolución el valor permisible de DBO5 es de $90 \text{ mg} * \text{O}_2 / \text{l}$ y el valor permisible para SST es de $100 \text{ mg} / \text{l}$.

Tabla 10

Carga de los Contaminantes

Zona	DBO5 $\left[\frac{\text{mg} * \text{O}_2}{\text{l}}\right]$	DBO5 Teórico $\left[\frac{\text{mg} * \text{O}_2}{\text{l}}\right]$	SST $\left[\frac{\text{mg}}{\text{l}}\right]$	SST Teórico $\left[\frac{\text{mg}}{\text{l}}\right]$
Oficinas Administrativas	15,4	90	10,5	100
Caseta de Captación	2	90	10,5	100
Caseta de la Presa	32,3	90	10,5	100

Nota: Esta tabla muestra los valores de cargas de contaminante para cada punto de estudio, teniendo en cuenta la Resolución 0631 de 2015 y los datos tomados por la empresa SIAMA LTDA.

Carga Orgánica Superficial – COS

Se conoce como el producto de la concentración de un determinado contaminante por el caudal, en un lugar determinado.

Donde:

COS: Carga Orgánica Superficial, en $g/m^2 * día$

Q_{MD} : Caudal medio, en $m^3 / día$

C: Carga del Contaminante, en mg/l

A_S : Área Superficial del Humedal, en m^2

$$COS = \frac{C * Q_{MD}}{A_S} \quad \text{Ecu. 12}$$

$$COS = \frac{90 * 2,912}{14,72}$$

$$COS = 17,81 \left[\frac{g}{m^2 * día} \right]$$

Pendiente – S

Los valores de la pendiente (S) que se suelen utilizar varían en el rango de 0,01 a 0,02 m/m Es conveniente que la pendiente no sea superior a 0,02 m/m para evitar que los costes de excavación sean elevados(Cooper, Job, Green, & Shutes, 1996).

Donde:

S: Pendiente, en m/m

$$S = 0,01 \quad \text{Ecu. 13}$$

Área Transversal – A_T

El dimensionamiento hidráulico se usa para determinar las dimensiones del sistema como lo son ancho y longitud una vez conocida su superficie. Para un sistema en un medio poroso el dimensionamiento hidráulico se realiza aplicando la Ley de Darcy, la cual describe el régimen del flujo, mediante la siguiente ecuación (García Serrano & Corzo Hernández, 2008).

Donde:

Q_{MD} : Caudal medio, en $m^3/día$

K_S : Conductividad Hidráulica, en $\frac{m^3}{m^2} * día$

S : Pendiente, en m/m

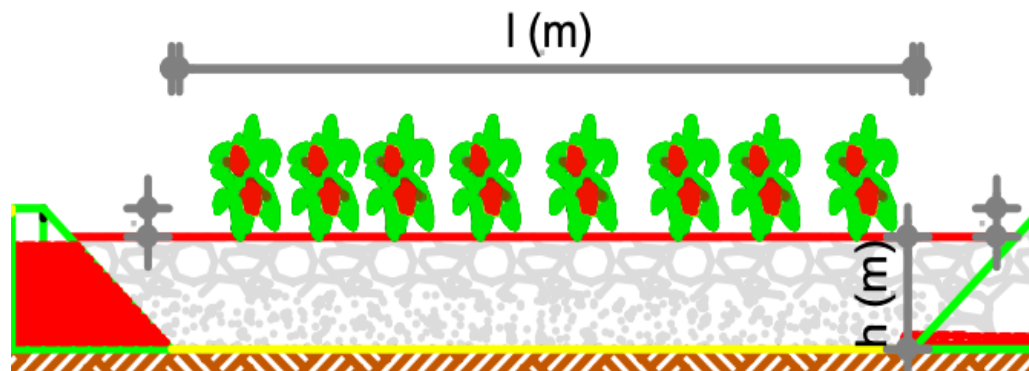
A_T : Área Transversal del Humedal, en m^2

$$Q_{MD} = K_S * A_T * S \quad \text{Ecu. 14}$$

$$A_T = \frac{Q_{MD}}{K_S * S} \quad \text{Ecu. 15}$$

$$A_T = \frac{2,912}{142,85 * 0,01}$$

$$A_T = 2,04 [m^2]$$

Figura 4*Visualización Dimensiones del Sistema***Ancho Humedal – w**

Calculada el área de la sección transversal, y una vez fijada la profundidad (h), se determina el ancho del humedal (Delgadillo, 2010).

Donde:

A_T : Área Transversal del Humedal, en m^2

h: Profundidad media del Humedad, en m

w: Ancho del Humedal, en m

$$A_T = w * h \quad \text{Ecu. 16}$$

$$w = \frac{A_T}{h} \quad \text{Ecu. 17}$$

$$w = \frac{2,04}{0,5}$$

$$w = 407 [cm]$$

Largo Humedal – l

Conocido el ancho y teniendo en cuenta la superficie determinada con el dimensionamiento biológico se determina la longitud del sistema (Delgadillo, 2010).

Donde:

A_T : Área Transversal del Humedal, en m^2

l : Longitud del Humedal, en m

w : Ancho del Humedal, en m

$$A_S = l * w \quad \text{Ecu. 18}$$

$$l = \frac{A_S}{w} \quad \text{Ecu. 19}$$

$$l = \frac{14,72}{4,07}$$

$$l = 361 [cm]$$

Posteriormente se calcula la relación largo-ancho (l/w). Mientras mayor es la relación largo-ancho se tiene mejor depuración de las aguas, pero se tiene problemas de cortocircuitos, flujos preferenciales, presencia de agua sobre el lecho de grava y otros (Delgadillo, 2010).

Por ello se recomienda relación largo – ancho de: 2 a 1, 3 a 1 y 4 a 1

Número de Plantas

Se recomienda una densidad aproximada de siembra de 6 plantas por $1 m^2$, sin embargo las distancias de siembra más usadas son: en hileras sencillas: 1,5 m entre plantas y 2 m entre hilera, dado que la forma de crecimiento de la *heliconia* es bastante extendida (Sosa Rodríguez, 2013).

Donde:

$\#Plantas$: Número de Plantas Totales, en $Plantas * m^2$

A_S : Área Superficial del Humedal, en m^2

δ : Numero de Plantas por metro cuadrado, en $Plantas * m^2$

$$\#Plantas = A_S * \delta$$

Ecu. 20

$$\#Plantas = 14,72 * 6$$

$$\#Plantas = 88,30 = 88 [plantas * m^2]$$

Eficiencia de Remoción DBO5 – $C_{f.DBO5}$

Los procesos de remoción de materia orgánica en humedales de flujo subsuperficial son muy efectivos, siempre y cuando se mantengan condiciones óptimas como tiempo de retención hidráulica, carga orgánica de entrada, carga hidráulica y profundidad del humedal. La siguiente ecuación es usada para modelar el comportamiento en la remoción de materia orgánica.

El valor de Coeficiente de Remoción lógicamente variará según el contaminante. Para eliminar la DBO5 es adecuado un valor de $K_a = 0,08 \text{ m/día}$.(García et al., 2004)

Donde:

$C_{f.DBO5}$: Carga del Contaminante a la Salida del Humedal, en mg/l

C : Carga del Contaminante, en mg/l

K_a : Coeficiente de Remoción para DBO5, en $m/día$

A_S : Área Superficial del Humedal, en m^2

Q_{MD} : Caudal medio, en $m^3/día$

$$C_{f.DBO5} = C * e^{-K_a * \frac{A_S}{Q_{MD}}} \quad \text{Ecu. 21}$$

$$C_{f.DBO5} = 90 * e^{-(0,08) * \frac{14,72}{2,912}}$$

$$C_{f.DBO5} = 60,067 \left[\frac{mg}{l} \right]$$

Dado que tenemos un valor de $C_o = 90 \text{ mg/l}$ y un valor de $C_f = 60,067 \text{ mg/l}$ se puede determinar el % de remoción con relación a la Carga del Contaminante DBO5 a la Salida del Humedal.

$$\%C_{f.DBO5} = \frac{C_o - C_f}{C_o} * 100 \quad \text{Ecu. 22}$$

$$\%C_{f.DBO5} = \frac{90 - 60,067}{90} * 100$$

$$\%C_{f.DBO5} = 33 \text{ [\%]}$$

Carga Hidráulica– CH

La carga hidráulica es la relación entre el cauda y el área superficial, además esta nos ayuda a calcular la eficiencia de remoción del contaminante (Arenas Ramirez & Nuncira Parra, 2010).

Donde:

CH : Carga Hidráulica, en $m/día$

A_S : Área Superficial del Humedal, en m^2

Q_{MD} : Caudal medio, en $m^3/día$

$$CH = \frac{Q_{MD}}{A_S} \quad \text{Ecu. 23}$$

$$CH = \frac{2,912}{14,72}$$

$$CH = 0,197 \left[\frac{m}{día} \right]$$

Eficiencia de Remoción SST– $C_{f.SST}$

Las eficiencias de remoción de solidos suspendidos totales son similares a las obtenidas para DBO₅. Eficiencias de remoción del 80 - 90%.

Para la evaluación de la eliminación de materia en suspensión en los Humedales Artificiales de Flujo Superficial, se usa la siguiente expresión (Espinosa Ortiz, 2014).

Donde:

$C_{f.SST}$: Carga del Contaminante a la Salida del Humedal, en mg/l

CH : Carga Hidráulica, en $m/día$

C : Carga del Contaminante, en mg/l

$$C_{f.SST} = C * (0,1058 + 0,0014 * CH) \quad \text{Ecu. 24}$$

$$C_{f.SST} = 100 * (0,1058 + 0,0014 * 0,197)$$

$$C_{f.SST} = 10,607 \left[\frac{mg}{l} \right]$$

De igual manera dado que se tiene un valor de $C_o = 100 \text{ mg/l}$ y un valor de $C_f = 10,607 \text{ mg/l}$ se puede determinar el % de remoción con relación a la Carga del Contaminante de SST a la Salida del Humedal

$$\begin{aligned} \%C_{f.SST} &= \frac{C_o - C_f}{C_o} * 100 \\ \%C_{f.SST} &= \frac{100 - 10,607}{100} * 100 \\ \%C_{f.SST} &= 89 [\%] \end{aligned} \quad \text{Ecu. 25}$$

En la tabla 11 se muestran los resultados del diseño y dimensionamiento de las oficinas administrativas y de las casetas tanto administrativa como de vigilancia.

además, se encuentran parámetros como:

Q_N : Caudal Neto, en $\frac{m^3}{\text{día}}$

Q_{MD} : Caudal Maximo Diario, en $\frac{m^3}{\text{día}}$

A_S : Área Superficial del Humedal, en m^2

V : Volumen del Humedal, en m^3

θ : Tiempo de Retención Hidráulico, en día

C_{DBO5} : Carga del Contaminante DBO5, en mg/l

COS_{DBO5} : Carga Orgánica Superficial con, en $g/m^2 * \text{día}$

$C_{f.DBO5}$: Carga del Contaminante DBO5 a la Salida del Humedal, en mg/l

C_{SST} : Carga del Contaminante SST, en mg/l

COS_{SST} : Carga Orgánica Superficial con, en $g/m^2 * \text{día}$

A_T : Área Transversal del Humedal, en m^2

w : Ancho del Humedal, en m

l : Longitud del Humedal, en m

l/w : Relación Largo-Ancho, en m/m

$\#Plantas$: Número de Plantas Totales, en $Plantas * m^2$

CH : Carga Hidráulica, en $m/día$

$C_{f.SST}$: Carga del Contaminante SST a la Salida del Humedal, en mg/l

Tabla 11

Resultados de los tres Diseños de Humedales

Zona	T [°C]	Q_N [m ³ /d]	QMD [m ³ /d]	As [m ²]	V [m ³]	θ [día]	C_{DBO5} [mg*O ₂ /l]	COS_{DBO5} [g/ m ² *día]	$C_{f.DBO5}$ [mg/ día]
Oficinas Administrativas	28,1	1,6800	2,9120	14,718	7,359	0,910	90	17,8067672	60,0675049
Caseta de Captación	29,4	0,5600	0,9707	4,546	2,273	0,843	90	19,2168940	61,8764306
Caseta de la Presa	26,2	0,5600	0,9707	5,477	2,7385	1,016	90	15,9503378	57,3061857

Zona	C_{SST} [mg/d]	COS_{SST} [g/m ² *día]	A_T [m ²]	w [m]	l [m]	Relación [m/m]	# Plantas	CH [m/día]	$C_{f.SST}$ [mg/l]
Oficinas Administrativas	100	19,7852969	2,03840	4,0768	3,6101	1,12924	88	0,19785	10,6076994
Caseta de Captación	100	21,3521044	0,67946	1,3589	3,3452	0,4062	27	0,21352	10,6098929
Caseta de la Presa	100	17,7225975	0,67946	1,3589	4,0303	0,3371	33	0,17722	10,6048116

Análisis de resultados

En primera instancia se hace este análisis según la resolución 0631 del 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.

En la tabla 10 se observa que se cumple con todos los parámetros establecidos en la resolución 0631 del 2015 y se evidencia que los parámetros de los 3 humedales están por debajo de los parámetros permisibles.

Al analizar la calidad del agua del efluente según la Ley 373 de 1997, la cual establece el reúso obligatorio de las aguas de origen superficial, subterráneo o lluvias utilizadas en actividades que generen afluentes líquidos, previo a un análisis técnico, socio-económico y de las normas de calidad ambiental, se observa que las variables suministradas por la empresa SIAMA LTDA, no son suficientes pues según la resolución 1207 del 2014, por lo tanto se requieren más variables de tipo físicas, microbiológicas, químicas y metales para lograr establecer las condiciones óptimas de reúso del agua.

Con la finalidad de comparar los resultados del diseño con estudios de otros autores se tomó como referencia el proyecto de Humedales Artificiales, elaborado por Ángela Sofía Silva R y Hernán Darío Zamora Z (Silva et al., 2005), el cual tiene como objetivo recopilar información trascendental sobre los humedales artificiales de los dos tipos: sistemas de flujo libre (FWS) y sistemas de flujo subsuperficial (SFS), los cuales se encuentran ubicados en la ciudad de Manizales, Caldas, Colombia. De acuerdo con este proyecto se tomó de referencia la metodología de diseño y dimensionamiento usada por Jaime Borrero. (Lara Borrero, 1999).

Donde se tienen parámetros a resaltar como: Carga inicial de contaminante como $C_o = 300 \text{ mg/L}$, caudal de diseño como $Q_N = 8,64 \text{ m}^3/\text{día}$, Temperatura de estudio de $T = 18 \text{ }^\circ\text{C}$, Constante de Reacción de Primer Orden Dependiente de la Temperatura como $K_T = 0,9825 \text{ d}^{-1}$, altura del humedal como $h = 0,6 \text{ m}$, pendiente de $S = 0,05 \text{ m/m}$, con un valor de porosidad de $n = 38\%$ (Grava media 0,36 - 0,40), con estos parámetros se obtiene el Área superficial

$A_S = 19,70[m^2]$ y un % de remoción de DBO5 del sistema $\%C_{f,DBO5} = 40 [\%]$, debido a que la remoción de SST es rápida en comparación con la de DBO, no se lo considera como un parámetro de diseño.

De acuerdo al estudio realizado se diseñaron tres humedales como tratamiento secundario de depuración de aguas residuales, los cuales tienen un sistema subsuperficial de flujo horizontal para los vertimientos de las instalaciones operativas del embalse de Bucaramanga, los parámetros calculados se encuentran en la tabla 11 y se resaltan parámetros como el Área superficial $A_S = 11,726 [m^2]$ y un % de remoción de DBO5 del sistema $\%C_{f,DBO5} = 33 [\%]$, además de un % de remoción de SST del sistema $\%C_{f,SST} = 89 [\%]$.

En la tabla 12 se comparó la eficiencia de Remoción de los humedales diseñados con el humedal del proyecto de Humedales Artificiales, elaborado por Ángela Sofía Silva R y Hernán Darío Zamora Z (Silva et al., 2005), el cual cuenta con características similares y se utilizó la misma metodología, pues en ella se analizan todas las variables importantes para el diseño, esta

Tabla 12
Comparación Eficiencia de Remoción

Zona	$\%C_{f,DBO5}$ Diseñado [%]	$C_{f,DBO5}$ [%]	$C_{f,SST}$ Diseñado [%]	$C_{f,SST}$ [%]
Oficinas	33	40	89	N/A
Administrativa				
Caseta de Captación	31	40	89	N/A
Caseta de la Presa	36	40	89	N/A

Materiales a utilizar

- Agua residual obtenida de las oficinas administrativas, y las dos casetas (captación y de la presa)
- Tubos de PVC: Para la distribución del fluido. Diámetro de 1"

- Membrana HDPE para impermeabilización del terreno
- Grava media como lecho filtrante, para la zona de entrada diámetro de 40 mm y para la zona de tratamiento y zona de salida diámetro de 36 mm.
- Macrófitas (*heliconias Psittacorum*)

Diámetro de tuberías

Para calcular el diámetro de la tubería se usó la ecuación de Manning

Se elige un diámetro comercial que sería un tubo PVC de 1" para evitar taponamientos.

Nota: este diámetro se usa para los tubos en los 3 humedales.

Caudal de diseño

$$Q_{MD} = 2,320 \left[\frac{m^3}{día} \right] \quad \text{Ecu. 26}$$

$$Q_{MD} = 2,320 \left[\frac{m^3}{día} \right] * \frac{1 \text{ día}}{86400}$$

$$Q_{MD} = 2,68 * 10^{-5} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Tabla 13

Coefficiente de rugosidad

Material	Coefficiente de rugosidad Manning (n)
Asbesto cemento	0.011
Hierro fundido	0.012
Concreto simple	0.013
Plomo	0.011
PVC	0.009

Nota: Esta tabla muestra el coeficiente que se usó en la ecuación de Manning

Donde:

Q_{MD} : Caudal, en m³ /s

A: Área de la sección de flujo, en m²

R: radio hidráulico, en $A/P = D/4$

P: Perímetro mojado, en m

D: Diámetro interno real de la tubería, en m

S: Pendiente de la línea de energía, en $\frac{m}{m}$

n: Coeficiente de rugosidad de Manning, Adimensional (para el caso se usa PVC)

$$Q_{MD} = \frac{A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{0.5}}{n} \quad \text{Ecu. 27}$$

$$Q_{MD} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot S^{0.5}}{n} \quad \text{Ecu. 28}$$

$$2,320 * 10^{-5} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot (0,01)^{0.5}}{0,009}$$

$$D = 0.012[m]$$

Entrada del Humedal

Para el caso de estudio en la estructura de entrada se tomó una cámara de entrada con una pantalla perforada, esto con el fin de que el flujo tenga un ingreso uniforme al humedal.

Diseño de la pantalla perforada

Para el diseño de la pantalla se considera una velocidad por orificio (V_o) < 0.15 m/s

Donde

$A_{op} = \text{area total de orificio}$

$$A_{op} = \frac{Q_{\text{diseño}}}{V_o} \quad \text{Ecu. 29}$$

$$V_o = 0.10 \text{ (m/s)}$$

$$A_{op} = \frac{2.68 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{0.10 \text{ m}^1/\text{s}}$$

Área para cada orificio

$$A_o = \pi \left(\frac{D_o}{2} \right)^2 \quad \text{Ecu. 30}$$

Tomando

$D_o = \text{diámetro de cada orificio}$

$$D_o = 0.03 \text{ (m)}$$

$$A_o = \pi \left(\frac{0.03}{2} \right)^2$$

$$A_o = 0.00071 \text{ m}^2$$

Número de orificios

$$n_o = \frac{A_{op}}{A_o} + 1 \quad \text{Ecu. 31}$$

Donde $n_o = \text{número de orificios}$

$$n_o = \frac{A_{op}}{A_o}$$

$$n_o = \frac{2.68 * 10^{-2}}{0.00071}$$

$$n_o = 37,74 + 1$$

$$n_o \approx 39$$

Altura de la pantalla 30 cm

Distancia entre filas (considerando 4 filas)

$$Df = \frac{0.3 \text{ m}}{4}$$

Ecu. 32

$$Df = 0.075 \text{ m}$$

Salida del Humedal

Como estructura de salida de vertimiento del humedal, se opta por una tubería que está ubicada en el fondo del humedal, la cual a su vez conecta con otra que realiza la descarga.

Se opta por tubería en PVC de diámetro 1”.

Manual de arranque

Ubicación y preparación del terreno

El proceso de construcción del humedal se inicia con el descapote, limpieza, retiro de toda la vegetación, que se encuentre en el lugar, ubicando el material retirado en un vertedero autorizado.

Luego de la previa preparación se procede a excavar con el fin de obtener los taludes del humedal y para formar el canal, para el caso la inclinación de los taludes será de 45° (1H:1V), lo cual es prudente, ya que así se evita el rodamiento de material hacia la base del humedal.(García Serrano & Corzo Hernández, 2008)

Impermeabilización

La impermeabilización es el período más relevante en la construcción de los humedales, para ello es necesario recubrir el terreno con un material impermeabilizante, evitando así el paso de contaminantes e infiltraciones (Gutiérrez & Aurelia, 2019), por experiencias previas en diseños de humedales, se usa una membrana aislante como barrera de impermeabilización, ésta debe ser instalada luego de una adecuada compactación del suelo(Gutiérrez & Aurelia, 2019).

Por experiencias en diseños de humedales como está documentado en el caso de un humedal artificial en Tomeco Chile, se usa una membrana aislante como barrera de impermeabilización HDPE, luego de una adecuada compactación del suelo(Gutiérrez & Aurelia, 2019).

La membrana HDPE es considerada una lámina de polietileno de baja permeabilidad y de alta densidad, la cual es usada para controlar el paso de fluidos, generalmente se usa en

condiciones físicas severas como es el caso de lagunas de lixiviados, humedales y en minería. (“Techos vegetales,” n.d.)

La impermeabilización es realizada en los taludes que comprenden la zona de entrada, de salida de los laterales y en la base del humedal.

El material debe cubrir la totalidad del lecho, colocándolo en capas de forma que no quede ningún espacio entre sí, las uniones en los traslapes se hacen con termofusión, ya que es un método apropiado para unir tubos y accesorios de polietileno, en el cual se calienta una placa y por medio de presión se unen las superficies, las uniones o traslapes deben quedar totalmente planas para impedir la infiltración del material y del agua residual (García Serrano & Corzo Hernández, 2008).

Material granular

La principal propiedad del medio granular es su permeabilidad, ya que debe permitir el paso del agua residual, se divide el humedal en zonas, para permitir que varíe el diámetro de las gravas, esto con el fin de que en las zonas de entrada y salida, se disponga de una grava de mayor diámetro en el caso de los humedales de estudio será un diámetro de 40 mm, evitando el taponamiento.(García Botero, 2005)

Se debe realizar el relleno con el material granular iniciando por las zonas de entrada y salida del humedal, en las cuales se dispone del material de mayor diámetro (40 mm) y luego se procede a rellenar la zona de tratamiento, este relleno debe hacerse con material limpio y libre de finos para evitar taponamientos.

Para el caso de estudio se optó por grava media, ya que tiene una buena conductividad hidráulica y esto es fundamental para mantener el flujo del agua a través del humedal. (García Serrano & Corzo Hernández, 2008).

El humedal se divide en zonas por disposición del diámetro de las gravas, en la **zona de entrada y salida** se usa una grava de mayor diámetro (40 mm), estas zonas tienen un ancho de 0,5 m, que corresponde a la longitud horizontal del talud. La zona de tratamiento corresponde a la longitud restante $L' = 2,596 \text{ m}$, se usa un diámetro de grava menor (36 mm).

Tabla 14

Esquema de las zonas de los humedales

1	Zona de entrada grava diámetro 40 mm
2	Zona de tratamiento, grava diámetro 36 mm
3	Zona de salida, grava diámetro 40 mm

Puesta en marcha

La puesta en marcha, es el fase desde el inicio de la operación hasta que se alcanzan coberturas vegetales entre el 60% y 80% (Rojas, Vera, & Vidal, 2013).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales con sistemas de humedales de flujo horizontal subsuperficial, alcanzan su periodo de madurez luego de dos años de operación, según experiencias previas (Rojas et al., 2013)

La puesta en marcha inicia con la plantación, y es la última etapa en la construcción, se realiza luego de la colocación y nivelación del lecho granular.

Este proceso se maneja por implantación, lo que indica que la planta (*heliconia Psittacorum*) se trasplanta de alguna fuente cercana o fuente comercial (viveros), aunque

se recomienda que se trasladen de lugares cercanos, esto con el fin de asegurar la correcta adaptación (Delgadillo, 2010).

La implantación se realiza cuando el lecho con gravas esté preparado, en este caso se usan *heliconias Psittacorum*, ya que al ser Macrófitas endémicas de la región, ayuda a que el proceso de adaptación y desarrollo de las plantas sea más sencillo, ya que están en su hábitat común. (Bedoya Pérez, Ardila Arias, & Reyes Calle, 2014)

Para la siembra se deben abrir agujeros en el terreno, se deben poner en ellos las plantas y luego estos agujeros son tapados (García Serrano & Corzo Hernández, 2008).

Luego de que se realiza el proceso de plantación, se debe tener el nivel del agua 2 cm encima del nivel de la grava por aproximadamente dos meses, durante este lapso de tiempo se debe agregar agua residual y agua potable e ir aumentando gradualmente la cantidad de agua residual, esto con el fin de alcanzar la total adaptación de las plantas, para que al final del proceso se pueda verter agua residual en su totalidad. (Bedoya Pérez et al., 2014)

Luego del proceso de adaptación el agua debe mantenerse 2 cms bajo el nivel de la grava, esto con el fin de evitar malos olores y proliferación de mosquitos y zancudos.

Mantenimiento

Se debe realizar un control de los tratamientos previos, y del correcto funcionamiento, que el agua este fluyendo sin obturaciones, y que el agua este en un adecuado nivel evitando que las raíces se queden sin agua.

En esta etapa se realiza cosecha y deshierbe, el cual se debe ejecutar durante el primer año. Cuando las plantas alcancen su capacidad de retención de contaminantes se recurrirá a siegas que permiten eliminar material que se descompone y hace que el proceso de

colmatación se acelere, esto mediante el corte de las partes aéreas de las plantas que se encuentran secas. (García Serrano & Corzo Hernández, 2008)

5. Conclusiones

Los resultados reportados en este artículo sugieren que los humedales construidos de flujo subsuperficial plantados con *Heliconia Psittacorum* pueden remover efectivamente materia orgánica de aguas residuales domesticas

Se observa en el análisis de los humedales que se logró obtener porcentajes de eficiencia de remoción del contaminante tanto DBO5 como SST óptimos gracias al diseño de los tres humedales como tratamiento secundario de aguas residuales, en los cuales se obtuvo para las oficinas administrativas un % de remoción de DBO5 del sistema $\%C_{f.DBO5} = 33$ [%], además de un % de remoción de SST del sistema $\%C_{f.SST} = 89$ [%], para la caseta de captación un % de remoción de DBO5 del sistema $\%C_{f.DBO5} = 31$ [%], además de un % de remoción de SST del sistema $\%C_{f.SST} = 89$ [%], para finalizar un % de remoción de DBO5 del sistema $\%C_{f.DBO5} = 36$ [%], además de un % de remoción de SST del sistema $\%C_{f.SST} = 89$ [%], para la caseta de la presa.

7. Recomendaciones

Por experiencias en humedales previamente construidos se tuvo en cuenta para la impermeabilización el uso de una geomembrana HDPE que impide el ingreso de residuos o filtraciones, esto teniendo en cuenta las ventajas que representa comparado con la arcilla compactada, ya que la arcilla pierde resistencia y presenta fracturación con la disminución de la humedad.

Según casos de construcción de humedales previos, el periodo de adaptación total o de madurez de dos años. En este tiempo se desarrolla el crecimiento de las plantas, su correcto funcionamiento de remoción de materia orgánica se recomienda en este periodo de tiempo que el mantenimiento del humedal se haga de manera frecuente.

Se recomienda implementar un tratamiento terciario, en el cual se incluya el monitoreo de todas las variables fisicoquímicas, microbiológicas, metales entre otras que son solicitadas que establece la Resolución Número 1207 de 2014 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014), y de esta manera determinar si es posible emplear el agua nuevamente en el riego de vías o proceso operativos , como alternativa de reúso.

Se recomienda realizar un nuevo muestreo y análisis en la salida del tratamiento primario y así mismo, una vez instalado el tratamiento secundario tener un monitoreo constante de las variables mas importantes para analizar el posible reusó del agua.

Se recomienda un estudio posterior, para analizar la viabilidad para que el sistema de tratamiento secundario propuesto cuente con un humedal de respaldo, es decir un sistema en paralelo.

Referencias Bibliográficas

- Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB). (2015). Proyecto de regulación del Río Tona. Embalse de Bucaramanga Componente I. Resumen ejecutivo avance del proyecto. Retrieved June 26, 2020, from Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB) website: <http://www.amb.com.co:8081/wp-proyectos/2017/10/25/embalse/>
- Ambiente Y Desarrollo Sostenible, M. DE. (2015). *RESOLUCIÓN 631 DE 2015*.
- Andrés, L. B. J. (1999). Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. *Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona)*.
- Arenas Ramirez, S. M., & Nuncira Parra, A. D. P. (2010). *Evaluacion De Humedales Artificiales Para El Tratamiento De Aguas Residuales Del Sector Industrial Avicola*. Universidad Industrial de Santander, Escuela De Ing. Quimica.
- Arteaga-Cortez, V. M., Quevedo-Nolasco, A., Valle-Paniagua, D. H. del, Castro-Popoca, M., Bravo-Vinaja, Á., & Ramírez-Zierold, J. A. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 10(5), 319–343.
- Bedoya Pérez, J. C., Ardila Arias, A. N., & Reyes Calle, J. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(3), 275–283.
- Cardona, L. A. L., & Vanegas, C. (2009). *Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética*. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Tecnología Química.

- Carlos A Madera P. (2018). HUMEDALES CONSTRUIDOS: Criterios de Diseño. Retrieved January 19, 2021, from UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER website: <https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1zrXa2EbNJ65k4lbfY5ZEnUGagK5CyZ-M>
- Carpena, R. O., & Bernal, M. P. (2007). Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Revista Ecosistemas*, 16(2).
- CASE, H. P. (2013). Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia psittacorum* (heliconiaceae). *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 37(145).
- Chafloque, W. A. L., & Gómez, E. G. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 9(17), 85–96.
- CHOW, V. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. CALIFORNIA SPANISH Books.
- Cooper, P. F., Job, G. D., Green, M. B., & Shutes, R. B. E. (1996). *Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment*. Water Research Centre Swindon.
- Cortes-Sandoval, A., Madera-Parra, C. A., Peña-Varón, M. R., Peña, S. E. J., & Lens, J. P. N. (2013). Eliminación de DQO, Nitrógeno (TKN, NH₄⁺, NO₃) y Cr (VI) en humedales construidos con policultivos tratando lixiviados de rellenos sanitarios a escala piloto. *Seminario Internacional GRAL*.
- Criley, R. A., & Broschat, T. K. (1992). Heliconia: Botany and horticulture of a new floral crop. *Horticultural Reviews*, 14, 1–55.
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 597–612.

Delgadillo, O. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*.

Nelson Antequera.

Díaz, C. (2014). Tratamiento de agua residual a través de humedales. *Tunja: V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja*.

EPA (U.S.). (1988). Design Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal .esign Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal ...

- Google Libros. Retrieved January 3, 2021, from [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=QVxkz98cjpEC&oi=fnd&pg=PR7&dq=EPA+\(U.S.+Environmental+Protection+Agency\).+Design+Manual,+Constructed+Wetlands+and+Aquatic+Plant+Systems+for+Municipal+Wastewater+Treatment.+Septiembre+1988.&ots=pHunFBx1Ph&sig=Ynk0](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=QVxkz98cjpEC&oi=fnd&pg=PR7&dq=EPA+(U.S.+Environmental+Protection+Agency).+Design+Manual,+Constructed+Wetlands+and+Aquatic+Plant+Systems+for+Municipal+Wastewater+Treatment.+Septiembre+1988.&ots=pHunFBx1Ph&sig=Ynk0)

Espinosa Ortiz, C. E. (2014). *Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes*.

Fernandez Alzate, C. C. (2013). *Auxiliar de ingeniería civil durante el proceso de pre-construcción del proyecto de regulación del río Tona-embalse de Bucaramanga*.

García Botero, T. (2005). *Diseño, construcción y evaluación preliminar de un humedal de flujo subsuperficial*. Bogotá-Uniandes.

García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). *Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial*.

García, J., Aguirre, P., Mujeriego, R., Huang, Y., Ortiz, L., & Bayona, J. M. (2004). Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater. *Water Research*, 38(7), 1669–1678.

- Gutiérrez, Y., & Aurelia, S. (2019). *Manejo de aguas lluvias ingresantes a humedal artificial Tomeco con anclaje innovador del material impermeabilizante*.
- Konnerup, D., Koottatep, T., & Brix, H. (2009). Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with Canna and Heliconia. *Ecological Engineering*, 35(2), 248–257.
- Laboratorio de Química Ambiental Ideam. (1997, July). TOMA Y PRESERVACIÓN DE MUESTRAS. Retrieved July 1, 2020, from http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis_De_Aguas/Toma_De_Muestras.htm
- Lara Borrero, J. A. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. *Trabajo Final. Master En Ingeniería y Gestión Ambiental. Instituto Catalán de Tecnología, Universidad de Politécnica de Cataluña, Barcelona, España*.
- Lecca, E. R., & Lizama, E. R. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*, 17(1), 71–80.
- Lopez, A. López. (2019). *UNIVERSIDAD POPULAR AUTÓNOMA Decanato de Ciencias Biológicas Sistemas de Tratamiento de Agua Residual*. 20.
- Madera-Parra, C. A., Peña-Salamanca, E. J., Peña, M. R., Rousseau, D. P. L., & Lens, P. N. L. (2015). Phytoremediation of landfill leachate with *Colocasia esculenta*, *Gynerum sagittatum* and *Heliconia psittacorum* in constructed wetlands. *International Journal of Phytoremediation*, 17(1), 16–24.
- Margarita, F., & Rodríguez, S. (2013). Cultivo Del Género *Heliconia*. *Cultivos Tropicales*, 34(1), 24–32.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Resolución Número 1207 de 2014. Retrieved January 19, 2021, from por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el

uso de aguas residuales tratadas. website:

https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf

Ministerio de Vivienda, C. y T. (2017). Resolución Numero 0330. Retrieved October 8, 2020, from <http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesAgua/0330 - 2017.pdf>

Montoya, J. I., Ceballos, L., Casas, J. C., & Morató, J. (2010). Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas. <https://doi.org/10.24050/reia.v7i14.420>

Pública, A. S. (n.d.). *Titulo del trabajo: “Aguas Residuales: Reuso y Tratamiento. Lagunas de estabilización: una opción para Latinoamérica”*.

Ramalho, R. S. (1990). *Tratamiento de aguas residuales*. Retrieved from www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis_De_Aguas/Toma_De_Muestras.htm

Reed, S. C., Crites, R. W., & Middlebrooks, E. J. (1995). *Natural systems for waste management and treatment*. McGraw-Hill, Inc.

Rodríguez, C. (2003). Humedales construidos. Estado del arte.(II). *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 24(3), 42–48.

Rojas, K., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Influencia de la estación y de las especies *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus* en la eliminación de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas durante la operación de puesta en marcha de humedales construidos de flujo horiz. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (69), 289–299.

Sanchez Gil, L. F., & Velez, Y. F. (2016). *Diseño y Evaluación de un Sistema Piloto para la Descontaminación de Aguas Residuales generadas en la UFPSO, empleando las especies*

Costus Spicatus y Heliconia Psicattacorum.

Sanz, J. M., Martín, N., & Camacho, J. V. (2009). Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. *Castilla, España: CONAMA.*

Silva, R., Sofía, Á., Zamora, Z., & Darío, H. (2005). *Humedales artificiales.* Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales.

Sosa Rodríguez, F. M. (2013). Cultivo del género *Heliconia*. *Cultivos Tropicales*, 34(1), 24–32.

Techos vegetales. (n.d.). Retrieved January 3, 2021, from <https://www.toxement.com.co/productos/portafolio/impermeabilización-de-placas-y-cubiertas/techos-vegetales/?prodId=1522>

Torres, S. I., & Vásquez, R. A. (2010). *Estudio de la potencialidad de crecimiento de once especies vegetales nativas tropicales regadas con lixiviados de rellenos sanitarios.* BSc Thesis (In Spanish). Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Apéndices

Apéndice A. Humedal Oficinas Administrativas

Figura 5

Plano del Humedal Oficinas Administrativas

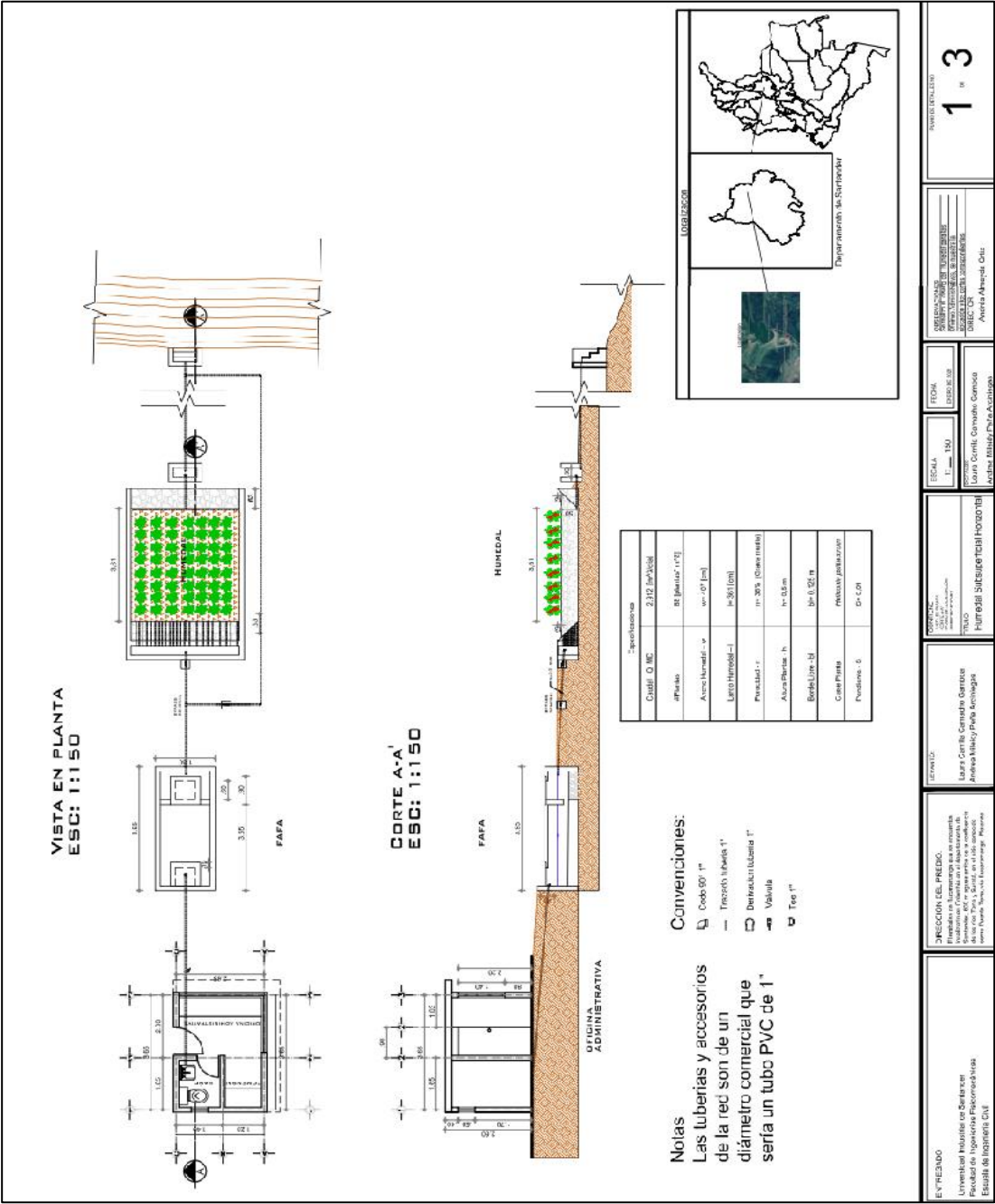


Figura 6

Plano del Humedal Caseta de Captación

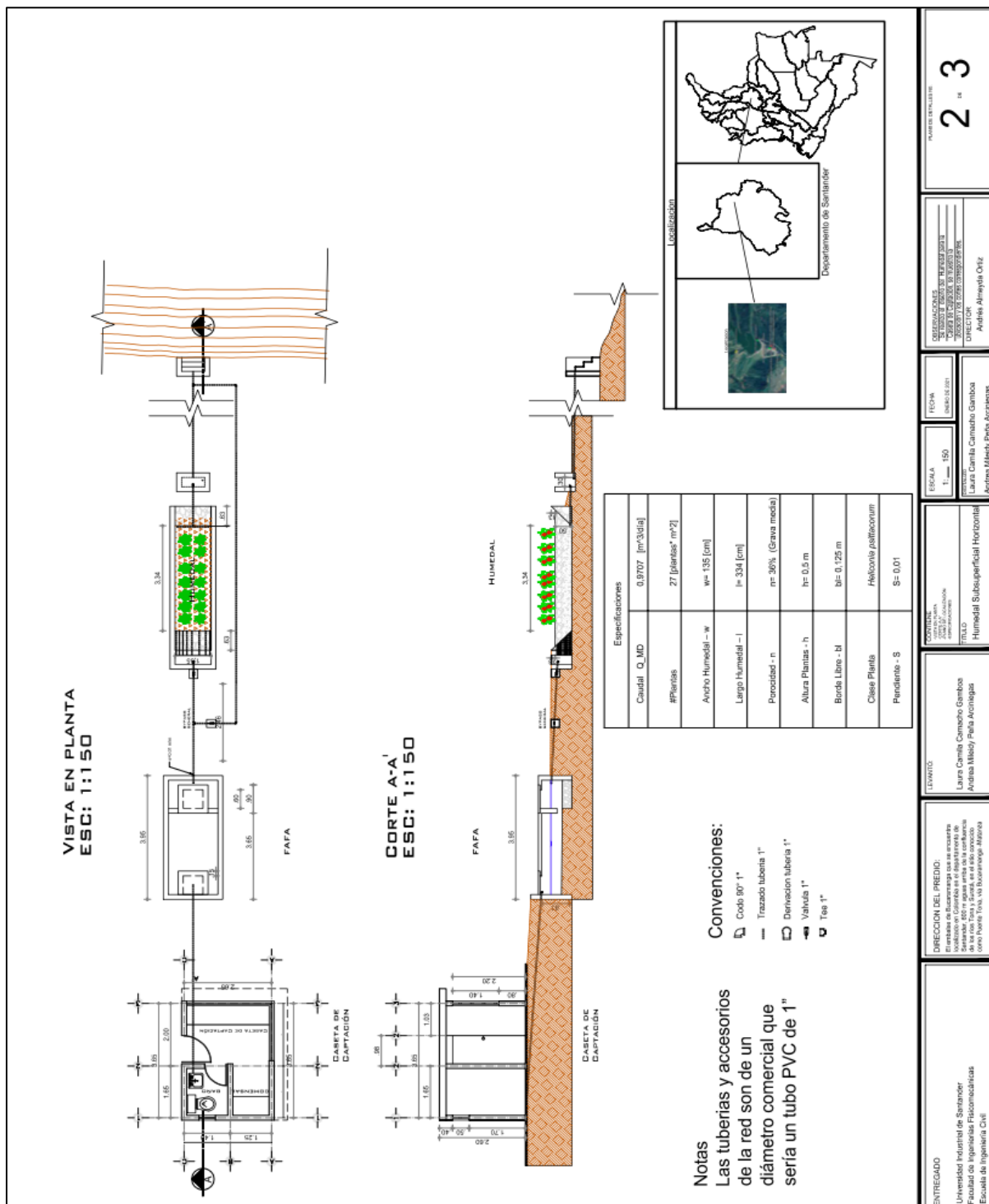


Figura 7

Plano del Humedal Caseta de la Presa

