UNIVERSIDAD CENTRAL MARTA ABREU DE LAS VILLAS

FACULTAD DE CONSTRUCCIONES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

TÍTULO: PROPUESTA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO SECUNDARIO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA TEXTILERA DESEMBARCO DEL GRANMA

Autor: Zandy Berrio Pérez.

Tutor: MSc. Ing. István Gómez Ríos

Santa Clara

Año: 2017

Pensamiento:

¨Hoy podemos afirmar que la base de investigaciones necesarias a los proyectos y al conocimiento progresivo de nuestros recursos hidráulicos, está creada…

¨Fidel

Agradecimientos

Agradezco cordialmente a la revolución por haberme dado la posibilidad de obtener este título.

A mi familia en especial a mis padres Carmen Pérez Molinet y Juan Antonio Berrio Macario, a mis hermanas Zahira Berrio Pérez y Zahily Berrio Pérez por su total apoyo a lo largo de estos cinco años.

A mi tutor István Gómez Ríos por su ayuda, confianza, y sacrificio para la realización de esta tesis.

Agradezco a mis compañeros de aula por su amistad desinteresada durante estos cinco años y a todo el personal que de una forma u otra colaboraron y me apoyaron durante toda la carrera.

A todos aquellos que han colaborado en el desarrollo de este trabajo, a mis profesores del Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.

A todos muchas gracias

DEDICATORIA

En primer lugar dedico esta tesis a mis padres y hermanos que fueron mí apoyo y motor impulsor en todos estos años.

A mi familia en general; en especial a mi tíos, tías y mis primos por su apoyo incondicional y creer en mí.

A mis amigos por contribuir de una forma u otra en esta Tesis y por su ayuda y apoyo a lo largo de mi carrera.

Resumen

El tratamiento de las aguas residuales, también conocido como procesos de depuración, es un sistema utilizado para remover los contaminantes del agua ya usada, su descontaminación puede realizarse mediante de medios naturales o artificiales.

La implementación de humedales artificiales subsuperficiales en el tratamiento final de las aguas residuales de la textilera Desembarco del Granma permitirá disminuir la carga contaminante y lograr el vertido final al medio, determinándose un humedal subsuperficial de flujo horizontal el que contará de un área total de 1475.20m, un ancho de 77.46 m y un largo 19.05 m.

El área del humedal se divide en 10 zanjas para ahorrar tiempo de trabajo y costo de la obra ya que se según las condiciones topográficas del terreno.

El tiempo de retención es de 0.72 día lo que será capaz de disminuir la carga contaminante y minimizar el impacto medio ambiental del territorio.

Abstract:

Wastewater treatment, also known as purification processes, is a system used to remove contaminants from the water already used, its decontamination can be done by natural or artificial means.

The implementation of subsurface artificial wetlands in the final treatment of the wastewater of the Desembarco del Granma Textile will allow to reduce the pollutant load and to achieve the final discharge to the environment, determining a subsurface wetland of horizontal flow that will count on a total area of 1475.20 m, A width of 77.46 m and a length of 19.05 m.

The wetland area is divided into 10 ditches to save working time and cost of the work as it is according to the topographic conditions of the land.

The retention time is 0.72 days which will be able to reduce the pollutant load and minimize the environmental impact of the territory.

Índice

INTRODUCCIÓN 1
Capítulo I Estado del Arte 4
1.1 Descripción de la zona de estudio (UBICACIÓN) 4
1.2 Las Aguas Residuales 5
1.3 Caracterización de aguas residuales 6
1.3.1 Aguas blancas 7
1.3.2 Aguas negras 7
1.3.3 Aguas residuales industriales 7
1.3.4 Clasificación de las industrias según sus vertidos 9
1.4 Industrias más contaminantes de la esfera ligera 10
1.4.1 Industria textil (Objeto de este estudio). 10
1.4.2 Industria del algodón 12
1.5 Tratamiento general 12
1.6 Transporte de aguas residuales 13
1.7 Tipos de tratamientos para aguas residuales 14
1.7.1 Tratamiento primario: 16
1.7.2 Sistemas secundarios: 17
1.7.3 Tratamientos anaeróbicos: 17
1.7.4 Tratamientos terciarios 17
1.7.5 Tratamiento mediante sistemas naturales 18
1.8 Definición de Humedal Artificial 18
1.9 Evaluación de alternativas y selección 20
1.9 Clasificación de los humedales artificiales 21
1.10 Sistemas según el flujo: 22
1.10.1 Humedales de Flujo Libre. 22
1.10.2 Humedales de flujo superficial: 23
1.10.3 Ventajas y desventajas del humedal de flujo superficial 23
1.10.4 Humedales de flujo subsuperficial 24
1.10.5 Humedal subsuperficial de flujo vertical 24
1.10.6 Humedal subsuperficial de flujo horizontal 25
1.10.7 Ventajas y desventajas de los humedales subsuperficial 26
1.11 Componentes del humedal 27
1.11.1 El agua 27
1.11.2 Substratos, sedimentos y restos de vegetación 28
1.11.3 Vegetación 29

1.11.4 La actividad microbiana: 30
1.11.5 Animales 30
1.12 Recomendaciones para el diseño de un humedal 31
Conclusiones del capítulo 32
Capitulo II Procedimiento de cálculo para establecer un humedal. 33
2.1 Selección del humedal 33
2.2 Diseño de humedales 34
2.3 Cálculo del área superficial 35
2.3.1 Calculo de la KT 35
2.3.2 Porosidad 35
2.4 Determinación del Caudal (Q) 36
2.4.1 Métodos para medición de caudales: 37
2.4.2 Método del Flotador 37
2.4.3 Materiales que se utilizan para realizar el aforo por flotadores son: 37
2.4.4 Procedimiento del método 38
2.4.5 Cálculo del tiempo promedio en segundos (tp) 38
2.4.6 Calculo del Área 40
2.4.7 Calculo del Caudal 42
2.5 Pendiente y Profundidad 44
2.6 Sustrato 44
2.7 Ancho del humedal 44
2.8 Largo del humedal 44
2.9 Tiempo de retención Hidráulica 45
2.10 Vegetación 45
Conclusiones del capítulo: 46
Capítulo III Discusión de los Resultados 47
3.1 Cálculo del caudal diario 47
3.2 Cálculo del Área superficial 47
3.3 Cálculo del Ancho del humedal 48
3.4 Cálculo del Largo del humedal 48
3.5 Tiempo de Retención Hidráulica 49
3.6 Materiales necesarios 49
3.7 Operación y Mantenimiento del humedal 51
Conclusiones: 53
RECOMENDACIONES: 54
Referencias Bibliográficas 55

Glosario de términos 56

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales provenientes de la industria puede llevarse a cabo mediante diversos métodos. Estos pueden alternarse de diferentes maneras, lo que ofrecerá como resultado diferentes secuencias de operaciones y procesos. Todos estos se basan en fenómenos físicos, químicos y biológicos. Sin embargo, casi todas las plantas de tratamiento de aguas residuales industriales se conciben con base en procesos biológicos. (Orestes, 2011).

En la búsqueda de soluciones para el tratamiento de las aguas residuales industriales aplicando tecnología de bajo consumo de energía, dentro de los procesos biológicos, se ha promovido la utilización de las lagunas de estabilización, los procesos anaerobios de alta tasa, los tratamientos primarios de alta eficiencia, las zanjas de oxidación, los filtros percoladores, los humedales naturales y artificiales o combinación de estos procesos. (Orestes, 2011).

La implementación de las lagunas de estabilización en algunos municipios de Villa Clara, es atractiva en términos económicos, pero han producido algunos rechazos por parte de las comunidades aledañas por la generación de malos olores. También se ha detectado mal funcionamiento de las mismas, ocasionado posiblemente por aspectos constructivos y/o de operación y mantenimiento, puesto que se han tenido en la concepción de ser sistemas que pueden trabajar sin ninguna supervisión.

La zona central de Santa Clara, ha sido una de las que más ha construido lagunas de estabilización. En Santa Clara se cuenta con lagunas de estabilización en los repartos Sakenaf, Chichi Padrón, Las Minas y Textilera.

Actualmente existe la necesidad de realizar estudios que analicen el funcionamiento de las lagunas implementadas en nuestro país, para fundamentarlos diseños futuros que se efectuarán en otras poblaciones.

De acuerdo con esto, se definió como objetivo central de esta investigación evaluar y monitorear el comportamiento actual del sistema de lagunas de estabilización, utilizadas para el tratamiento de las aguas residuales

industriales de la Textilera, para interpretar su funcionamiento en términos hidráulicos y cinéticos, eficiencia en remoción en carga orgánica, al igual que los posibles problemas ambientales asociados con la implementación del mismo.

La metodología contemplara la obtención de información primaria, mediante muestreos de campo y trabajo de laboratorio. Para ello, se efectuaron mediciones de variables fisicoquímicas y biológicas. Igualmente se realizó una amplia revisión de información secundaria, principalmente en lo concerniente a caracterizaciones realizadas durante varios años, planos del proyecto y parámetros de diseño.

En el tratamiento de las aguas residuales (AR) se utilizan varios métodos, los artificiales y los naturales, estos últimos generan un proceso con alta demora en el tiempo por lo que la política de muchos países es la creación y fabricación de plantas primarias de tratamiento artificial, las cuales son altamente costosas.

Problema científico a resolver:

La textilera Desembarco del Granma de la ciudad de Santa Clara debido a sus procesos de producción emite contaminantes a las aguas las cuales son tratadas en una planta de tratamiento primarios las cual por su estado de deterioro no filtra completamente las aguas y vierte las mismas con altos contaminantes orgánicos como inorgánicos al medio.

Hipótesis

Es posible mejorar la calidad y disminuir el vertido contaminante de las aguas residuales al medio en la textilera Desembarco del Granma si se implementan sistemas naturales para el tratamiento secundario de las mismas.

Objetivo General

Establecer un humedal subsuperficial para disminuir la carga contaminante proveniente de la planta de tratamiento primario de la textilera Desembarco del Granma.

Objetivos Específicos

- Realizar la revisión bibliográfica de la literatura referente al tratamiento de las aguas residuales.
- Realizar los cálculos necesarios del diseño hidráulico, así como el análisis químico de entrada al humedal para lograr la deposición final de las aguas residuales proveniente de los procesos de producción de la Textilera Desembarco del Granma y de la población adyacente.

Capítulo I Estado del Arte

En este capítulo se realizará una revisión bibliográfica que permita establecer conceptos y toma de decisiones para la realización de este trabajo.

Antes de continuar debemos realizar una descripción de la zona de estudio.

1.1 Descripción de la zona de estudio (UBICACIÓN)

Se realizó toma fotográfica satelital de Googlemap y se expone la micro localización del área de estudio.

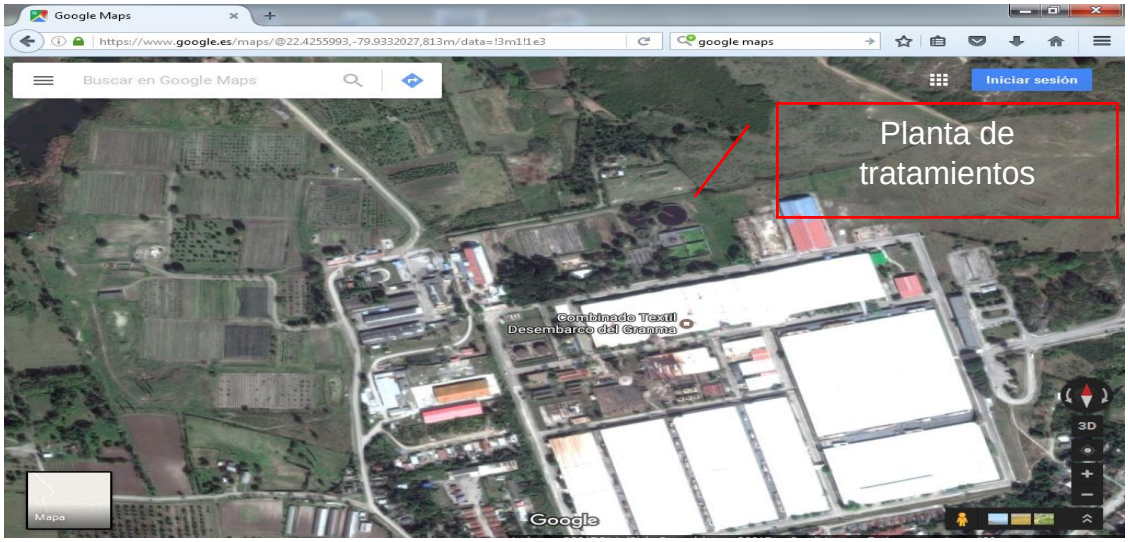


Figura 1: Empresa Textil y planta de tratamientos de residuales.

La Fábrica de confecciones textiles Desembarco del Granma se encuentra ubicada en la Carretera de Camajuani km 2 ½ la que se especializa en la confección de tejidos para el mercado nacional e internacional actualmente cuanta con una planta de tratamiento de residuales muy deteriorada la cual está vertiendo al medio una cantidad de residuos los cuales son depositados contaminando las aguas subterráneas de las que se abastece el reparto aledaño.

Es importante señalar que estas aguas provienen de la planta de tratamiento de AR del Combinado Textil. Las condiciones técnico-operacionales no garantizan que las aguas que salgan con los parámetros establecidos por las normas cubanas.

Con el objetivo de conseguir los parámetros requeridos por las normas en estas aguas se propone la construcción de una instalación adicional para este fin. La instalación y procesamiento de las aguas se realizará a partir de la

utilización de recursos de fácil adquisición y la tecnología de tratamiento es simple y económica.

Para resolver el problema de envejecimiento y deterioro de la planta existente se estimó que sería provechoso establecer plantas de tratamiento naturales que fueran de fácil operación y funcionamiento, con un mínimo de recurso, así como la necesidad de minimizar los costos de operaciones.

El reparto afectado por la contaminación de estas residuales cuentas con una población de 809 habitantes, tasa de crecimiento 1,6 %, consumo de agua aproximada 1 800 m^3/año. El 48,1% de las viviendas son atendidas por un sistema de alcantarillado público, el 13,6% tiene pozos ciegos, el 24% utiliza pozos y el 14,3% elimina las AR de otras formas, sin cumplir las normativas de descarga. (ONEI, 2014)

En el capítulo VI de la Ley de Aguas; De la Prevención y Control de la Contaminación de las Aguas y normas cubanas NC 27:2012.

Art 16. Queda prohibido descargar, sin sujetarse a las correspondientes normas técnicas y regulaciones, a las redes de alcantarillado, o en las quebradas, acequias, ríos, lagos naturales o artificiales, o en las aguas marítimas, así como infiltrar en terrenos, las aguas residuales que contengan contaminantes que sean nocivos a la salud humana, a la fauna, a la flora y a las propiedades. (Hidraulicos, 2012)

1.2 Las Aguas Residuales

El hombre ha utilizados el agua no sólo para su consumo, sino con el paso del tiempo, para su comodidad y confort, convirtiendo las aguas usadas en vehículo de desechos. De aquí surge la denominación de aguas residuales.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido como uno de los derechos fundamentales de todo ser humano el disfrute del grado máximo de salud posible.

Considera la salud como un estado complejo de bienestar físico, mental y social, y fija el nivel de salud por el grado de armonía que exista entre el hombre y el medio que sirve de escenario a su vida.

La contaminación de las aguas es uno de los factores importantes que rompe la armonía entre el hombre y su medio tanto a corto, como a medio y largo

plazo; por lo que la prevención y lucha contra ella constituye en la actualidad una necesidad de importancia prioritaria.

Contaminación, a los efectos de la Ley de Aguas, es la acción y el efecto de introducir materias o formas de energía, o inducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto impliquen una alteración perjudicial en su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica.

La contaminación de los cauces receptores superficiales y subterráneos (ríos, lagos, embalses, acuíferos, mar) tienen su origen en: (Juan, 1999)

• Precipitación atmosférica.

• Escorrentía agrícola y de zonas verdes.

• Escorrentía superficial de zonas urbanizadas.

• Vertidos de aguas procedentes del uso doméstico.

• Descargas de vertidos industriales.

Dentro de las distintas clasificaciones que pueden establecerse de las aguas residuales, uno de los esquemas, más generalmente usado por su simplicidad, es el que las identifica por su procedencia:

• Drenaje

• Escorrentía

• Domésticas

• Fecales

• Limpieza

• Industriales

• Comerciales

• Agregarías

1.3 Caracterización de aguas residuales

Los contaminantes en las aguas residuales son habitualmente una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos. Normalmente no es ni práctico ni posible obtener un análisis completo de la mayoría de las aguas residuales.

1.3.1 Aguas blancas

Las aguas blancas están constituidas fundamentalmente por aguas pluviales, que son las generadoras de las grandes aportaciones intermitentes de caudales. No obstante, con el progresivo avance y desarrollo del urbanismo subterráneo (estacionamientos, centros comerciales y de ocio, vías de comunicación deprimidas y subterráneas, galerías de servicios, etcétera) las aguas de drenaje han ido cobrando una importancia creciente, especialmente por estar muy a menudo afectadas por la contaminación producida por fugas en las redes de alcantarillado. (Juan, 1999)

Se integran, por tanto, como componentes de la suciedad de las aguas blancas:

- Elementos de la contaminación atmosférica: depuración húmeda de las lluvias acidas.
- Restos de la actividad humana y asociada: papeles, colillas, excrementos de animales, restos de la recogida y evacuación de basura.
- Arena, residuos vegetales y de zonas de jardines.
- Contaminación aportada por las aguas de drenajes: aguas salobres fugas de alcantarillados.

1.3.2 Aguas negras

En las aguas negras o urbanas, los compuestos químicos que se hallan presentes son muchos. A título ilustrativo, se pueden citar: microorganismos, urea, albumina, proteínas, ácidos acéticos y láctico; bases jabonosas y almidones; aceites: animales, vegetales y minerales; hidrocarburos; gases: sulfhídrico, metano, etcétera; sales: bicarbonatos, sulfatos, fosfatos, nitritos, nitratos, etcétera. (Juan, 1999)

1.3.3 Aguas residuales industriales

Las aguas residuales industriales son aquellas que proceden de cualquier actividad o negocio en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua. Son enormemente variables en cuanto a caudal y composición, difiriendo las características de los vertidos, no sólo de una industria a otra, sino también dentro de un mismo tipo de industria. Éstas son

más contaminadas que las aguas residuales urbanas, además, con una contaminación mucho más difícil de eliminar. (Juan, 1999)

A veces, las industrias no emiten vertidos de forma continua, sino únicamente en determinadas horas del día o incluso únicamente en determinadas épocas de año, dependiendo del tipo de producción y del proceso industrial. También son habituales las variaciones de caudal y carga a lo largo del día.

Su alta carga unida a la enorme variabilidad que presentan, hace que el tratamiento de las aguas residuales industriales sea complicado, siendo preciso un estudio específico para cada caso. (Juan, 1999)

Con independencia de la existencia de índices similares a los encontrados en vertidos urbanos, aparecen otros como tóxicos inhibidores, que en ciertas proporciones impiden los procesos enzimáticos de los microorganismos, o incluso producen su muerte.

La gran variedad y cantidad de productos que se vierten obliga a una investigación propia para cada tipo de industria. No existe similitud alguna entre los vertidos de actividades industriales, como son: alimentación, química, petroquímica, agrícola, forestal, minerales y metalúrgicas, etcétera.

De todas formas, si el contenido es muy alto en materia orgánica o sólidos en suspensión, pueden estimarse la elección de índices con el mismo criterio que el analizado para la definición de las aguas residuales de origen doméstico. Pero será necesario analizar las sustancias específicas vertidas, que pudieran dificultar el tratamiento biológico o afectar a los materiales constitutivos de la red de alcantarillado u obras de fábrica en contacto con las aguas. La industria considerada, antes de verter debería efectuar la corrección de los parámetros perturbadores.

Son numerosísimos los índices orgánicos e inorgánicos procedentes de la actividad industrial, decenas de miles, pero de forma resumida, deberán contemplarse índices que definan el contenido en:

• Ácidos que pueden atacar el material o inhibir los procesos.

• Básicos que pueden inhibir los procesos biológicos.

• Productos petrolíferos y grasas poco degradables.

• Detergentes que retardan la sedimentación, forman espumas e impiden la aireación.

• Metales pesados: Cu, Cr, As, Cd, Pb, Hg, B, etcétera, tóxicos para los microorganismos que intervienen en los procesos biológicos.

• Fenoles, cianuros, inhibidores y tóxicos.

• Productos radioactivos.

Es conveniente resaltar aquí la importancia de la toma de muestras. El análisis reflejará el resultado de la muestra enviada al laboratorio, debiendo ser ésta representativa del agua que se pretende definir. La toma de muestra deberá tener en cuenta la variación en el tiempo del caudal y carga contaminante en el valor absoluto.

1.3.4 Clasificación de las industrias según sus vertidos

Las industrias se pueden clasificar en cinco grupos de acuerdo con los contaminantes específicos que arrastran las aguas residuales:

1.3.4.1 Industrias con efluentes principalmente orgánicos:

• Papeleras.

• Azucareras.

• Mataderos.

• Curtidos.

• Conservas (vegetales, carnes, pescado, etcétera).

1.3.4.2 Industrias con afluentes con materias en suspensión:

• Lavaderos de mineral y carbón
• Corte y pulido de mármol
• Laminación en caliente y colada continua

• Lecherías y subproductos (leche en polvo, mantequilla, queso, etcétera).

• Fermentación (fabricación de alcoholes, levaduras, etcétera).

• Preparación de productos alimenticios (aceites y otros).

• Bebidas.

• Lavanderías.

1.3.4.3 Industrias con efluentes orgánicos e inorgánicos:

• Refinerías y Petroquímicas.

• Coquerías.

• Textiles.

• Fabricación de productos químicos, varios.

1.3.4.4 Industrias con efluentes principalmente inorgánicos:

• Limpieza y recubrimiento de metales.

• Explotaciones mineras y salinas.

• Fabricación de productos químicos, inorgánicos.

1.4 Industrias más contaminantes de la esfera ligera

Se consideraran distintos tipos de industrias, indicando los contaminantes más importantes de sus vertidos, así como una breve consideración de cuál o cuáles son los tipos de tratamiento más típicos, útiles y económicos para tratar sus vertidos. Se contemplan las industrias más destacadas.

1.4.1 Industria textil (Objeto de este estudio).

Los vertidos de las fábricas textiles dependen del tipo de proceso a los que se sometan los distintos materiales empleados en la empresa textil. Podemos dividir las materias primas en tres grandes grupos: lana, algodón y fibras químicas.

Industria de la lana

La contaminación de los vertidos de la lana proviene de los procesos siguientes:

- Desengrasado
- Tintura
- Engrasado
- Batanado
- Carbonizado
- Layado
- Apresto

El desengrasado se realiza con soluciones que contienen detergentes y el carbonato sódico, como compuesto para alcalinizar la solución. Un elevado porcentaje de impurezas naturales de la lana se eliminan en este proceso; en consecuencia se debe esperar vertidos que contendrán fuertes concentraciones de carbonato sódico, detergentes, grasas en emulsión y sales minerales, por tanto, serán alcalinas (pH entre 10 y 11.5), elevada DBO, elevada concentración de sólidos en suspensión y totales. Según algunos estudios realizados, el 40 % en peso de la lana bruta corresponde a impurezas, que contaminarán el agua de lavado.

Un proceso importante en el lavado de la lana, es la recuperación de las grasas de tal forma que una centrifugación primaria (desfangadora), seguida de una centrifugación secundaria (deshidratadora), consigue una recuperación de grasas del 4 % sobre lana grabada.

Los vertidos procedentes de la tintura contendrán la solución colorante, generalmente contienen ácido acético – acetato sódico, y pueden contener según el sistema de tintura, dicromato sódico, sulfato amónico, sulfato sódico y monoclorobenceno.

La DBO de estos efluentes, así como los sólidos totales en suspensión es pequeña.

En el engrasado se utiliza generalmente aceite de oliva con mezcla de grasa animal o enzimajes sintéticos. Se realiza para aumentar la cohesión de la fibra y facilitar la hilatura; en consecuencia. No debe producir vertidos importantes por sí mismo. La misión del batanado, consiste en encoger y apelmazar la estructura del tejido de lana que sale del telar, formando un tejido más cerrado y grueso. Aunque las recetas de batanado son diversas, generalmente se utiliza jabón o detergente en presencia de hidrógeno sódico y un agente antiespumante. Los vertidos proceden de la eliminación del exceso de solución de batanado. Esta eliminación se puede realizar mediante presión y lavado posterior y, en consecuencia, tendremos unos efluentes con una elevada alcalinidad y detergentes.

El carbonizado es un tratamiento que generalmente se realiza con ácido sulfúrico concentrado y caliente, para convertir la materia vegetal que pueda

convertir la lana en cenizas, por deshidratación y separarla del tejido. El vertido de los líquidos de carbonizado es muy ácido, con elevada concentración de sulfatos y con sólidos en suspensión. Generalmente lo que se hace es una neutralización de estas disoluciones antes de realizar el vertido.

Antes de que el tejido entre a la sección de acabados, puede someterse a un lavado, cuyos vertidos generalmente no están excesivamente contaminados.

1.4.2 Industria del algodón

El algodón se descruda en calderas para eliminar las impurezas naturales, se blanquea, se tiñe y finalmente se enzima. Los vertidos del desencolado contendrán una DBO elevada, son generalmente neutros y su contenido en sólidos es elevado. El descrudado se realiza con varios procedimientos y se emplean como reactivos más importantes el hidróxido sólido, el carbonato sódico y detergentes. En consecuencia, los vertidos tendrán una alta alcalinidad, elevada DBO, un contenido en sólidos elevado y alta temperatura. El blanqueo se realiza principalmente con hipoclorito sódico, clorito sódico o agua oxigenada. Los vertidos serán alcalinos, elevada DBO y gran contenido en sólidos. (Juan, 1999).

Según algunos estudios realizados, en una industria de acabado de algodón el 16 % del volumen total de vertidos producidos corresponden al desencolado con una aportación del 53 % de la DBO total. Un 36 % de los sólidos totales y un 6 % de la alcalinidad total. (Juan, 1999, Alejandro, 2006)

El descrudado produce un 19 % del volumen total, con un aporte del 37 % de la DBO total, un 43 % de sólidos totales y un 60 % de la alcalinidad total. Los demás procesos producen el 65 % del volumen total, con un aporte del 10 % a la DBO, un 21 % de sólidos totales y un 34 % de la alcalinidad total(Juan, 1999).

1.5 Tratamiento general

Cada industria, en función del caudal de aguas residuales y de su pH, así como por la existencia de un posterior tratamiento o no, deberá realizar el estudio sobre el método más económico a utilizar, teniendo en cuenta el pH que la legislación permite para los vertidos en los alcantarillados o lechos de agua. Se pueden poner algunos ejemplos para mejorar costos de depuración. Una

empresa produce unas aguas residuales ácidas y posteriormente realiza un tratamiento biológico. (Juan, 1999)

El pH óptimo para tratamientos biológicos, se encuentra alrededor de la neutralidad, no obstante, el rendimiento más interesante es a pH más bajos, la neutralización se puede realizar con una lechada de cal, con el suficiente tiempo para alcanzar el pH previsto para el tratamiento biológico; el ahorro que se obtiene, en lugar de utilizar productos químicos para la neutralización, puede ser superior al menor rendimiento de la depuración biológica.(Juan, 1999)

Si una empresa produce aguas residuales ácidas en un proceso y básicas en otro, indudablemente, deberá realizar una igualación de éstas, pudiendo obviar (dependiendo de la acidez o basicidad final) la neutralización (Juan, 1999)

También puede resultar económicamente rentable igualar las aguas residuales ácidas de una empresa con las aguas residuales básicas de otra empresa que esté relativamente cerca.

Empresas con aguas residuales alcalinas, pero con poco volumen de éstas, pueden retener los vertidos durante un cierto tiempo para que el contacto con el anhídrido carbónico del aire sea suficiente para bajar el pH hasta los límites permitidos por la legislación.

1.6 Transporte de aguas residuales

En las ciudades más desarrolladas tecnológicamente las aguas residuales son transportadas desde su punto de origen hasta las instalaciones depuradoras a través de tuberías, generalmente clasificadas según el tipo de agua residual que circule por ellas.

Los sistemas que transportan tanto agua de lluvia como aguas residuales domésticas se llaman combinados. Generalmente funcionan en las zonas viejas de las áreas urbanas. Al ir creciendo las ciudades e imponerse el tratamiento de las aguas residuales, las de origen doméstico fueron separadas de las de los desagües de lluvia por medio de una red separada de tuberías. Esto resulta más eficaz porque excluye el gran volumen de líquido que representa el agua de escorrentía. Permite mayor flexibilidad en el trabajo de la planta depuradora y evita la contaminación originada por escape o desbordamiento que se produce cuando el conducto no es lo bastante grande

para transportar el flujo combinado. Para reducir costes, algunas ciudades, por ejemplo Chicago, han hallado otra solución al problema del desbordamiento: en lugar de construir una red separada, se han construido, sobre todo bajo tierra, grandes depósitos para almacenar el exceso de flujo, después se bombea el agua al sistema cuando deja de estar saturado. (Juan, 1999)

Las instalaciones domésticas suelen conectarse mediante tuberías de arcilla, hierro fundido o PVC de entre 8 y 10 cm de diámetro. El tendido de alcantarillado, con tuberías maestras de mayor diámetro, puede estar situado a lo largo de la calle a unos 1.8 m o más de profundidad. Los tubos más pequeños suelen ser de arcilla, hormigón o cemento, y los mayores, de cemento reforzado con o sin revestimiento. A diferencia de lo que ocurre en el tendido de suministro de agua, las aguas residuales circulan por el alcantarillado más por efecto de la gravedad que por el de la presión. Es necesario que la tubería esté inclinada para permitir un flujo de una velocidad de al menos 0.46 m por segundo, ya que a velocidades más bajas la materia sólida tiende a depositarse. (Juan, 1999)

Los desagües principales para el agua de lluvia son similares a los del alcantarillado, salvo que su diámetro es mucho mayor. En algunos casos, como en el de los sifones y las tuberías de las estaciones de bombeo, el agua circula a presión.

Las canalizaciones urbanas acostumbran a desaguar en interceptadores, que pueden unirse para formar una línea de enlace que termina en la planta depuradora de aguas residuales. Los interceptadores y los tendidos de enlace, construidos por lo general de ladrillo o cemento reforzado, miden en ocasiones hasta 6 m de anchura.

Las aguas residuales son transportadas desde su punto de origen hasta las instalaciones depuradoras a través de tuberías, generalmente clasificadas según el tipo de agua residual que circule por ellas. (Juan, 1999)

1.7 Tipos de tratamientos para aguas residuales

En ingeniería ambiental el término tratamiento de aguas es el conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es la eliminación o reducción de la contaminación así como la eliminación de las

características no deseables de las aguas, bien sean naturales, de abastecimiento, de proceso o residuales llamadas, en el caso de las urbanas, aguas negras.

Las aguas residuales (o servidas) pueden provenir de actividades industriales o agrícolas, instituciones, locales comerciales y del uso doméstico. Algunos autores hacen una diferencia entre aguas servidas y aguas residuales en el sentido que las primeras sólo provienen del uso doméstico y las segundas corresponden a la mezcla de aguas domésticas e industriales.

Las aguas residuales, por razones de salud pública y por consideraciones de recreación económica y estética, no pueden desecharse vertiéndolas sin previo tratamiento en lagos o corrientes convencionales. Los materiales inorgánicos como la arcilla, sedimentos y otros residuos se pueden eliminar por métodos mecánicos y químicos; sin embrago, si el material que debe ser eliminado es de naturaleza orgánica, el tratamiento implica usualmente actividades de microorganismos que oxidan y convierten la materia orgánica en CO_2, es por esto que el tratamiento de las aguas de desecho son procesos en los cuales los microorganismos juegan papeles cruciales.

El tratamiento de las aguas residuales es un proceso complejo, exige un importante esfuerzo para la evaluación de las necesidades de depuración, tales como la caracterización de las aguas residuales. Esto último se logra a partir de diversas mediciones físicas, químicas y biológicas, entre las cuales se incluyen la determinación del contenido en sólidos, la demanda bioquímica de oxígeno, la demanda química de oxígeno y el pH. (Juan, 1999)

La depuración cobró importancia progresivamente desde principios de la década de 1970 como resultado de la preocupación general expresada en todo el mundo sobre el problema, cada vez mayor, de la contaminación humana del medio ambiente, desde el aire a los ríos, lagos, océanos y aguas subterráneas, por los desperdicios domésticos, industriales, municipales y agrícolas. (Juan, 1999)

Puede decirse que solamente a partir de la década de los 60, términos tales como contaminación del aire y del agua, protección del medio ambiente, ecología, etcétera; pasaron a ser palabras de uso común. Antes de estas

fechas estos términos pasaron desapercibidos para el ciudadano medio y en general únicamente representaban ideas confusas. (Juan, 1999)

La contaminación es un problema serio y es por supuesto deseable que el ciudadano sea consciente de ello, además de que el hombre está equipado para corregir el deterioro del medio ambiente antes de que sea demasiado tarde. De hecho, la corrección de la contaminación no es un problema técnico de gran dificultad comparado con otros, mucho más complejos, resuelto con éxito en décadas recientes, tal como la exploración de la superficie de la Luna por el hombre. Esencialmente, el conocimiento técnico básico requerido para resolver el problema de la contaminación está ya a disposición del hombre y, en la medida en que quiera pagar un precio razonable por conseguirlo, la pesadilla de la destrucción a través de la contaminación nunca se hará realidad. (Juan, 1999)

De hecho precios muy superiores han sido pagados por la humanidad para desarrollar y mantener toda la maquinaria de guerra y armamento.

Puede considerarse que solamente en los últimos años el diseño de las plantas depuradoras de aguas ha evolucionado de ser meramente empírico a tener una sólida base científica. Además, la investigación fundamental en nuevos procesos de tratamiento tales como ósmosis inversa y electrodiálisis sólo recientemente se han convertido en algo verdaderamente accesible.(Juan, 1999)

1.7.1 Tratamiento primario:

Estos sistemas son sencillos y tienen como función la limpieza de aquellas partículas cuyas dimensiones son grandes y pueden obstruir los procesos consecuentes. Estos tratamientos son por medio de cribado o mallado, la flotación o eliminación de los sedimentos y grasas. (Alejandro, 2006, Oscar et al., 2010).

Mallas:

Tienen la función de detener los materiales flotantes como madera plástico, los que pueden bloquear las tuberías.

Cribado:

Rejas o rejillas de barras metálicas paralelas e igualmente espaciadas. Su función es retener sólidos gruesos que floten o que se encuentren suspendidos

en el agua. Pueden ser de limpieza manual (gruesas) o de limpieza mecánica (finas).

Trampas de grasas:
Se utilizan en la acumulación de grasas y de lodos que puedan obstruir las tuberías mediante el proceso de flotación.

1.7.2 Sistemas secundarios:

Los sistemas secundarios son tecnologías implantadas principalmente siguiendo los métodos naturales de depuración y filtración de las aguas en la naturaleza.

1.7.3 Tratamientos anaeróbicos:

Estos tratamientos son algo complejo ya que se realizan mediante digestión anaeróbica: procesos mediante el cual los organismos catalizan y metabolizan sus alimentos en ausencia de oxígeno, y se realizan mediantes reactores de primera (fosas sépticas) y segunda generación (Reactor de lecho de lodos). (Alejandro, 2006)

1.7.4 Tratamientos terciarios

El tratamiento terciario (al que también se le conoce como tratamiento avanzado) es la serie de procesos destinados a conseguir una calidad del efluente superior a la del tratamiento secundario convencional descrito en apartados anteriores.

Existen diversas razones por la que es necesario aplicar un tratamiento terciario a un agua residual, una de las principales es la reutilización del recurso

El tratamiento terciario, suele emplearse para eliminar el fósforo, e incluye pasos adicionales para mejorar la calidad del efluente eliminando los contaminantes recalcitrantes. Existen procesos que permiten eliminar más de un 99 % de los sólidos en suspensión y reducir la DBO5 en similar medida. Los sólidos disueltos se reducen por medio de procesos como la ósmosis inversa y la electrodiálisis. La eliminación del amoníaco, la desnitrificación y la precipitación de los fosfatos pueden reducir el contenido en nutrientes. Si se pretende la reutilización del agua residual, la desinfección por tratamiento con

ozono es considerada el método más fiable, excepción hecha de la cloración extrema.

Es probable que en el futuro se generalice el uso de éstos y otros métodos de tratamiento de los residuos a la vista de los esfuerzos que se están haciendo para conservar el agua mediante su reutilización.

1.7.5 Tratamiento mediante sistemas naturales

Estos son sistemas que tienen como medios los suelos y la flora los que tiene la capacidad de responder a los contaminantes naturales los que aprovechan para su desarrollo.

Estos sistemas se aplican una vez que ya se haya sometido el agua a un tratamiento anterior para que la carga contaminante se aproxime a la los niveles aceptados.

Estos procesos se han desarrollado en diferentes medios adaptando las características de los suelos y de las plantas y partiendo de eso se pueden catalogar o clasificar en: (Alejandro, 2006, Oscar et al., 2010)

- Tratamientos en suelos de baja velocidad
- Tratamiento en suelos de rápida infiltración
- Tratamiento de suelos de escurrimientos
- Tratamiento en humedales (WETLANDS)
- Tratamiento con plantas acuáticas

En nuestro trabajo se realizara un diseño de tratamiento en humedales por eso es importante definir que un humedal es un área de tierra que en su superficie se encuentra cubierta con agua que se conoce también como pantano, con poca profundidad para que la vegetación pueda llegar a la parte inferior del suelo y enraizarse bien.

1.8 Definición de Humedal Artificial

Los sistemas diseñados para imitar las características y procesos (físicos, químicos y biológicos) de un humedal natural son comúnmente conocidos como “humedales artificiales” o “humedales construidos”. Los humedales artificiales son sistemas complejos e integrados en los que tienen lugar interacciones entre el agua, plantas, animales, microorganismos, energía solar,

suelo y aire; con el propósito de mejorar la calidad del agua residual y proveer un mejoramiento ambiental. (Pedro, 2014)

El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de plantas acuáticas (macrófitas) enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado, poco profundo (normalmente menos de 1 m de profundidad). La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluente es depurada progresiva y lentamente. (Pedro, 2014)

Los humedales artificiales se diferencian de los pantanos naturales, en que son diseñados, construidos y operados para el uso y el beneficio humano. Se construyen en áreas donde un humedal antes no existía. Por tanto, a través del diseño y la construcción, es posible mantener un control significativo sobre el sustrato, la vegetación y el régimen hidráulico del humedal; con adecuado control de estos parámetros, es posible diseñar un humedal para desempeñar eficazmente las tareas de tratamiento de aguas residuales. (Pedro, 2014)

Los humedales artificiales, al igual que los naturales, pueden reducir una amplia gama de contaminantes del agua tales como: sólidos en suspensión DBO, nutrientes, metales, patógenos y otros productos químicos. Esta eliminación se da por una variedad de procesos que incluyen la sedimentación, filtración, metabolismo microbiano (aeróbico y anaeróbico), absorción de la planta y respiración. La principal diferencia entre un humedal natural y un humedal artificial es que éste último permite el tratamiento de aguas residuales bajo diseños que se basan en objetos específicos de calidad del efluente.(Pedro, 2014)

El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos:

- La actividad bioquímica de los microorganismos.
- El aporte de oxígeno a través de las plantas durante el día.
- El apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de las plantas, además de funcionar como material filtrante.

Los humedales construidos se han utilizado para tratar una amplia gama de aguas residuales: (Oscar et al., 2010)

- Aguas domésticas y urbanas.
- Aguas industriales, incluyendo fabricación de papel, productos químicos y farmacéuticos, cosméticos, alimentación, refinerías y mataderos entre otros.
- Aguas de drenaje de extracciones mineras.
- Aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana.

Tratamiento de fangos de depuradoras convencionales, mediante deposición superficial en humedales de flujo subsuperficial donde se deshidratan y mineralizan.

1.9 Evaluación de alternativas y selección

El diseño hidráulico adecuado de un humedal artificial determina que tenga un buen funcionamiento. Todos los modelos de diseño que se usan actualmente asumen condiciones uniformes de flujo pistón y no existen restricciones para el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento. (Pedro, 2014)

En un humedal de flujo subsuperficial su diseño hidráulico es necesario para asegurar que las condiciones de flujo subsuperficial se mantienen en circunstancias normales durante todo el periodo de funcionamiento del sistema.

El flujo a través del humedal debe superar la resistencia por fricción del mismo sistema. Esta resistencia es impuesta por la vegetación y la capa de sedimentos en los humedales de flujo libre, y el medio, las raíces de las plantas y los sólidos acumulados en los de humedales de flujo subsuperficial. La energía necesaria para superar esta resistencia viene dada por la pérdida de carga entre la entrada y la salida del sistema. La mejor solución en lo referente a construcción, es que el fondo del humedal tenga suficiente inclinación para permitir un drenaje completo cuando sea necesario y una salida de altura variable con el nivel de agua. (Pedro, 2014)

La relación largo-ancho tiene influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema. En teoría grandes relaciones largo: ancho 10:1 o mayores asegurarían flujo pistón, pero tienen el inconveniente de que en la parte alta se desbordan debido al incremento en la resistencia al flujo causado por la acumulación de residuos de vegetación, principalmente en sistemas de flujo libre, por tanto, son aceptables relaciones 1:1 hasta aproximadamente 3:1

o 4:1. Para minimizar los cortocircuitos (interrupción del flujo) se requiere construir y conservar el fondo del humedal de manera adecuada, con el uso de múltiples celdas, y con la intercalación de zonas abiertas (sin vegetación) para la redistribución del flujo. (Pedro, 2014)

1.9 Clasificación de los humedales artificiales

Los humedales artificiales pueden ser clasificados según el tipo de macrófitas que empleen en su funcionamiento: (Oscar et al., 2010)

- Macrófitas fijas al sustrato (enraizadas).
- Macrófitas flotantes libres.

Considerando la forma de vida de estas macrófitas, los humedales artificiales pueden ser clasificados en: (Oscar et al., 2010)

- Sistemas de tratamiento basados en macrófitas de hojas flotantes: principalmente angiospermas sobre suelos anegados. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos. El Jacinto de agua (Eichhornia crassipes) y la lenteja de agua (Lemna sp.) son las especies más utilizadas para este sistema.
- Sistemas de tratamiento basados en macrófitas sumergidas: comprenden algunos helechos, numerosos musgos y carófitas y muchas angiospermas. Se encuentran en toda la zona fótica (a la cual llega la luz solar), aunque las angiospermas vasculares sólo viven hasta los 10 m de profundidad aproximadamente. Los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos.
- Sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergentes: en suelos anegados permanente o temporalmente; en general son plantas perennes, con órganos reproductores aéreos.

Los humedales basados en macrófitas enraizadas emergentes pueden ser de dos tipos, de acuerdo a la circulación del agua que se emplee: (Oscar et al., 2010)

- Humedales de flujo superficial, si el agua circula en forma superficial por entre los tallos de las macrófitas.

- Humedales de flujo subsuperficial, si el agua circula por debajo de la superficie del estrato del humedal.

1.10 Sistemas según el flujo:

Los humedales también se pueden clasificar atendiendo al tipo de flujo para lo que se hace una valoración estos tipos y se definen a continuación.

1.10.1 Humedales de Flujo Libre.

La mayoría de los humedales naturales son sistemas de flujo superficial, en los cuales el agua está expuesta a la atmosfera. En dicho sistema el nivel del agua está por encima de la superficie del terreno; la vegetación está sembrada y emerge sobre la superficie del agua; esto lo hace atractivo para los mosquitos y otros vectores similares. (Diego and Jairo, 2009) El flujo de agua en un humedal de flujo libre es descrito por la ecuación de Manning, que define el flujo en canales abiertos. La velocidad de flujo en el humedal, depende de la profundidad del agua, de la pendiente de la superficie del agua y de la densidad de la vegetación. Otras aplicaciones de la ecuación de Manning para canales abiertos suponen que la resistencia por fricción solamente ocurre en el fondo y en las paredes del canal. En los humedales artificiales de flujo libre la resistencia está distribuida sobre la totalidad de la columna de agua, ya que las plantas emergentes y los restos de vegetación están presentes en todo el espacio (figura1). (Pedro, 2014)

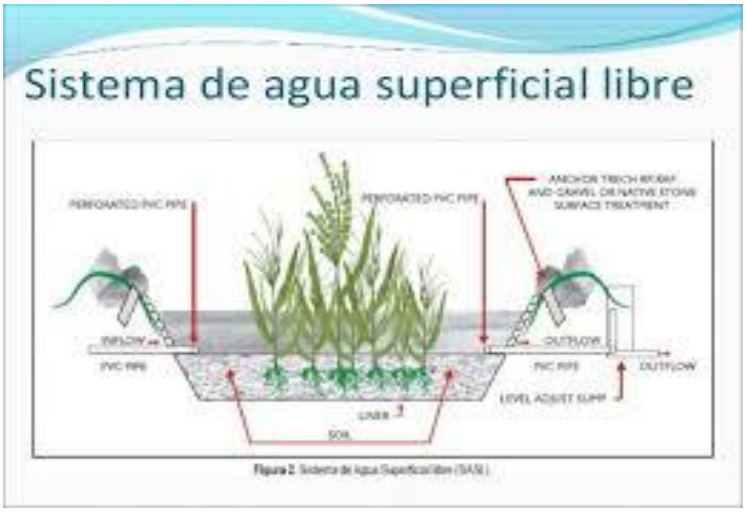


Figura 1: Humedal Artificial de Flujo Libre.

1.10.2 Humedales de flujo superficial:

Los sistemas de flujo superficial (conocidos en inglés como *surface flow constructed wetlands* o *free water surface constructed wetlands*) son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera (Oscar et al., 2010, Yasmany, 2013). Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, tienen menor profundidad (no más de 0,6 m) y tienen plantas (figura 2).

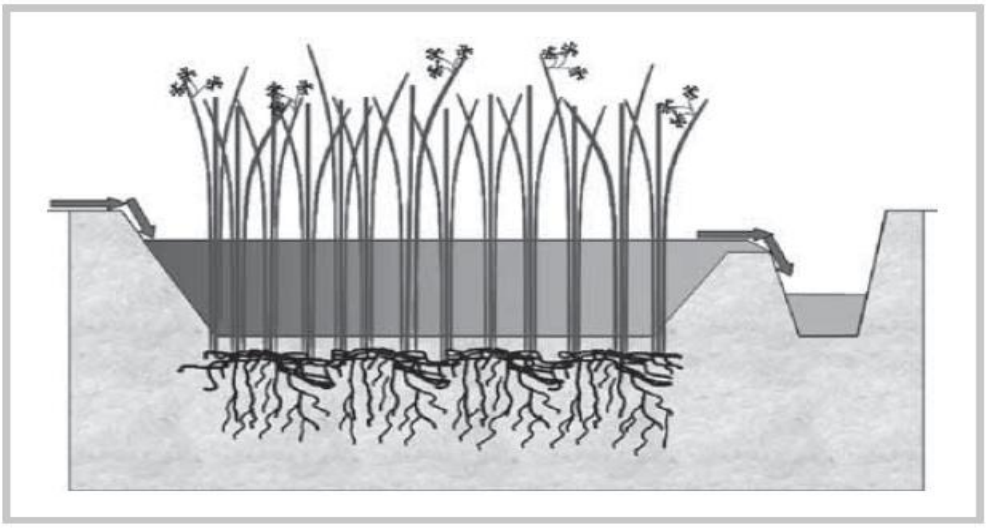


Figura 2: Humedal artificial de flujo superficial. (Oscar et al., 2010, Yasmany, 2013)

Estos humedales proporcionan una amplia gama de ventajas pero a su vez también tiene desventajas como todas las propuestas de los sistemas de tratamiento de agua residual las que se enumeran a continuación.

1.10.3 Ventajas y desventajas del humedal de flujo superficial

Ventajas: (Carlos, 2014)

- Proporcionan la incorporación de hábitat de vida silvestre y oportunidades para la recreación pública.
- La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención.

Desventajas: (Carlos, 2014)

- Las necesidades de terreno de estos humedales pueden ser grandes, especialmente si se requiere la remoción de nitrógeno.
- El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos, permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
- En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO y de las reacciones biológicas responsables por la nitrificación y desnitrificación.
- La mayoría del agua contenida en los humedales de flujo superficial es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco.
- Los mosquitos y otros insectos vectores de enfermedades pueden convertirse en un problema de salubridad.

1.10.4 Humedales de flujo subsuperficial

Los sistemas de flujo subsuperficial (conocidos en inglés como *subsurface flow constructed wetlands*), la circulación del agua en los mismos se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0,6 m. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas(Oscar et al., 2010).

Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos: (a) en función de la forma de aplicación de agua al sistema: humedales de flujo subsuperficial horizontal y (b) humedales de flujo subsuperficial vertical. (Oscar et al., 2010)

1.10.5 Humedal subsuperficial de flujo vertical

Los sistemas subsuperficiales de flujo vertical son cargado intermitentemente, por lo que las condiciones de saturación con agua en la cama matriz son seguida por períodos de instauración, estimulando el suministro de oxígeno También conocidos como filtros intermitentes, este tipo de humedales reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación de agua. Las aguas se filtran verticalmente a través de un sustrato inerte (arenas, gravas) y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal. La aplicación de agua se efectúa de forma intermitente,

para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias. La vegetación emergente se planta también en este medio granular (figura 3). (Oscar et al., 2010, Yasmany, 2013)

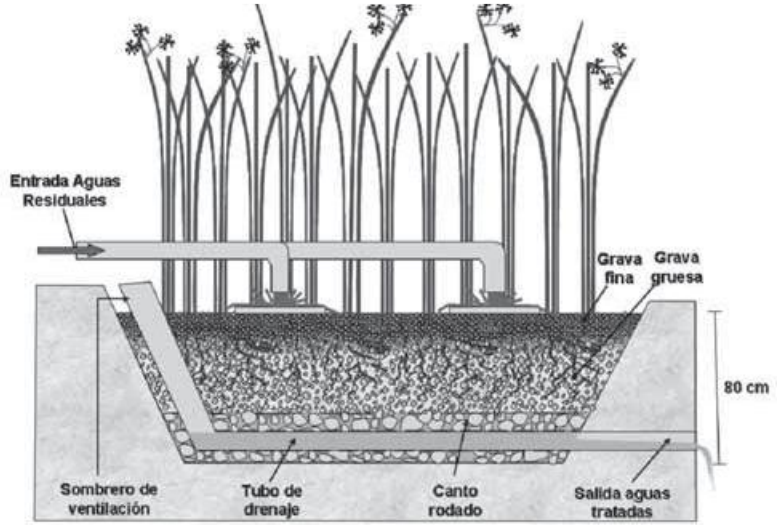


Figura 3: Humedal subsuperficial de flujo vertical. (Oscar et al., 2010)

1.10.6 Humedal subsuperficial de flujo horizontal

Los sistemas subsuperficiales de flujo horizontales por lo general consisten en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas. Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar las filtraciones en el suelo. El agua ingresa en forma permanente. Es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través del medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho varía entre 0,45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0,5 % a 1 %(figura 4). (Oscar et al., 2010)

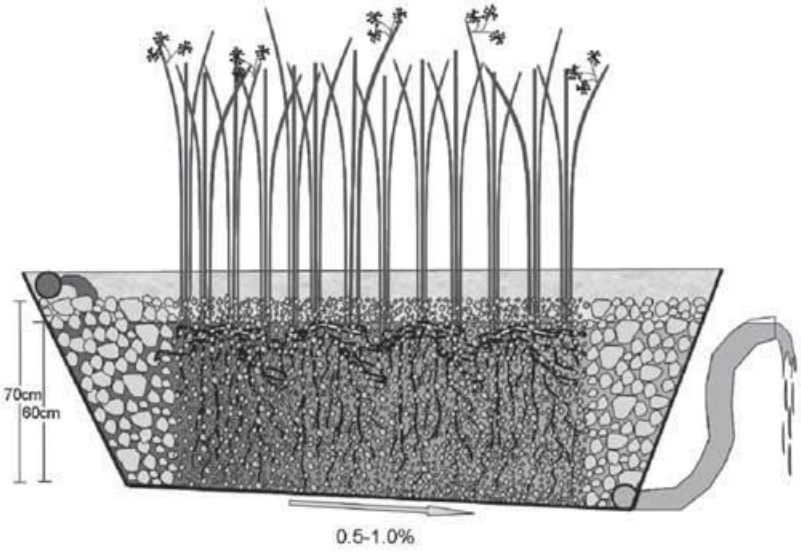


Figura 4: Humedal subsuperficial de flujo horizontal. (Oscar et al., 2010)

Los humedales subsuperficiales se ha probado que disminuyes la carga contaminante de salida de las plantas primarias hasta un 40% además de aportar amplios beneficios a la hora de entregar las aguas al medio.

1.10.7 Ventajas y desventajas de los humedales subsuperficial

Los humedales subsuperficiales cuentan con ventajas y desventajas en relación con los humedales de tratamiento superficial las que se mencionan a continuación. (Carlos, 2014)

Ventajas

- La configuración de los humedales de flujo subsuperficial proporciona una mayor protección térmica que los humedales de flujo superficial.
- La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención.
- Los mosquitos y otros insectos vectores no son un problema, mientras el sistema se opere adecuadamente y se mantenga el nivel de flujo subsuperficial. También se elimina el riesgo de que niños y mascotas estén expuestos al agua residual parcialmente tratada.

Desventajas

- El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos, permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
- La mayoría del agua contenida en los humedales de flujo subsuperficial es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco.
- Costos de construcción altos asociados al medio poroso requerido.

Para la confección y fabricación de un humedal subsuperficial de flujo horizontal se necesitan realizar algunos cálculos referidos al agua residual que se vierte al medio, las que serán realizadas en el segundo capítulo de este trabajo.

1.11 Componentes del humedal

Los humedales construidos consisten básicamente en el diseño de una cubeta que contiene agua residual, substrato y plantas emergentes. Otros componentes importantes de los humedales, como las comunidades de microbios y los invertebrados acuáticos, se desarrollan naturalmente. (Pedro, 2014, Camilo, 2014).

1.11.1 El agua

Es probable que se formen humedales en donde se acumule una pequeña capa de agua sobre la superficie del terreno y donde exista una capa del substrato relativamente impermeable que prevenga la filtración del agua en el mismo. Estas condiciones pueden crearse para construir un humedal casi en cualquier parte modificando la superficie del terreno para que pueda recolectar agua y sellando la cubeta para retenerla.

La hidrología es el factor de diseño más importante porque reúne todas las funciones del humedal y porque es a menudo el factor primario en su éxito o fracaso. Mientras la hidrología de un humedal construido no es muy diferente al de las aguas superficiales, si difiere en aspectos importantes, tales como: (Camilo, 2014, Oscar et al., 2010)

- Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento.
- Debido al área superficial del agua y a su poca profundidad, éste sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración (la pérdida combinada de agua por evaporación de la superficie del agua y pérdida a través de la transpiración de las plantas respectivamente).
- La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, primero, obstruyendo caminos de flujo siendo sinuoso el movimiento del agua a través de la red de tallos, hojas, raíces, y rizomas y, segundo, bloqueando la exposición al viento y al sol.

1.11.2 Substratos, sedimentos y restos de vegetación

Los substratos en los humedales construidos incluyen suelo, arena, grava, roca, y materiales orgánicos como la composta. Parte del substrato se forma con los sedimentos y restos de vegetación, los cuales se acumulan en el humedal debido a la baja velocidad del agua y a la alta productividad típica de estos sistemas. Los elementos antes mencionados son importantes por varias razones: (Pedro, 2014, Camilo, 2014, Oscar et al., 2010)

- Soportan a muchos de los organismos vivientes.
- La permeabilidad del substrato afecta el movimiento del agua a través del suelo que lo forma.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del substrato.
- El substrato proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal, que da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos, y es una fuente de carbono, que a su vez es la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas del sistema.

Las características físicas y químicas de los substratos del suelo se alteran cuando estos se inundan. En un substrato saturado, el agua reemplaza los gases atmosféricos por los poros contenidos y el metabolismo microbiano

consume el oxígeno disponible; aunque se disuelve oxígeno de la atmosfera, puede darse lugar a la formación de un substrato anóxico, lo cual será importante para la remoción de contaminantes como el nitrógeno y metales.

1.11.3 Vegetación

El mayor beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (los tallos, raíces, y rizomas) permite la penetración a la tierra o medio de apoyo y transporta el oxígeno de manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la difusión. Lo más importante en los humedales de sistema de flujo libre es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos se degradan y se convierten en restos de vegetación, que sirven como substrato para el crecimiento de la película microbiana fija, responsable del tratamiento que ocurre. Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escorrentía de varias maneras. (Pedro, 2014, Camilo, 2014, Oscar et al., 2010)

- Estabilizan el substrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono, nutrientes, y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del substrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.
- Cuando se mueren y se deterioran dan lugar a restos de vegetación.

Una característica fundamental de los humedales es que sus funciones son principalmente reguladas por los microorganismos y su metabolismo. Los microorganismos incluyen bacterias, levaduras, hongos, y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes. (Jenny and Martha, 2013, Oscar et al., 2010)

1.11.4 La actividad microbiana:

- Transforma un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles.
- Altera las condiciones de las reacciones de reducción-oxidación, del substrato y así afecta la capacidad de proceso del humedal.
- Está involucrada en el reciclaje de nutrientes.

Algunas transformaciones microbianas son aerobias (es decir, requieren oxígeno libre) mientras otras son anaerobias (tienen lugar en ausencia de oxígeno libre). Muchas especies bacterianas son facultativas, es decir, son capaces de funcionar bajo condiciones aerobias y anaerobias en respuesta a los cambios en las condiciones medioambientales.

Las poblaciones microbianas se ajustan a los cambios en el agua que les llega y se pueden extender rápidamente cuando se tiene la suficiente energía. Cuando las condiciones medioambientales no son convenientes, muchos microorganismos se inactivan y pueden permanecer inactivos durante años.

La comunidad microbiana de un humedal construido puede ser afectada por sustancias tóxicas, como pesticidas y metales pesados, y debe tenerse cuidado para prevenir que tales sustancias se introduzcan en las cadenas tróficas en concentraciones perjudiciales. (Jenny and Martha, 2013, Oscar et al., 2010)

1.11.5 Animales

Los humedales construidos proveen un hábitat para una rica diversidad de invertebrados y vertebrados.

Los invertebrados, como insectos y gusanos, contribuyen al proceso de tratamiento fragmentando el detritus (materia muerta proveniente de vegetales y animales) consumiendo materia orgánica. Las larvas de muchos insectos son acuáticas y consumen cantidades significativas de materia orgánica durante sus fases larvales. Los invertebrados también tienen varios papeles ecológicos; por ejemplo, las ninfas de la libélula son rapaces importantes de larvas de mosquito.

Aunque los invertebrados son los más importantes en cuanto a la mejora de la calidad del agua, los humedales construidos también atraen a una gran variedad de anfibios, tortugas, aves, y mamíferos. (Jenny and Martha, 2013)

1.12 Recomendaciones para el diseño de un humedal

A la hora de utilizar los humedales para el tratamiento de las aguas residuales se debe tener en cuenta los siguientes requisitos: (Elisabeth, 2010)

- Disponibilidad de suficiente espacio, porque es un "sistema de baja velocidad" con un mayor requerimiento de espacio como los sistemas convencionales.
- La vida útil esperada de un Humedal Artificial bien mantenido es de 20 a 30 años, para la urbanización y el desarrollo de la población considerada.
- Es preferible tener condiciones totales de luz solar, pero lo que no debe ocurrir es que el humedal este completamente en la sombra, especialmente para los Humedales subsuperficiales, pues es importante que la superficie se pueda secar.(Jenny and Martha, 2013)
- Las plantas deben estar adaptadas para las condiciones de crecer parcialmente sumergidas, en climas especiales, con luz del sol o sombra
- Las aguas residuales en tratamientos biológicos no deberían ser tóxicas, sin embargo, los Humedal Artificial por su alto tiempo de retención son más resistentes a los eventos tóxicos que los sistemas convencionales.
- Para el mantenimiento se requiere un personal mínimo capacitado o usuarios comprometidos en llevar a cabo las tareas básicas de esta labor.
- Hacer el lecho del filtro impermeable es posible al revestirlo con plástico, arcilla o cemento.
- El sustrato utilizado generalmente es arena gruesa, con una conductividad hidráulica (kh) alrededor de 10^{-4} a 10^{-3} m/s, no debe contener arcilla, limo u otros tipos de material fino, ni debe consistir de material con bordes filosos.
- La suficiencia de la conductividad hidráulica del material filtrante tiene que ser probada con la aplicación de la ley de Darcy u otro método adecuado de cálculo.
- La capa de arena para el filtro necesita un espesor de 40 a 80 cm
- Siempre es recomendado un borde libre de por lo menos unos 15 cm para la acumulación de agua.
- El diseño de entrada del agua residual tiene que garantizar una distribución uniforme de tal manera que se aprovecha todo el área del humedal,

- La superficie debe ser plana y sin pendiente, de tal manera que evita la acumulación del agua en un punto o la falta de esta en otro punto.
- El diseño básico debe tener en consideración los sólidos totales en suspensión y la carga orgánica (DBO_5 o DQO) del fluido.
- Las plantas tienen un papel importante en los filtros, éstas tienen que estar adaptadas a las condiciones climáticas del lugar, sin embargo el proceso de purificación es principalmente una combinación de la degradación microbiana y los procesos químicos.
- Los Humedales Artificiales de flujo vertical consideran que la nitrificación tiene que ser diseñada con el consumo de oxígeno y la aireación del suelo
- Los Humedales Artificiales de flujo horizontal consideran que la desnitrificación tiene que ser diseñada con la disponibilidad de una fuente de carbono.

Conclusiones del capítulo

- Mediante la revisión bibliográfica se definieron los tipos de PTAR útiles para el manejo de las aguas residuales
- La población que vierte agua al medio está definida por una cantidad de 809 habitantes y una fábrica de confecciones textiles, la que cuenta con una planta de tratamientos primarios muy deteriorada por la falta de inversión económica y el tiempo de explotación.
- Se seleccionó un humedal subsuperficial de flujo horizontal para realizar el tratamiento secundario y disminuir la carga contaminante de las aguas que provienen de la planta de tratamiento primario.

Capitulo II Procedimiento de cálculo para establecer un humedal.

2.1 Selección del humedal

La selección del humedal artificial como sistema para el tratamiento de las aguas residuales se realizó teniendo en cuenta los beneficios que aportan los humedales en el tratamiento secundario de las Aguas Residuales, además con base a las ventajas y desventajas de cada sistema descritas anteriormente y tomando en cuenta los requerimientos y características del sitio, el cual cuenta con un área alargada y estrecha que da continuidad a la cañada o zanja de deposición de las aguas, además esta zona tiene un terreno bajo e inclinado con una pendiente del 3 % de desnivel que en su parte superior con respecto al terreno elevado es de 1.20 cm y en la parte baja es de aproximadamente 40 cm lo que ayuda a evitar el movimiento de tierra a la hora de establecer el humedal. Mediante la investigación bibliográfica se fundamentó el uso de un humedal subsuperficial de flujo horizontal por las ventajas económicas que muestran ya que no se necesitan direccional las aguas al mismo mediante tuberías u otro tipo de accesorios.

A continuación se mencionarán algunas de las ventajas que dieron consigo que se eligiera un humedal subsuperficial de flujo horizontal los cuales son:

- Soportan un gran grado de contaminantes, lo que supone que estos sistemas son, en mayor o menor medida, eficientes en el tratamiento.
- Tienen bajos costos de operación y bajo consumo de materiales, lo cual supone gastos bajos durante todo el período de funcionamiento del sistema
- Es un sistema natural de tratamiento que no requiere de ningún tipo de sustancia química para la eliminación de los contaminantes ya que se basan únicamente en los procesos que se dan por la interacción del agua residual con las plantas y el sustrato. Sin embargo, al ser sistema natural, puede presentar variaciones en su rendimiento debido a los cambios estacionales.
- El flujo en este tipo de humedales se mantiene en un nivel inferior a la superficie (5-10 cm) lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento.
- La zona de plantación está constituida por grava fina de un solo diámetro, en entre 30-32 mm**.**

2.2 Diseño de humedales

El diseño hidráulico de un humedal es de suma importancia para obtener buenos rendimientos en la eficiencia de la depuración. En los modelos de diseño que se usan en la actualidad asume un flujo en condiciones uniformes y del tipo pistón. (Oscar et al., 2010)

Para llegar a poder intentar acercarse al modelo ideal (flujo pistón) es muy importante realizar un minucioso diseño hidráulico y los métodos constructivos adecuados. (Oscar et al., 2010)

El flujo del agua en el interior del humedal debe romper las resistencias creadas por la vegetación, capa de sedimentos, raíces y sólidos acumulados en los humedales. (Oscar et al., 2010)

La energía para romper esta resistencia está dada por la pérdida de carga entre el ingreso y salida del humedal, para dar esta energía se le asigna al fondo del humedal una pendiente con una salida de altura variable. (Oscar et al., 2010)

Para el diseño de humedales se deben considerar los siguientes criterios: (Oscar et al., 2010):

- Se consideran reactores biológicos.
- Se considera que el flujo a través del medio poroso es flujo pistón y en forma uniforme.
- La ley de Darcy describe el flujo a través del medio poroso. (Javier, 2014)

Existen dos tipos de humedales de flujo subsuperficial los cuales son:

- Humedal subsuperficial de flujo horizontal.
- Humedal subsuperficial de flujo vertical.

Para el diseño de humedales subsuperficiales de flujo horizontales los pasos a seguirse son:

- Cálculo del área necesaria.
- Profundidad del humedal.
- Pendiente.
- Sustrato.
- Relación largo – ancho

- Tiempo de Retención Hidráulico
- Vegetación

2.3 Cálculo del área superficial

El cálculo del área superficial se realiza en función al parámetro contaminante que se desea disminuir o remover, los diseños se realizan para disminución de la DBO5. (Yasmany, 2013)

El área superficial se calcula a través de la ecuación 1:

$$\mathrm{As} = \frac{\mathrm{Q}(\ln(DBO_5)\,\mathrm{e} - \ln(DBO_5)\,s)}{\mathrm{Kt(y)(n)}} \qquad \text{Ec.1}$$

Donde:

As: Área Superficial (m^2)

Q: Caudal (m^3/d)

Ln(DBO_5)e: Concentración del contaminante al ingreso (mg/l)

Ln(DBO_5)s: Concentración del contaminante a la salida (mg/l)

Kt: Constante de temperatura (d^{-1})

y: Profundidad del humedal (m)

n: Porosidad promedio de las capas filtrantes del humedal.

2.3.1 Calculo de la KT

El cálculo del KT se realiza por la formula

$$Kt = 1.104\ d^{-1} * 1.06^{T-20} \qquad \text{Ec. 2}$$

Donde:

Kt: Temperatura calculado según formula a una temperatura del agua promedio de 20^0c. (d^{-1})

T: Temperatura (^{0}c)

2.3.2 Porosidad

Tabla 1: Características de materiales granulares

Tipo de material	Tamaño efectivo D10 (mm)	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, Ks ($m^3/m^2/d$)
Arena gruesa	2	28-32	100-1000
Arena gravosa	8	30-35	500-5000
Grava fina	16	35-38	1000-10000
Grava media	32	36-40	1000-50000
Roca Gruesa	128	38-45	50000-250000

Los valores de porosidad(n) para estos tipos de suelo y grava están publicados en muchas referencias, pero pueden ser mucho menores que los de la Tabla1 ya que pueden estar dados para depósitos naturales de suelo y grava que han pasado por un proceso de consolidación natural y, por tanto, esos valores no son los apropiados para el diseño de un humedal de flujo subsuperficial.

2.4 Determinación del Caudal (Q)

El caudal corresponde a una cantidad de agua que pasa por un lugar (canal, tubería, entre otros) en una cierta cantidad de tiempo, o sea, corresponde a un volumen de agua (Litros, Metros Cúbicos, etc.), por unidad de tiempo (Segundos, Minutos. Horas, etc.).

Es la cuantificación del caudal de agua que pasa por la sección transversal de un conducto (río, riachuelo, canal, tubería) de agua; también se le conoce como aforo caudal de agua . Para cuantificar el caudal de agua se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$Q = A \times V \qquad \text{Ec.3}$$

Donde:

Q = Caudal o Gasto (m^3/d)

A = Área de la sección transversal (m^2)

V = Velocidad media del agua en la sección hidráulica (m/d)

2.4.1 Métodos para medición de caudales:

Entre los métodos más utilizados para medir caudales de agua corriendo libremente se encuentran los siguientes. (Luis, 2012)

- Método del flotador
- Método del correntómetro
- Método volumétrico
- Método de la trayectoria

Para este estudio se utilizó el método del flotador el cual se describe a continuación.

2.4.2 Método del Flotador

Este método se utiliza cuando no se dispone de equipos de medición; para medir la velocidad del agua, se usa un flotador con él se mide la velocidad superficial del agua; pudiendo utilizarse como flotador, un flotante de tanque sanitario e inodoro lastrado con un tubo pvc.

Se puede aplicar el método del flotador cuando:

- Cuando no se cuente con un correntómetro o equipos de aforo.
- En periodo de máximas avenidas o crecidas de los ríos y peligra el equipo de correntómetro.
- Cuando existe peligro para ingresar al agua el Observador hidrológico
- Cuando los niveles de agua son muy bajos y no permite medir con el correntómetro.
- Cuando existen algas o sedimentos que impide que se haga mediciones con el correntómetro.
- Cuando se desea conocer el caudal de la corriente en forma aproximada sin tener que recurrir a la construcción de una estación hidrométrica costosa.

2.4.3 Materiales que se utilizan para realizar el aforo por flotadores son:

- botellas, latas, troncos, varillas con un lastre, entre otros objetos, es decir cualquier objeto que pueda flotar.
- cronómetro;
- cinta métrica

- Formato del Método por flotadores
- Calculadora

La característica que debe cumplir un flotador son:

- El flotador puede ser trozos de ramas, pequeños troncos, botellas, latas de leche, etc.
- En caso de utilizar botellas como flotadores éstos serán tapados herméticamente y parcialmente llenas de agua (¾ partes de la botella).
- Es importante que el flotador quede sumergido una gran parte de ellos y emergente lo necesario, esto permitirá que el flotador no sea influenciado por el viento y cambie de dirección fácilmente, lo que implicaría velocidades inexactas.
- Los flotadores deben ser similares en forma y peso.
- A cada flotador se le debe colocar un distintivo de color a fin de que sean observados durante su trayectoria.

2.4.4 Procedimiento del método

a) Materiales que se llevará al campo:

- • Calculadora, formato de control de descarga-método de flotadores
- • Cronómetro, wincha y flotadores siendo como mínimo 9.

Las ventajas y desventajas del método

Ventajas

- Miden directamente la velocidad superficial.
- No les afecta los acarreos de material.
- Su costo es pequeño o nulo.

Desventajas

- Imprecisión, debido a que miden la velocidad superficial
- Imposibilidad de controlar su trayectoria, sobre todo en ríos amazónicos.
- Dificultad de utilizarlos cerca de las márgenes.

2.4.5 Cálculo del tiempo promedio en segundos (tp)

- Para el cálculo del tiempo que demoran los flotadores de llegar de A hasta B, se requiere del cronómetro, calculadora y formato.

- Se deben lanzar como mínimo 3 flotadores hacia la margen derecha, 3 en el centro y 3 en la margen izquierda de la sección del río. El número de flotadores que se utilice para el aforo se realice en un tiempo tal que no se produzcan variaciones superiores a 1 cm entre el nivel de agua al inicio y al final del aforo.
- Se lanzará cada uno de los flotadores (f), antes de pasar por el punto A con la finalidad de que cada flotador alcance una velocidad constante y se estabilice su trayectoria.

La medición se realiza en el centro del cauce, donde se realizaron 5 mediciones se tomó como valor lineal 5 metros y se tomó el tiempo para aplicar la fórmula de cálculo de velocidad. (Iris, 2011)

$$V = S/t \qquad \text{Ec. 4}$$

Donde:

V: velocidad (m/d)

t: Tiempo de recorrido del flotador (d)

S: Desplazamiento en el flotador (m)

Tabla 2: Velocidades y tiempos a la salida de la planta de tratamiento

Semana	Velocidad (m/d)	Velocidad promedio (m/d)	Tiempo (d)	Tiempo Promedio (d)
1	261.50121	261.4698	0.01912	0.019122685
	261.02719		0.019155	
	261.81818		0.019097	
	261.50121		0.01912	
	261.50121		0.01912	
2	261.50121	261.3119	0.01912	0.019134259
	261.02719		0.019155	

	261.65960		0.019109	
	260.71213		0.019178	
	261.65960		0.019109	
3	261.81818		0.019097	
	261.65960		0.019109	
	261.65960	261.7865	0.019109	0.019099537
	261.97696		0.019086	
	261.81818		0.019097	
4	260.86957		0.019167	
	261.50121		0.01912	
	261.65960	261.3749	0.019109	0.01912963
	261.34301		0.019132	
	261.50121		0.01912	

2.4.6 Calculo del Área

El área se calculó por el método de las secciones donde se aplicó la siguiente formula:

Fórmula del Área(A):

$$A = hp * a \qquad \text{Ec. 5}$$

Donde:

A: Área de la sección, expresada en metros cuadrados (m^2).

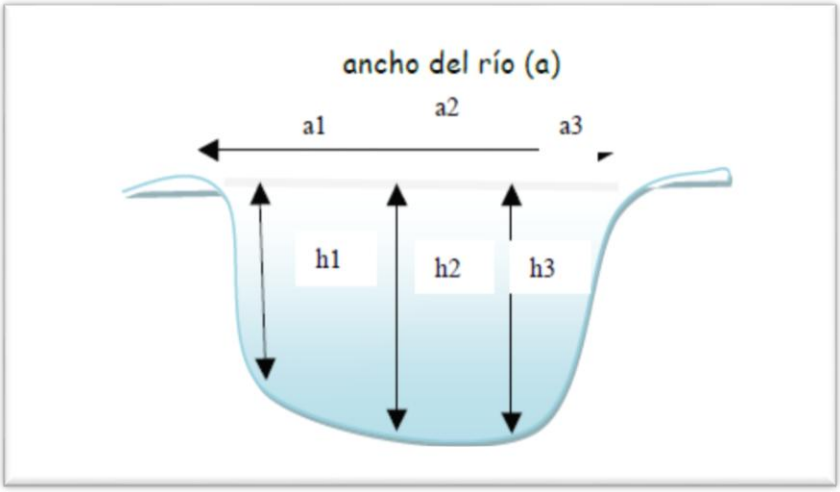
hp: profundidad promedio (m).

a: ancho del río, expresado en metros (m), se requiere medir el ancho del río y calcular la profundidad promedio del río (se mide con una cinta métrica).

Cálculo de la profundidad media (hp):

Dividir como mínimo el río en 6 partes, sondear el ancho del río para medir las diferentes profundidades y se obtiene el promedio. El observador puede medir las profundidades desde el carro huaro, puente o vadeando el río (periodo de estiaje) y las profundidades puede medirlo por medio de una regla, madera o soga con lastre. (Iris, 2011)

Figura 5: Ancho del rio (Iris, 2011).



El ancho del rio, en nuestro caso la cañada es de 120 cm, por lo que se divide en 6 secciones las cual cada sección mide 20 cm estas mediciones fueron tomadas por el área mojada de la cañada por que no siempre está así, depende de la época del año en que este.

Tabla 3: Medición del área mojada de la cañada

Secciones	Base (cm)	Profundidad(cm)	Altura(cm)	Área(cm)	Área(m)
1	20	0	2.5	25	0.25
2	20	2.5	2.6	51	0.51
3	20	2.6	2.65	52.5	0.53
4	20	2.65	2.638	52.88	0.53
5	20	2.638	2.2	48.38	0.48
6	20	2.2	0	22	0.22
∑				251.76	2.52

2.4.7 Calculo del Caudal

Para el cálculo del caudal se utiliza la siguiente fórmula. (Iris, 2011)

$$Q = C * A * V \qquad \text{Ec. 6}$$

$$V = S/t \qquad \text{Ec. 7}$$

Donde:

C: Factor de corrección

V: Velocidad (m/d)

S: Espacio recorrido por el flotador (m)

t: Tiempo de recorrido del espacio «e» por el flotador (d)

A: Área de la sección transversal (m^2)

Q: Caudal (m/d)

Los valores de caudal obtenidos por medio de este método son aproximados, por lo tanto requieren ser reajustados por medio de factores empíricos de corrección (C), que para algunos tipos de canal o lechos de río y tipos de material, a continuación se indican en la tabla 4. (UCPSI, 2005)

Tabla: 4 Factor de corrección para uso del flotador

Tipos de Arroyo	**Factor de Corrección(C)**	**Precisión De Velocidad**
Canal rectangular Con lados y lechos lisos	0.85	Buena
Río profundo y lento	0.75	Razonable
Arroyo pequeño de lecho Parejo y liso	0.65	Mala
Arroyo rápido y turbulento	0.45	Muy mala
Arroyo muy poco profundo De lecho rocoso	0.25	Muy mala.

Se recomienda utilizar el método del flotador, para aforos de caudales no menores de 0.250 m^3/s ni mayores de 0.900 m^3/s(UCPSI, 2005).

Después de aplicar la ecuación 3 se pudo confeccionar los datos de la tabla: 5, la que se realizó utilizando el software Excel del paquete de Microsoft Office.

Tabla 5: Tabulación y cálculo del caudal (Q) promedio al día.

Semana	Mediciones	Caudal promedio mensual (m^3/d)
1	5	658.9039
2	5	658.5061
3	5	659.70199
4	5	658.6648
Caudal promedio mensual		658.944

El caudal promedio diario fue de Q= 658.944 m^3/d

Los datos del cálculo de DBO_5 fueron aportados por la institución, la DBO_5 del Agua Residual de entrada es 350 mg/l y asumiendo que con el tratamiento se disminuirá en casi un 45 % del valor de entrada de la demanda biológica de oxigeno la DBO_5 del Agua Residual disminuida según cálculo teórico de salida será aproximada a 157.5 mg/l.

2.5 Pendiente y Profundidad

Los límites de pendientes de fondo establecido por la bibliografía se encuentran entre 0.1% y 1% pero para este trabajo se toma 3% debido a una zanja existente para minimizar el esfuerzo.

La profundidad máxima necesaria para permitir el correcto enraizamiento de las plantas según la bibliografía consultada es de 0.6 m.

2.6 Sustrato

Es el medio donde crecen las plantas, los microorganismos y se realizan los

principales procesos de depuración. Por lo que se diseñó con un espesor de 20 cm de grava, 25 cm de arena y 15 cm tierra (arcilla).

2.7 Ancho del humedal

$$\mathrm{W} = \frac{1}{\mathrm{y}} * \left(\frac{(Q)(As)}{(\mathrm{m})(\mathrm{Ks})}\right)^{0.5} \qquad \text{Ec. 8}$$

Donde:

W: Ancho del Humedal (m)

Q: Caudal / N^0 de Unidades (m^3/d)

As: Área Superficial / N de Unidades (m^2)

y: Profundidad del humedal (m)

m: Pendiente del Lecho

Ks: Conductividad Hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección del flujo en (m^3/m^2/día)

2.8 Largo del humedal

$$L = \frac{As}{W} \qquad \text{Ec. 9}$$

Donde:

L: Largo del Humedal (m)

As: Área superficial / N^0 de unidades (m^2)

W: Ancho del humedal (m)

2.9 Tiempo de retención Hidráulica

$$TRH = \frac{(As)(y)(n)}{Q} \qquad \text{Ec. 10}$$

Donde:

TRH: Tiempo de Retención Hidráulico (d)

As: Área superficial (m^2)

Q: Caudal (m^3/d)

y: Profundidad del humedal (m)

n: Porosidad promedio de las capas filtrantes del humedal

2.10 Vegetación

Tipos de vegetación

Las plantas que se encuentran en la mayoría de los humedales que se utilizan para tratar las aguas residuales son las espadañas, carrizos, juncos y juncos de laguna. Dentro de las especies más utilizadas en la depuración de aguas residuales se encuentran:

Tabla 6: Plantas más utilizadas en la depuración de aguas a residuales

Familias	Nombre latino	Nombre comunes más usados

Ciperáceas	Carex sp.	
	Eleocharis sp.	
	Scirpus lacustris L.	Junco de Laguna
Gramíneas	Glyceria fluitans (L.) R. Br.	Hierba del maná
	Phragmites australis (Cav) Trin. ex Steude	Carrizo
	Echinochloa polystachia Hitch	Pata de gallina
Iridáceas	Iris pseudacorus L.	Lirio amarillo espadaña fina
Juncáceas	Juncos sp.	Juncos
Tifáceas	Microorganismos Thypha sp.	Eneas, aneas, espadañas

La vegetación seleccionada estuvo relacionada según las plantas más comunes de la zona y será Estolones de *Echinochloa polystachia* Hitch (Pata de gallina) las cuales serán sembradas en hileras de 10 cm x 20 cm.

Conclusiones del capítulo:

- Se establecieron las ecuaciones necesarias para los cálculos del humedal como: Área superficial, Ancho, Largo, Gasto diario de entrada al humedal, Tiempo de Retención Hidráulica.
- Se realizaron mediciones referidas al cálculo del caudal, utilizando para ello el método conocido como el flotador.
- Se recomendó una vegetación acorde a las propias del terreno utilizando las familias de las gramíneas por su alto grado de absorción de metales.

Capítulo III Discusión de los Resultados

En este capítulo se realizarán los cálculos y se establecerán las medidas necesarias para el humedal así mismo se llegaran a las conclusiones del buen manejo y explotación del humedal.

3.1 Cálculo del caudal diario

Los cálculos del caudal se realizan según la ecuación 6 y 7 promediando un caudal diario de 658.94 m^3/d y utilizando el factor de corrección 0.65 para tipos de arroyos pequeño de lecho parejo y liso con una precisión de velocidad mala nos quedaría 428.311 m^3/d.

$$Q = 0.65 * 658.94$$

Q = 428.311 m^3/d

3.2 Cálculo del Área superficial

El cálculo del Área superficial se realizara utilizando la ecuación 1.

La DBO_5 del Agua Residual de entrada es 350 mg/l y la DBO_5 del Agua Residual de salida es 157.5 mg/l porque se asume que disminuye en casi un 45 % del valor de entrada de la demanda biológica.

La KT se calcula mediante la ecuación 2 y tomando el agua a una temperatura del agua promedio de 20^0 tenemos que la KT=1.104 d^{-1}.

La profundidad que se toma para realizar el cálculo es de 0.6 m debido a la característica propia del terreno.

Se propone el empleo de un coeficiente de porosidad tomado de la tabla 1 el cual se encuentra entre los valores de tamaño efectivo de 8-16 con valores de porosidad de 30-38%, seleccionando el valor de 35%.

$$\text{As} = \frac{428.311(\ln(350) - \ln(157.5))}{1.104 * 0.6 * 0.35}$$

As= 1475.20 m^2

El valor del área superficial 1475.20 m^2.

Para el cumplimiento de esta área superficial se decide dividir en 10 zanjas. Estableciendo un largo acomodado a las características del lugar.

3.3 Cálculo del Ancho del humedal

El cálculo del Ancho del humedal se realizara utilizando la ecuación 8.

La conductividad hidráulica (Ks) que para este caso de estudio se empleara es de 9750.4 ($m^3/m^2/d$).

La pendiente del lecho es de 3 % debido a una zanja existente para minimizar los esfuerzos.

$$W = \frac{1}{0.6} * (\frac{428.311 * 1475.197}{0.03 * 9750.4})^{0.5}$$

W= 77.46 m

Este ancho se dividirá entre 10 para ajustarnos a las condiciones del terreno siendo 7.7 m aproximados.

3.4 Cálculo del Largo del humedal

El Cálculo del Humedal se realiza utilizando la ecuación 9, con un Área superficial del humedal calculado anteriormente es de 1475.197 m^2y el Ancho calculado es de 77.46 m.

$$L = \frac{1475.197}{77.46}$$

Por lo que nos brinda un largo de L= 19.05 m. Este largo se dividirá por la explicación anterior también entre 10, ajustándose a un valor de 2 m de largo.

La separación de los humedales entre si será de 30cm y a la salida del humedal se colocara también una tubería para evitar la erosión del humedal la cual depondrá las aguas finales tratadas a una distancia aproximada de 5 m.

En las figuras 6 a continuación se muestra la forma que quedará concebido el humedal.

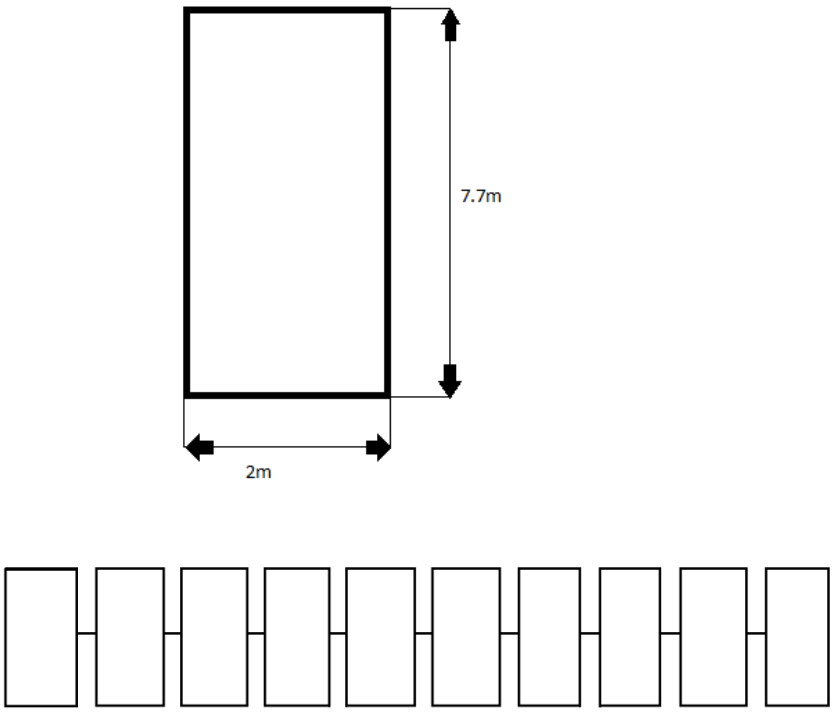


Figura 6: Dimensionamiento del humedal (fuente propia)

3.5 Tiempo de Retención Hidráulica

Ya obtenido el Área superficial y el Caudal de entrada al humedal, con una profundidad de 0.6 y un coeficiente de porosidad se calcula el Tiempo de Retención Hidráulica mediante la ecuación 10.

$$TRH = \frac{1475.197 * 0.6 * 0.35}{0.72}$$

TRH= 0.72 día

3.6 Materiales necesarios

Los materiales necesarios son para establecer una entrada correcta al humedal así como lograr un aislamiento de la zona propia de humedal tomar muestras de las aguas tratadas y las deposiciones finales. A continuación se exponen algunos de los materiales, es importante decir que los materiales son del propio territorio para disminuir los costos de fabricación.

50 kg de Estolones de *Echinochloa polystachia* Hitch (Pata de gallina)

arena azul o zeolita del territorio

arena amarilla (saneada)

desecho de cosecha seco

piedra o Gravas

10 m de Tubos plástico de 2 pulgadas

1 bolsa de cemento de cemento

Tractor con pala, para ayudar en las excavaciones

Cámara fotográfica

50 análisis de agua (una diaria para conocer los niveles de decrecimiento de los metales en el agua residual tratada)

No se calculan las jornadas laborales ya que este trabajo realiza un análisis de como realizar el humedal y se exponen algunas ideas extras para que el fabricante en este caso la empresa Textil Desembarco del Granma realice la obra y contrate a un tercero.

No siempre se deben cumplir a cabalidad con los materiales antes expuestos, ya que en muchos casos las conectividad entre los humedales se realiza de modo natural mediante la excavación de zanjas entre ellas y no media ningún tubo o canal prefabricado.

Se debe realizar un diagnóstico sobre los niveles de contaminación del agua residual de la textilera para conocer:

- Cálculo de la descarga
- Muestreo de la temperatura del agua y del aire.
- Variables a medir (DBO5, DQO, aluminio, nitrógeno total, fósforo, sólidos totales y coliformes totales)
- El diseño e implementación del Sistema de Humedal Artificial Subsuperficial:
- Se calculará a partir de El factor limitante de demanda DBO5 Área superficial
- Impermeabilización y colocación de las capas filtrantes las que se enunciaron anteriormente (de arena azul o ZEOLITA del territorio, arena amarilla (saneada), de desecho de cosecha seco, piedra o Gravas)

- Colocación de plástico a las Unidades Experimentales según Pendiente de fondo 3 % y se colocaran de la siguiente forma realizando un colchón de capas o de medios filtrantes dispuestos de la siguiente forma:

20 cm grava

25 cm arena

15 cm tierra

La siembra de las gramíneas se realizara según el tratamiento y teniendo en consideración los análisis de metales pesados que se realicen, es importante decir que la plantación de las plantas puede o no repetirse, por los procesos normales de crecimiento estas plantas se regeneran y crecen.

3.7 Operación y Mantenimiento del humedal

Aunque los humedales subsuperficiales son sistemas de fácil operación requiere un mantenimiento adecuado, los cuales serán:

- Comprobar periódicamente la cantidad de sólidos que son transferidos a los humedales.
- Controlar regularmente el color y olor del efluente del humedal para determinar la calidad y su funcionamiento.
- Comprobar los Unidades de pre-tratamiento, la entrada y salida en el sistema como pueden ser las obstrucciones y el nivel de agua.
- Comprobar periódicamente las cargas contaminantes, la concentración de contaminación en el afluente.
- Revisar la vegetación de los humedales para ver que no haya enfermedades, insectos, etc., y dar el tratamiento adecuado según sea necesario.
- Se debe hacer una observación exhaustiva a las malezas o plantas depredadoras hasta que la vegetación de los humedales estén plenamente establecida.
- Tener un control del crecimiento de las plantas en el humedal.
- Para tener una suficiente aireación del lecho, es recomendable tener la posibilidad de bajar el nivel del agua hasta la parte inferior.3.7.1

Mantenimiento

Requiere un mínimo de mantenimiento empezando por la recolección periódica de los restos vegetales como varas y hojas muertas, operación que debe practicarse cada quince días en el verano, cada semana en el otoño y una vez al mes en el invierno. De no hacerse lo anterior los sólidos en pudrición podrían contribuir al azolvamiento del mismo. Con lo que respecta a la densidad de las plantas esta será según la especie. La sobrepoblación de plantas puede llevar a que las raíces aprieten el medio y tapen los poros de las piedras.

Por lo que concierne a las tuberías de desfogue para evitar inundaciones deben limpiarse en verano cada semana y en invierno cada quince días de hojas y varas, para evitar que el humedal pudiera inundarse y derramarse.

Conclusiones:

- Se establecerá un humedal subsuperficial de flujo horizontal con un área superficial total de 1475.20 m^2 y se dividirá en 10 zanjas creando cuadrantes de 7.7 m de ancho y 2 m de largo.
- Los materiales utilizados son de fácil adquisición y bajo costo económico y el montaje de las instalaciones destinadas al tratamiento de las aguas no requiere de alta complejidad.
- Los contaminantes del Agua Residual antes de ser tratadas superaban los límites de descarga permitido al medio, afectando las aguas dulces subterráneas de manera directa, además los suelos, flora y fauna del sitio.
- Esta tecnología de tratamiento propuesta es factible ya que permite obtener los parámetros requeridos en la calidad de las aguas residuales.
- El tiempo de retención hidráulica se estimó en un valor de 0.72 día.
- Se exponen los periodos de mantenimiento para el humedal.

RECOMENDACIONES:

- Se recomienda implementar la propuesta de tratamiento de aguas residuales desarrollada en este trabajo las aguas residuales de salida de los biodigestores para minimizar el impacto medio ambiental.
- Se recomienda estudiar otras tecnologías de tratamientos de aguas residuales con el objetivo de aplicarlas en diversas instalaciones.
- Se recomienda el control y mantenimiento de las instalaciones primarias de tratamientos de aguas residuales existentes con el fin de mejorar los parámetros de las aguas residuales establecidas en las normas cubanas.

Referencias Bibliográficas

4º Informe: Metodos de Estimacion de audales [Online]. España. Available: http://google.com/medicionesdecaudal/4toinformedehidrologiahambiental.

ALEJANDRO, M. 2006. *Manual de autoconstrucción de sistemas de tratamiento de aguas residuales domiciliarias,* La Plata.

CAMILO, E. E. O. 2014. *Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes* Maestria en Ingeniería Civil Escuela Colombiana de Ingeniería - Julio Garavito

CARLOS, A. D. A. 2014. Tratamiento de aguas residuales atraves de humedales. *V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja***,** 8.

DIEGO, F. R. G. & JAIRO, A. P. R. 2009. *Evaluación del comportamiento de los parámetros involucrados en la remosión de zinc en humedales artificiales verticales.* Tesis de Grado Universidad De la Salle.

ELISABETH, V. M. 2010. Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas grises y aguas residuales domésticas en países en desarrollo. *Agencia de la Cooperación Tecnica Alemana(GTZ) GmbH,* 1.

HIDRAULICOS, I. D. R. 2012. Ley de Aguas. *In:* INRH (ed.) *NC 27:2012* Habana: Gaseta Oficial de Cuba.

IRIS, C. D. R. G. 2011. Estimación del caudal por el método de flotadores. *In:* PERÚ, S. N. D. M. E. H. D. (ed.). Peru: Ministerio del Ambiente.

JAVIER, S. S. R. 2014. Ley de Darcy. *Hidrologia*.

JENNY, M. L. B. & MARTHA, I. O. G. 2013. *Sistemas de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en Colombia* Especialización en Administración en Salud Pública Universidad Nacional de Colombi.

JUAN, R. 1999. Calidad de Agua. *Alfaomega 1*.

LUIS, G. G. 2012. Teoría de la Medición de Caudales y Volúmenes de Agua e Instrumental Necesario Disponible en el Mercado. *Medida y evaluación de las extracciones de agua subterránea. ITGE,* 1.

ONEI 2014. Anuario Estadistico de Cuba. Habana.

ORESTES, G. D. 2011. Metodología para el diseño de humedales conflujo subsuperficial horizontal. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental,* VOL. XXXII, No. 1, Ene-Abr 2011.

OSCAR, D., ALAN, C., LUIS, F. P. & MAURICIO, A. 2010. *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales,* Cochabamba – Bolivia.

PEDRO, A. M. M. 2014. *Humedal Artificial* Tesis de grado para ingeniero civil, Universidad Nacional Autónoma de México

UCPSI, C. M. D. C. I. I. 2005. *Manual de Hidrometria,* Venezuela, IRENA.

YASMANY, E. T. C. 2013. *Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Mediante un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial con Vegetación Herbácea.* Escuela Politécnica del Ejército.

Glosario de términos

Aerobio: proceso que se surte en presencia de oxígeno.

Afluente: Aguas residuales crudas o brutas que proceden de la red de alcantarillado e ingresan a la planta de tratamiento.

Aguas residuales: vertimientos de líquidos generados por acciones antrópicas de origen doméstico o industrial, que generan impactos negativos en los lugares donde finalmente son dispuestos.

Anaerobio: procesos que se desarrollan en ausencia de oxígeno.

Asimilabilidad: capacidad de absorción de sustancias o iones en las plantas, como por ejemplo absorción de cinc.

Biomasa: suma total de la materia de los seres vivos, expresado habitualmente en peso por unidad de área o de volumen, siendo de interés para la ecología, como indicador de la actividad o de la producción de energía de un organismo determinado.

Bloques: Factores que son controlados en el diseño experimental, pues generalmente se consideran como variables que afectan el comportamiento de la variable respuesta, pero no son el principal objeto de estudio en el diseño.

Carboxilatos: radicales libres de carbono, oxígeno e hidrógeno, provenientes de ácidos; afines con iones metálicos.

Cinc: elemento químico de número atómico 30, metal abundante en la corteza terrestre, generalmente se encuentra en forma natural como sulfato, sulfuro, carbonato o silicato. De color blanco, brillante y blando, se usa desde hace mucho tiempo como materia prima en la elaboración de pilas galvánicas, para formar aleaciones y para procesos de zincado o de recubrimiento electrolítico.

Compuestos Orgánicos Volátiles: sustancias a base de carbono e hidrógeno, entre otros elementos, altamente inestables a temperatura ambiente.

Contaminante: sustancia liberada por fenómenos naturales o antropogénicos que causa alteración al o los ecosistemas.

Convención de RAMSAR: acuerdo internacional sobre la conservación y el uso racional de los humedales como hábitat de aves acuáticas.

Efluente: Aguas residuales procedentes de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Estante: entrepaño, tabla horizontal que se coloca dentro de un mueble o directamente en la pared para colocar cosas encima. Mueble con anaqueles o entrepaños, y generalmente sin puertas, que sirve para colocar libros, papeles u otras cosas.

Flotación: Técnica de concentración donde las partículas de interés permanecen en la superficie de la solución cuya densidad es mayor.

Flujo a pistón: patrón de flujo mediante el cual las partículas contaminantes van a disminuir a medida que van atravesando el medio, bajo las condiciones óptimas de operación.

Flujo difusivo: Se denomina así al cociente entre la masa total de moléculas de soluto que atraviesan una sección de ducto y el intervalo de tiempo en que lo atraviesa. El flujo difusivo es el resultado de un fenómeno caótico y aleatorio en el que las moléculas van y vienen en todas las direcciones, la definición alude al movimiento neto, en un único sentido, desde donde el soluto está más concentrado hacia donde se halla más diluido.

Flujo Subsuperficial: corriente de fluido por debajo de la superficie.

Flujo Superficial: corriente de fluido por encima de la superficie.

Humedal: "son humedales aquellas extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros".

Macrófitas: plantas herbáceas de origen acuático.

Metales pesados: son componentes naturales de la corteza terrestre de alto peso atómico.

Matera: recipiente de tamaño relativamente pequeño que alberga especies vegetales, normalmente herbáceas, para su desarrollo o experimentación.

Materia Orgánica: sustancias compuestas por carbono e hidrógeno principalmente.

Nutrientes: sustancias que sirven de alimento a las plantas proporcionándoles los elementos necesarios para su desarrollo.

Retención: Relación entre el volumen del tanque y el caudal afluente, también se denomina tiempo de llenado.

Solubilidad: es una medida de la capacidad de una determinada sustancia para disolverse en otra. Puede expresarse en moles por litro, en gramos por litro, o en porcentaje de soluto.

Tamizado: proceso mediante el cual se pueden separar materiales sólidos de diferente tamaño a través de un tamiz, colador o elemento con agujeros de igual tamaño.

Tratamiento: Combinación de factores de análisis, que permiten distinguir e identificar dentro de la evaluación la combinación o tratamiento óptimo sobre la variable respuesta, en este estudio, el tratamiento corresponde a las distintas concentraciones de Cinc en la entrada del sistema.