

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



## FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

TRABAJO DE TITULACIÓN

### TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA DE PRODUCTOS LÁCTEOS SAN SALVADOR – CANTÓN RIOBAMBA, MEDIANTE FITORREMEDIACIÓN CON HUMEDALES ARTIFICIALES EMPLEANDO TOTORA

**Autor**

Bryan Geovanny Guerra Sandoval

**Tutor**

Ing. Marco Javier Palacios Carvajal, MsC.

**Riobamba – Ecuador**

**2018**

## REVISIÓN

Los miembros de tribunal de graduación del Proyecto de Investigación de título: **TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA DE PRODUCTOS LÁCTEOS SAN SALVADOR – CANTÓN RIOBAMBA, MEDIANTE FITORREMEDIACIÓN CON HUMEDALES ARTIFICIALES EMPLEANDO TOTORA**, presentado por: **Bryan Geovanny Guerra Sandoval** y dirigida por: **Ing. Marco Javier Palacios Carvajal**. Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación, escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodio en la biblioteca de la facultad de ingeniería de la UNACH.

Para constancia de lo expuesto firman:

Ing Javier Palacios

**Director del Proyecto**

Ing. Nelson Patiño

**Miembro del Tribunal**

Ing. Marcel Paredes

**Miembro del Tribunal**



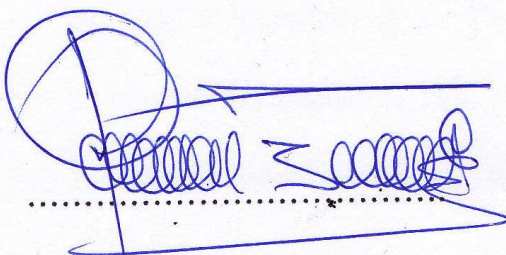
FIRMA

FIRMA

FIRMA

### CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Yo, Ing. Javier Palacios, en calidad de Tutor de Tesis, cuyo tema es: “TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA DE PRODUCTOS LÁCTEOS SAN SALVADOR–CANTÓN RIOBAMBA, MEDIANTE FITORREMEDIACIÓN CON HUMEDALES ARTIFICIALES EMPLEANDO TOTORA”, CERTIFICO; que el informe final del trabajo investigativo, ha sido revisado y corregido, razón por la cual autorizo al Señor: **Bryan Geovanny Guerra Sandoval** para que se presente ante el tribunal de defensa respectivo para que se lleve a cabo la sustentación de su Tesis.



Ing. Javier Palacios

**TUTOR DE TESIS**

## AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad del contenido de este proyecto de graduación, corresponde exclusivamente a:  
Bryan Geovanny Guerra e Ing. Javier Palacios y el patrimonio intelectual de la misma a la  
Universidad Nacional De Chimborazo.



.....

**Bryan Geovanny Guerra Sandoval**

**C.I. 060460922-2**

## AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios por ser mi fortaleza, mi ayuda idónea y mi fiel compañero para lograr culminar con esta etapa, a mis padres Noemí y Geovanny por su guía, consejos, apoyo, sustento y cariño incondicional.

A mi hermana Gianina, tíos, familia y amigos en general que de una u otra forma estuvieron pendientes de cada paso dado y me brindaron su apoyo cada vez que lo necesité.

A la Universidad Nacional de Chimborazo, a los docentes de la carrera de Ingeniería Civil por formarme humana y académicamente, al Ing. Marcel Paredes e Ing. Nelson Patiño por la guía y consejos recibidos y un agradecimiento especial al Ingeniero Javier Palacios quien como tutor me compartió sus conocimientos, asesoría y guía durante toda la etapa de desarrollo del proyecto de investigación.

¡Gracias totales e infinitas a todos!

*Por: Bryan Geovanny Guerra Sandoval*

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres que por su sacrificio, esfuerzo y cuidado lograron siempre ayudarme incondicionalmente, ahora este logro y resultado final de mi formación universitaria será mi mayor fruto de agradecimiento por haber creído y confiado en mí, a mi madre a quien admiro mucho por ser mi ejemplo de superación, enseñarme el valor de la constancia y ser mi fortaleza diaria, a mi padre por la ayuda y consejos impartidos.

Dedicado a todas las personas y familiares que me ayudaron en este largo trayecto.

*Por: Bryan Geovanny Guerra Sandoval.*

## ÍNDICE DE CONTENIDO GENERAL

1.	RESUMEN .....	12
2.	ABSTRACT .....	12
3.	INTRODUCCIÓN.....	14
4.	OBJETIVOS.....	17
	Objetivo General.....	17
	Objetivos Específicos.....	17
5.	MARCO TEÓRICO .....	18
6.	METODOLOGÍA.....	25
	6.1. Análisis Cuantitativo .....	25
	6.2. Modelo Experimental:.....	26
	6.2.1. Condiciones iniciales del proceso:.....	26
	6.2.2. Creación del sistema piloto del humedal artificial:.....	27
	6.2.3. Condiciones de control y reporte de resultados:.....	30
7.	RESULTADOS .....	32
8.	DISCUSIÓN.....	47
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	49
10.	ANEXOS .....	53
	10.1. Anexo 1.- Plano con diseño y parámetros hidráulicos del sistema piloto de humedales artificiales con totora.....	53

10.2.	Anexo 2.- Cálculos hidráulicos del sistema piloto con humedales artificiales basados en el diseño de Lara (1999) y Hernández (2010).....	54
10.3.	Anexo 3.- Huella hídrica de diferentes productos (Hoekstra, 2010) .....	58
10.4.	Anexo 4.- Proceso constructivo del sistema piloto de humedales artificiales con Totora	59
10.5.	Anexo 5.- Altura de crecimiento diario de la especie vegetal Totora. ....	65
10.6.	Anexo 6.- Resultados del Análisis Químico del agua residual del efluente de la Industria láctea “San Salvador” .....	67
10.7.	Anexo 7.- Respaldo fotográfico de todo el proceso de investigación y experimentación.....	72



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Humedal Artificial de Flujo Superficial Libre (FWS) .....	21
<b>Figura 2.</b> Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (SFS) .....	22
<b>Figura 3.</b> Modelo experimental de la investigación.....	26
<b>Figura 4.</b> Obtención de la especie vegetal Totorá y agregados de distinta granulometría .....	28
<b>Figura 5.</b> Ensayo de granulometría y lavado de los agregados.....	28
<b>Figura 6.</b> Porcentaje de remoción de contaminantes en función del tiempo. ....	34
<b>Figura 7.</b> Comportamiento de los S.S. en función del tiempo. ....	35
<b>Figura 8.</b> Comportamiento del nitrógeno total en función del tiempo.....	36
<b>Figura 9.</b> Comportamiento de la DQO en función del tiempo.....	37
<b>Figura 10.</b> Comportamiento de la DBO <sub>5</sub> en función del tiempo. ....	39
<b>Figura 11.</b> Comportamiento de los aceites y grasas en función del tiempo.....	40
<b>Figura 12.</b> Comportamiento de los fosfatos en función del tiempo.....	41

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Parámetros y variables de diseño de la unidad piloto .....	29
<b>Tabla 2.</b> Resultados del Análisis Químico del agua residual del efluente de la Industria láctea “San Salvador” .....	32
<b>Tabla 3.</b> Resultados de altura de crecimiento diario promedio de las Totoras durante dos meses .....	33
<b>Tabla 4.</b> Porcentaje de remoción de los Sólidos Suspendidos por la especie <i>Schoenoplectus californicus</i> (Totora) en función del tiempo .....	35
<b>Tabla 5.</b> Porcentaje de remoción del Nitrógeno total por la especie <i>Schoenoplectus californicus</i> (Totora) en función del tiempo .....	36
<b>Tabla 6.</b> Porcentaje de remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) por la especie <i>Schoenoplectus californicus</i> (Totora) en función del tiempo .....	37
<b>Tabla 7.</b> Porcentaje de remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) por la especie <i>Schoenoplectus californicus</i> (Totora) en función del tiempo .....	38
<b>Tabla 8.</b> Porcentaje de remoción de la Aceites y grasas por la especie <i>Schoenoplectus californicus</i> (Totora) en función del tiempo .....	40
<b>Tabla 9.</b> Porcentaje de remoción de los Fosfatos por la especie <i>Schoenoplectus californicus</i> (Totora) en función del tiempo .....	41
<b>Tabla 10.</b> Resultados del porcentaje de remoción de contaminantes de la especie “ <i>Hedychium montana</i> ” a los 30 días en el tercer módulo del sistema piloto obtenidos por Hernández el al. (2010).....	42
<b>Tabla 11.</b> Resultados del Análisis Químico del efluente a los 45 días del agua tratada de la Industria láctea “San Salvador” en el sistema piloto de Humedales Artificiales empleando Totora .....	44
<b>Tabla 12.</b> Comparación de resultados del porcentaje de remoción de contaminantes obtenidos por Hernández el at. (2010) y esta investigación con Humedales Artificiales empleando Totora	46
<b>Tabla 13.</b> Parámetros físicos y variables para el diseño de la unidad piloto de humedales artificiales.....	54
<b>Tabla 14.</b> Altura de crecimiento diario de la especie vegetal totora durante dos meses.....	65

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación (1)</b> Constante de reacción de primer orden según la temperatura.....	55
<b>Ecuación (2)</b> Área superficial del lecho del sistema piloto.....	56
<b>Ecuación (3)</b> Tiempo de retención hidráulica (THR) .....	56
<b>Ecuación (4)</b> Fórmula de continuidad.....	56

## 1. RESUMEN

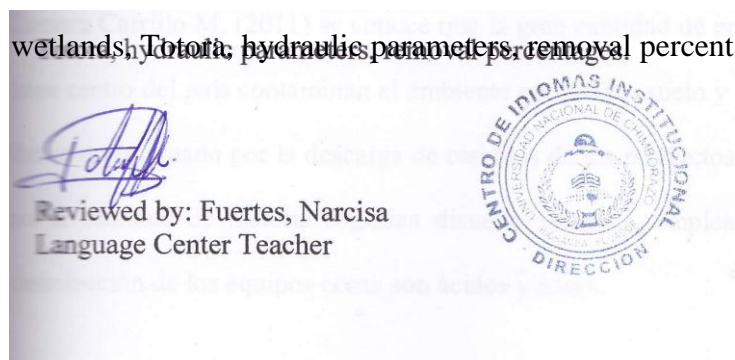
Una gran problemática de la actualidad es la desmedida utilización de los recursos hídricos por parte de las industrias debido a que éstas utilizan grandes volúmenes de agua para transformar las materias primas, se conoce que las industrias lácteas contaminan el ambiente siendo el agua el principal factor contaminado por la descarga de residuos de los productos que realizan generando aguas residuales con alto contenido orgánico, por dicha razón se realizó el estudio de alternativas de depuración de bajo costo pero con buenos resultados de depuración como son los Humedales Artificiales, el propósito de esta investigación fue obtener el porcentaje de remoción de contaminantes de la especie vegetal *Schoenoplectus californicus* (Totora) comprobando experimentalmente si es una buena opción para la depuración de aguas residuales lácteas por lo cual se diseñó y construyó modelos a escalas de humedales tomando en cuenta los parámetros físicos, hidráulicos y biológicos con distinto número de especies vegetales, el mismo que se monitoreó durante un tiempo de 2 meses; se realizó análisis químicos de agua a los 15, 30, 45 y 60 días para verificar la disminución de contaminantes, los mejores resultados de descontaminación en el sistema piloto fue después de los 60 días de funcionamiento con porcentajes de remoción de los Sólidos Suspendidos del 99.6%, Nitrógeno Total del 94.3%, DQO del 98.2%, DBO5 del 98.1%, Aceites y grasas del 99.9%, Sólidos totales del 85.5% y Fosfatos del 91.1% lo que indicó que el humedal artificial con Totora resulta ser una buena opción para depurar la descarga de dichas aguas residuales en una zona con clima templado-frío siempre y cuando sean correctamente diseñados, controlados y monitoreados.

**PALABRAS CLAVE:** Aguas residuales lácteas, alternativas de depuración, humedales artificiales, Totora, parámetros hidráulicos, porcentajes de remoción.

## 2. ABSTRACT

The biggest problem nowadays is the excessive use of water resources by industries because they are using large volumes of water to transform raw materials, it is well known that dairy industries pollute the environment being water the main factor contaminated by waste discharge produce, generating sewage with high organic content, for this reason, the study of low cost purification alternatives was carried out, but with good purification results such as Artificial Wetlands. The purpose of this investigation was to obtain the percentage of removal of contaminants of the plant species *Schoenoplectus californicus* (Tatora) experimentally checking out if it is a good option for the purification of dairy wastewater, therefore were designed and built scale models of wetland considering physical, hydraulic and biological parameters with different number of vegetable species. It was monitored during 2 months, a chemical analysis of water was carried out at 15, 30, 45 and 60 days to verify the decrease of contaminants, the best decontamination results in the pilot system was after 60 days of operation with percentages of removal of Suspended Solids of 99.6%, Total Nitrogen of 94.3%, COD of 98.2%, BOD5 of 98.1%, Oils and fats of 99.9%, Total solids of 85.5% and Phosphates of the 91.1% which indicated that the artificial wetland with Tatora turns out to be a good option to purify the discharge of wastewater in an area with a temperate-cold climate, as long as they are properly designed, controlled and monitored.

**KEYWORDS:** Milk residual waters (sewage), purification alternatives, artificial wetlands, Tatora, hydraulic parameters, removal percentages.



### 3. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se conoce que la contaminación del agua y la desmedida utilización de los recursos hídricos se han convertido en un gran problema, sus causas son por las distintas actividades que realiza el hombre, una principal son los procesos de industrialización donde se utilizan grandes volúmenes de agua para transformar las materias primas, las alternativas de mejoramiento constante por parte de industrias son muy variadas pero en ocasiones no es suficiente para garantizar una relación amigable con el medio ambiente. (Llanos Campaña, 2013)

El Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo (2009) y el catedrático Arjen Y. Hoekstra (2011) creador del concepto de la “huella hídrica” (indicador de uso de agua que tiene en cuenta tanto el uso directo como indirecto por parte de un consumidor, considerado un parámetro para medir el estado de los recursos naturales) indican que para producir un litro de leche se necesita alrededor de 1000 lt de agua, de la cual alrededor del 65 % a 75 % resulta en agua residual o de desperdicio.

La huella hídrica de un individuo, comunidad o industria se define como el volumen total de agua dulce que se utiliza para producir los bienes y servicios consumidos por el individuo o comunidad así como los producidos por la industria, por esto y tomando en cuenta otro estudio previo sobre la contaminación que producen las industrias lácteas en Ecuador realizado por Zamora Carrillo M. (2011) se conoce que la gran cantidad de empresas lácteas que existen en la zona centro del país contaminan el ambiente como aire, suelo y agua, siendo el agua el principal factor contaminado por la descarga de residuos de los productos que se elaboran, incrementando así la cantidad de materia orgánica disuelta. Además, emplean productos para la limpieza y desinfección de los equipos como son ácidos y bases.

Por esta razón y caracterizando el tipo de industria en estudio fue la de productos lácteos ya que éstas generan aguas residuales con alto contenido orgánico, una variación del pH (unidad de medida de alcalinidad o acidez de una solución acuosa) durante todos los procesos, una DQO (Demanda Química de oxígeno) y DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno en un lapso de estabilización de 5 días) alta debido a la materia prima utilizada para la producción de quesos, cremas, leche procesada, saneamiento y actividades sanitarias del personal administrativo y productivo en general. (Macas Paguay, 2013)

Entonces en primer lugar se evaluó una industria de productos lácteos denominada “San Salvador” ubicada en el cantón Riobamba de la provincia de Chimborazo con el fin de obtener las condiciones iniciales y el grado de concentración de contaminantes que contengan sus aguas residuales, ya que para lograr un tratamiento de aguas exitoso se debe evaluar primeramente el tipo de contaminantes que se van a tratar y de esta manera buscar el proceso unitario más adecuado para depurarlos, puesto que el grado de tratamiento requerido para un agua residual depende fundamentalmente de los límites de vertido para el efluente. (Ramalho, 2003)

Algo importante a destacar es que un tratamiento de aguas residuales debe contar con tecnologías de depuración eficientes y de bajo costo para cumplir con los estándares requeridos para remoción de materia orgánica, nutrientes y microorganismos para reúso. Las tecnologías de tratamiento tradicionales incluyen principalmente sistemas biológicos y fisicoquímicos, siendo los primeros de menor costo en operación y mantenimiento. (Lara, 1999)

Para tratamiento de aguas industriales existen varios sistemas convencionales, entre ellos los procesos de digestión anaerobia que han sido principalmente aplicados a residuos con alta carga orgánica y aguas residuales, por ejemplo efluentes de vinos, leche y sus derivados,

cervezas o lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales (Montero, 2008) donde se involucra la degradación y estabilización de materiales orgánicos bajo condiciones anaerobias por organismos microbianos (Chen, 2008), otra alternativa es el de reactores discontinuos secuenciales (S.B.R) como una variación del proceso de lodos activados convencional para la eliminación de materia orgánica y de nutrientes de las aguas residuales. (Muñoz Paredes & Ramos, 2014)

De lo anterior, si bien sabemos que existen artículos científicos y tesis de investigación en donde han estudiado tratamientos de aguas residuales de industrias lácteas, la mayoría de estos son con tratamientos biológicos y químicos, mediante sustancias y compuestos químicos para realizar la depuración de contaminantes, lo cual ve necesario el estudio de otras alternativas de depuración de bajo costo pero que den buenos resultados de depuración y cumplan con los estándares requeridos para remoción de materia orgánica, como es el caso de Humedales Artificiales con vegetación de la zona para tratar aguas residuales industriales.

En base al problema planteado, y bibliografía indagada surge la siguiente interrogante:  
¿Es posible obtener el porcentaje de remoción de contaminantes de la especie vegetal Totorá y así verificar si sería una buena opción depurar la descarga de aguas residuales proveniente de una industria de productos lácteos mediante un sistema de tratamiento con Humedales Artificiales empleando la especie vegetal Totorá (*Schoenoplectus californicus*)?



## **4. OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Obtener el porcentaje de remoción de contaminantes de la especie vegetal Totorá a fin de verificar si es una buena opción depurar la descarga de aguas residuales proveniente de una industria de productos lácteos mediante un sistema de tratamiento con Humedales Artificiales empleando dicha especie vegetal.

### **Objetivos Específicos**

Construir modelos a escala de humedales con distinto número de plantas Totoras de la zona para obtener experimentalmente el grado de remoción de contaminantes provenientes de una industria de productos lácteos.

Realizar gráficas comparativas de porcentajes de eliminación en función de distintas situaciones como comportamiento de contaminantes en función del tiempo, componentes hidráulicos y estructurales que permitan ver si el uso de esta especie vegetal dará resultados satisfactorios para la depuración de contaminantes de esta industria en particular.

## 5. MARCO TEÓRICO

Uno de los objetos más importantes de estudio en la actualidad es la contaminación ambiental que produce el hombre debido a las actividades diarias que realiza para subsistir, una actividad principal es los procesos de industrialización donde se utilizan grandes volúmenes de agua para transformar las materias primas, debido a esto se ve necesario una búsqueda constante de nuevos y mejores diseños de actividades y alternativas de tratamiento de aguas confiables, de bajo costo y que ofrezcan mejores resultados asegurando una buena calidad del agua (Llanos Campaña, 2013), ésta búsqueda es prácticamente un reto debido a la generación de distintos vertientes líquidos, con diferentes características y composición por lo cual se tomó en cuenta la industria láctea en particular debido a que éstas generan aguas residuales con alto contenido orgánico.

Dentro de los procesos principales en esta industria que producen residuos contaminantes es en la producción de quesos, cremas, mantequilla y el lavado de equipos de secado, se estima que el suero generado en la elaboración de quesos tiene una DBO del orden de 10.000 - 40.000 mg/L. (Parra Huertas, 2010), las aguas residuales de las industrias lácteas son generalmente neutras o poco alcalinas, pero tienen tendencia a volverse ácidas muy rápidamente a causa de la fermentación del azúcar de la leche produciendo ácido láctico, descendiendo el pH a 4,5 – 5,0. La composición de estas aguas incluye sustancias orgánicas disueltas como la lactosa sales minerales y suspensiones coloidales de proteínas. (Macas Paguay, 2013)

Las tecnologías y métodos existentes para el tratamiento de este tipo de efluentes son muy amplias por lo que no se puede establecer un procedimiento y diseño estándar no obstante, si se puede exponer de forma general los tratamientos que generalmente se utilizan y que

consisten en una serie de procesos físicos (Pre-tratamiento) como el desbaste, desarenado, desengrasado, físico-químicos (Tratamiento Primario) como los tanques o fosas sépticas que es un sistema sencillo cuyo objetivo principal es la eliminación de los sólidos presentes en el agua, aquí se separan por un lado los sólidos flotantes que hay en la superficie, incluidos aceites y grasas, y por otro lado, los sólidos sedimentables que se acumulan en el fondo, y los sistemas biológicos (Tratamiento Secundario) como los Humedales artificiales que tienen como finalidad disminuir los contaminantes presentes (Huertas & Marcos, 2012). Estos procesos dependerán de las características del efluente a tratar, el grado de purificación y eliminación de organismos patógenos para reutilización del agua (Tratamiento terciario) requerido según los niveles de contaminación permitida por las normativas locales. (Macas Paguay, 2013)

Los procesos utilizados principalmente son los convencionales mostrados anteriormente: físicos, químicos y biológicos. Dentro de estos últimos, los Humedales Artificiales (HA) son utilizados para aguas residuales de tipo municipales, dando resultados de remoción de la DQO hasta de 95 % en estiaje de y 90 % en temporada de lluvias (Romero et al., 2009), aunque también han funcionado para aguas de origen industrial, los H.A se definen como sistemas que simulan una zona de transición entre el ambiente terrestre y el acuático, pero que son específicamente contruidos para el tratamiento de aguas residuales bajo condiciones controladas de ubicación, dimensionamiento y capacidad de tratamiento. (Romero et al., 2009)

Las técnicas de fitorremediación se caracterizan por ser una práctica de limpieza pasiva y estéticamente agradable que aprovechan la capacidad de las plantas y la energía solar para el tratamiento de una gran variedad de contaminantes del medio ambiente (EPA, 1996). En esta técnica las plantas actúan como trampas o filtros biológicos que descomponen los contaminantes

y estabilizan las sustancias metálicas presentes en el suelo y agua al fijarlos en sus raíces y tallos. (Hernández, et al., 2010)

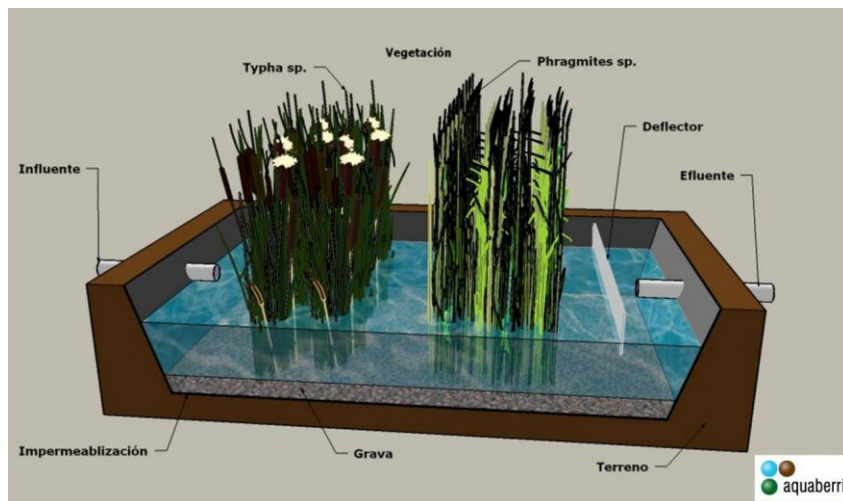
Este estudio de Hernández (2010) de Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas describe los procesos de diseño e implementación de un sistema de humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales con un ensayo piloto de fitorremediación, dicho proyecto evaluó la efectividad de los humedales para reducir la carga contaminante como sistemas económicos de tratamiento solo en granjas porcícolas en Colombia dando buenos resultados de remoción de contaminantes como sólidos suspendidos (mayor al 80 %), DQO (mayor al 88%), DBO<sub>5</sub> (Mayor al 80%), y nitrógeno (mayor al 90 %) al combinar medios filtrantes y diferentes tipos de plantas de la zona, de este artículo se desprende el estudio de más métodos de fitorremediación con otras y distintas plantas, diferentes medios filtrantes, y para otras industrias en este caso la de productos lácteos para ver si se obtendrán mejores resultados de remoción de contaminantes.

Un humedal artificial (HA) es un sistema de tratamiento de agua residual (estanque o cauce) poco profundo, construido por el ser humano, en el que se han sembrado plantas acuáticas, recreando procesos naturales para tratar el agua residual (Romero et al., 2009). Tienen un tratamiento primario, un sistema de vaciamiento automático (dependiendo de la topografía con o sin utilización de bombas) y de un tratamiento secundario biológico en un lecho filtrante de arena y áridos, con plantas. El tratamiento primario consiste en separar el lodo (barro) del agua en cámaras especialmente diseñadas. Los humedales construidos tienen ventajas respecto de los sistemas de tratamiento alternativos, debido a que requieren poca o ninguna energía para operar. Si hay suficiente tierra barata disponible cerca de la instalación de los humedales de

cultivo acuático, puede ser una alternativa de bajo costo además de que proporcionan el hábitat para la vida silvestre, y son estéticamente agradables a la vista (Dayna Yocum., 2012)

Otra de las ventajas de este sistema se encuentra el bajo costo de instalación, mantenimiento y sistema constructivo comparado con sistemas físicos, químicos y biológicos convencionales, estos sistemas correctamente diseñados y construidos, pueden depurar las aguas industriales. (Romero et al., 2009)

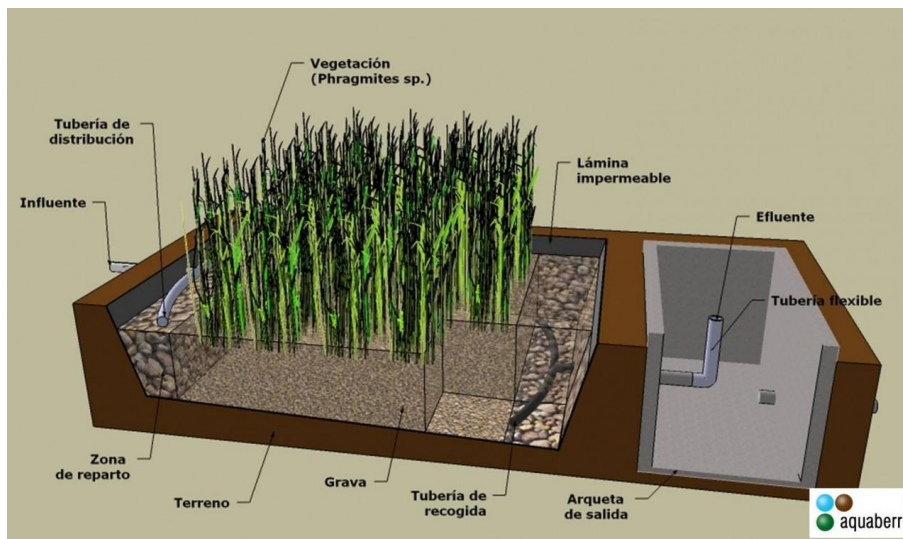
Los HA entonces se caracterizan por tener un suelo saturado de agua y una comunidad viviente (plantas y animales) adaptados a la vida acuática o a un suelo saturado, existen dos tipos de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de aguas residuales: los de Flujo Superficial Libre (FWS – Free Water Surface) y los de Flujo Subsuperficial (SFS – Sub Surface Flow) (Hernández et al., 2010)



**Figura 1.** Humedal Artificial de Flujo Superficial Libre (FWS)

**Fuente:** Aquaberri S.L. Tecnologías naturales de depuración y tratamiento de aguas (2013)

Como se indica en la *figura 1* en los sistemas de Flujo Superficial Libre (FWS) el nivel del agua está sobre la superficie del terreno, la vegetación está sembrada fija y emerge sobre la superficie del agua; el flujo de agua es principalmente superficial.



**Figura 2.** Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial (SFS)

**Fuente:** Aquaberri S.L. Tecnologías naturales de depuración y tratamiento de aguas (2013)

En cambio en la figura 2 el humedal artificial de Flujo Subsuperficial (SFS) el nivel del agua está por debajo de la superficie del terreno (no se encuentra inundado); el agua fluye a través de la cama de arena o grava y las raíces penetran hasta el fondo de la cama, este sistema consistirá entonces en un filtro biológico relleno de un medio poroso (por ejemplo grava, ´piedra volcánica), en el cual las plantas macrófitas se siembran en la superficie del lecho filtrante y las aguas residuales pretratadas atraviesan de forma horizontal el lecho, en estos sistemas el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio granular (Lara., 1999), se utilizó este tipo de humedal en la construcción del sistema piloto debido a la facilidad de operación, la condición del modular permite adicionar nuevas unidades de acuerdo con las características de las aguas residuales finales y la mínima presencia de plagas (Hernández et al., 2010) debido a que el agua circula por debajo del nivel de la grava filtrante mas no se encuentra inundado como sería el caso de los humedales de flujo superficial.

Los dos sistemas FWS y SFS, requieren condiciones de flujo uniformes para alcanzar los rendimientos esperados, esto se alcanza en sistemas de moderado tamaño con tuberías de recolección perforadas que se extienden a lo ancho de toda la celda, tanto para entrada como para salida (Lara, 1999)

La importancia de los medios filtrantes es que en dicho medio granular ocurren múltiples procesos como la retención y sedimentación de la materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de los nutrientes, y la inactivación de los microorganismos patógenos, el medio granular debe ser limpio (exento de finos), homogéneo, duro, durable y capaz de mantener su forma a largo plazo. (García & Corzo, 2010)

En cuanto a la especie vegetal *Schoenoplectus californicus* más conocida como Totorá es ubicua en distribución, robusta y debido a que se propaga fácilmente es capaz de crecer bajo diversas condiciones medioambientales siendo una especie de planta ideal para un humedal artificial, también es capaz de producir una biomasa anual grande y tiene un moderado potencial de remoción de Nitrógeno y Fósforo, el mayor beneficio de la vegetación es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz, su presencia física en el sistema (tallos, raíces y rizomas) permite la penetración a la tierra o medio de transporte a el oxígeno de manera más profunda además toman el carbono y nutrientes para realizar su procedimiento de fitorremediación. (Lara, 1999)

Los efectos de la vegetación sobre el funcionamiento de los humedales son muy importantes ya que las plantas asimilan nutrientes; la selección de la vegetación que se va a usar en un sistema de humedales debe tener en cuenta las características de la región donde se realizará el proyecto, se debe tratar de especies que puedan crecer fácilmente en las condiciones

ambientales del sistema proyectado que puedan tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales (García & Corzo, 2010) por ello se utilizaron especies propias de la flora local.

La hipótesis planteada será que si se logrará depurar la descarga de aguas residuales proveniente de una industria de productos lácteos mediante un sistema de tratamiento con humedales artificiales empleando la especie vegetal Totora y se obtendrá el porcentaje de remoción de contaminantes de la misma mediante la alternativa propuesta con las dimensiones establecidas, la cantidad, tipo de plantas y con los componentes hidráulicos más adecuados para dicho humedal y de igual manera se logrará cumplir con los límites y parámetros máximos de grados de contaminación permitidos en las normativas ambientales vigentes en el país para descarga a alcantarillado público.

El alcance de esta investigación fue explicativo ya que se realizó experimentos con modelos a escala de humedales usando distinto número de especies vegetales Totoras, hasta obtener el grado de remoción de contaminantes provenientes de la industria de lácteos “San Salvador” ya que ésta tecnología resulta altamente atractiva para ser aplicada en el tratamiento de aguas residuales por su versatilidad y rentabilidad económica (Romero et al., 2009), para finalmente mediante un alcance descriptivo y logrando obtener gráficas de porcentajes de eliminación en función de distintas variables como el comportamiento y disminución de los contaminantes en función del tiempo permitieron hacer una comparación con los resultados obtenidos por Hernández (2010) para ver si la planta utilizada en esta investigación (*Schoenoplectus californicus*) dará mejores resultados que la planta utilizada por el autor (*Hedychium montana*)



## 6. METODOLOGÍA

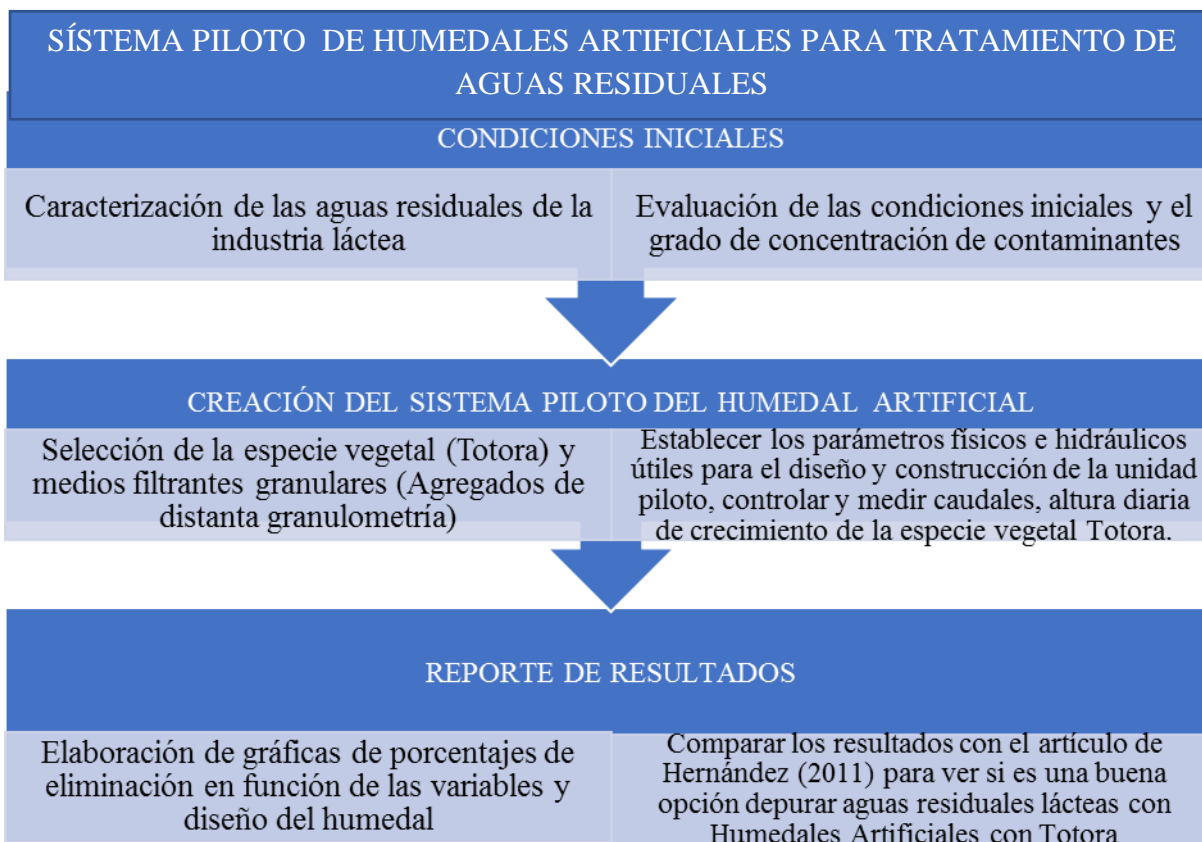
Primeramente, se realizó una búsqueda bibliográfica a fondo sobre la temática a tratar en el proyecto de investigación como es el tratamiento de aguas, parámetros hidráulicos y constructivos de humedales artificiales, la contaminación de las industrias lácteas y análisis cuantitativos para obtener porcentajes de remoción de contaminantes mediante técnicas de fitorremediación en bases de datos como Scielo, Scopus, Science Direct, World Wide Science donde se encontraron artículos científicos y estudios de la temática anteriormente mencionada.

Al ser un estudio comparativo este análisis entonces se basó en el modelo experimental del sistema piloto utilizado por Hernández et al. (2010) pero además se desarrolló un proceso metodológico de carácter técnico cuantitativo que se enfocó en evaluar mediante un análisis comparativo con el artículo científico si la planta utilizada, según las condiciones de la zona y el efluente de la industria analizada dará mejores resultados de depuración de las aguas residuales, con la limitación de que se obtendrá el porcentaje de remoción de la especie vegetal y se logrará depurar las aguas residuales más no que fines y forma de reusó se le podría dar a esta agua tratada.

### 6.1. Análisis Cuantitativo

Se realizó midiendo la cantidad de DBO y DQO y demás contaminantes de interés sanitarios removidos en el sistema piloto del humedal artificial con Totoras, el porcentaje de remoción de contaminantes del humedal se comparó con el artículo de Hernández et al. (2010)

## 6.2. Modelo Experimental:



**Figura 3.** Modelo experimental de la investigación

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.

### 6.2.1. Condiciones iniciales del proceso:

Caracterización de las aguas residuales de la industria láctea “San Salvador” mediante la observación de los procesos de industrialización, identificando así la hora de máxima producción donde se procederá a tomar las muestras de agua.

Se tomó una muestra de las aguas residuales del efluente con el motivo de caracterizar los contaminantes presentes durante el caudal máximo por los distintos procesos de producción, los parámetros evaluados fueron DBO5, DQO, sólidos totales (ST), sólidos suspendidos (SS), nitrógeno total, aceites y grasas, fosfatos.

Para la evaluación de las condiciones iniciales y el grado de concentración de contaminantes se realizó la recolección de la muestra de agua residual que se llevó a cabo mediante el método manual de muestreo en una caja de revisión de la empresa de lácteos “San Salvador” y posteriormente se envió a un análisis de laboratorio para obtener el grado de concentración de todos los contaminantes presentes en las aguas residuales a la entrada del tratamiento y posteriormente se realizó otros análisis a la salida del mismo logrando así obtener el porcentaje de remoción del humedal artificial en un lapso de 15, 30, 45 y 60 días en la cual se prevé la maduración y desarrollo de la especie vegetal, el tiempo establecido se tomó en cuenta hasta que la especie se adapte al nuevo hábitat y a los contaminantes de las aguas residuales.

#### **6.2.2. Creación del sistema piloto del humedal artificial:**

La especie vegetal (Totora) se seleccionó y trasplantó del sector aledaño de Cubijés por la gran abundancia que presenta dicho sector, cabe recalcar que la especie fue trasplantada al lecho previamente preparado con raíces que tenían una longitud entre 10 a 15 cm y altura de la planta entre 1.50 a 2 m, para efectos de transporte se procedió a su corte dejando la especie aproximadamente en 40 cm, posteriormente en los resultados se mostrará detalladamente el desarrollo y crecimiento de la especie que se controló durante el tiempo establecido de 2 meses, se recomienda realizar este proceso de trasplantado y no de sembrado en situ a partir de semillas en el humedal para evitar un estricto control del agua, el tiempo de maduración y crecimiento inicial de la planta ya que por investigaciones previas (García & Corzo, 2010) se necesita entre 2 a 3 meses para que la especie madure y empiece con el proceso de fitorremediación, la grava de distinta granulometría se obtuvo de la mina “Cerro Negro” de la ciudad de Riobamba por ser considerada la de mejores características físicas en el sector.



**Figura 4.** Obtención de la especie vegetal Totorá y agregados de distinta granulometría

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.

Al ser un estudio comparativo con el estudio anterior de Hernández et al. (2010) los medios filtrantes (Grava) serán los mismos pero en distintos porcentajes debido a la disponibilidad en las zonas cercanas a los ensayos y las características de los terrenos donde se encuentran las plantas seleccionadas, además se realizó ensayos de laboratorio de granulometría a fin de lograr un tamaño de las partículas más exacto para la experimentación, se evitó el uso de arena en el sistema porque se ha comprobado experimentalmente en humedales convencionales que ésta obstaculiza y tapona las tuberías de distribución del humedal.



**Figura 5.** Ensayo de granulometría y lavado de los agregados

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.

En cuanto al dimensionamiento hidráulico para humedales convencionales a escala real se realiza con la Ley de Darcy que describe el régimen del flujo en un medio poroso y esta sirve para determinar las dimensiones geométricas del sistema, pero en el caso de esta investigación se partió de una sección de lechos (gavetas plásticas) ya conocidos y se buscó determinar el caudal de ingreso al sistema piloto por lo cual se realizó el diseño para la construcción de la unidad piloto con los cálculos de los parámetros físicos e hidráulicos (ver Anexo 1) basados en el modelo de Hernández et al. (2010). La tabla 1 muestra los parámetros y variables utilizadas.

Tabla 1  
*Parámetros y variables de diseño de la unidad piloto*

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
<b>DBO a la entrada del humedal</b>	11120 mg/l (resultado obtenido mediante análisis de laboratorio)
<b>EDBO5</b>	75% de Eficiencia
<b>DBO a la salida del humedal</b>	2780 mg/l (resultado esperado según el 75% de eficiencia propuesto en el sistema)
<b>Q: Caudal.</b>	32.30 l/día
<b>m: Pendiente.</b>	0.001 m
<b>y: Profundidad del humedal</b>	0.20 m
<b>n: Porosidad</b>	0.35
<b>w: Ancho</b>	0.38 m
<b>L: Largo</b>	0.55 m
<b>As: Área superficial.</b>	0.651 m <sup>2</sup>
<b>KT: Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d-1</b>	0.983 d <sup>-1</sup> (Con temperatura 18° C)

Adaptado de Hernández et al. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas.

Luego de realizar el diseño y cálculos hidráulicos del sistema piloto (Ver anexo 2) y de las distintas etapas de construcción e implementación (Ver anexo 3) se procedió a ponerlo en funcionamiento, tomando en cuenta que para alcanzar los rendimientos esperados por el sistema se requiere de condiciones de flujo uniforme y constante se implementó un tanque de almacenamiento de las aguas residuales con capacidad de 250 litros con adaptaciones de válvulas para el control del caudal constante, dicha agua residual fue transportada semanalmente desde la empresa de productos lácteos hacia el tanque, la implementación de las tuberías de recolección perforadas a la entrada y salida ayudó de igual manera a la distribución del flujo por todo el lecho (Ver Anexo 1), las condiciones de control y posterior reporte de resultados se mostrarán más adelante.

### **6.2.3. Condiciones de control y reporte de resultados:**

La toma de la muestra para la determinación de los parámetros iniciales se realizó en el día 04 de Julio del 2017 en el horario de máxima producción, es decir donde existió más grado de contaminación del agua y cuando se evidenció que hubo un caudal máximo por los procesos de industrialización, la construcción del sistema piloto se realizó según las dimensiones establecidas en la tabla 1 y el anexo 1, una vez construido el sistema piloto se realizó un monitoreo del mismo a diario durante el tiempo establecido de dos meses en el cual se tomó la medida de crecimiento de la especie vegetal para verificar su maduración y evolución, de igual manera se midió el caudal que ingresaba al sistema y se realizó un control constante para que no exista ninguna complicación durante el tratamiento, dichos resultados se encuentran tabulados a continuación.

Los valores de comparación se obtuvieron mediante la medición de la DBO, DQO, Sólidos en suspensión, Nitrógeno total, Aceites y grasas, Sólidos totales y Fosfatos del efluente de la industria láctea a la salida del tratamiento propuesto, los datos y resultados obtenidos se evaluaron mediante gráficas y tablas comparativas del estudio realizado por Hernández et al. (2010) al utilizar la “*Hedychium montana*” (nombre vulgar Matandrea) como especie vegetal, y la “*Schoenoplectus californicus*” (nombre vulgar Totorá) en este caso de estudio.

## 7. RESULTADOS

Los resultados de la primera toma de muestra para obtener el grado de contaminación en la industria láctea fueron los que se muestran en la tabla 2, dichos resultados nos evidencian una cantidad elevada de DQO (15000 mg/l) y DBO (11120 mg/l) como se preveía ya que por lo que se explicó anteriormente es debido a la materia prima y procesos industriales que se realizan en esta empresa por lo cual sus aguas residuales contienen un alto índice de contaminación, además de que los demás parámetros medidos se encuentran por fuera de los límites establecidos de descarga al sistema de alcantarillado según el *TULSMA Tabla 9*.

Tabla 2

*Resultados del Análisis Químico del agua residual del efluente de la Industria láctea “San Salvador”*

PARÁMETROS ANALIZADOS	UNIDADES	*MÉTODO	**LÍMITES	RESULTADOS	OBSERVACIONES
Sólidos Suspendedos	mg/l	2540-B	-	5560	-
Nitrógeno Total	mg/l	-	60	144	No Pasa (X)
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	5202-C	500	15000	No Pasa (X)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/l	5210-B	250	11120	No Pasa (X)
Aceites y Grasas	mg/l	Extracción con solvente	70	1800	No Pasa (X)
Sólidos Totales	mg/l	2540-D	1600	8140	No Pasa (X)
Fosfatos	mg/l	-	15	101.25	No Pasa (X)

\*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF 21 ed.

\*TULSMA TABLA 9. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público.

Fecha de análisis: 04 de Julio del 2017, Fecha de entrega de resultados: 11 de Julio del 2017

Adaptado de Laboratorio de Servicios Químicos y Microbiológicos en aguas y alimentos, Dra Gina Álvares R.

Elaborado por: Guerra S. Bryan G



Una vez construido el sistema piloto y realizado un monitoreo diario de la altura de crecimiento promedio de la especie vegetal que se muestra en la Tabla 4, se evidenció un crecimiento y desarrollo de la Totorá con una altura promedio máxima de 16.8 cm en el primer mes y 26.5 cm en el segundo mes donde se observa que la mayor altura de desarrollo y crecimiento se dan con las especies del lecho 2 y 3 esto se debe a que en el primer lecho la especie vegetal recibe todos los contaminantes de las aguas residuales provenientes del tanque de almacenamiento donde se realiza la eliminación de la materia orgánica llegando al lecho 2 y 3 con menos concentración de contaminantes y por ello se da un mayor crecimiento como se puede apreciar, en el anexo 4 se encuentra más detallado diariamente los resultados de la medición.

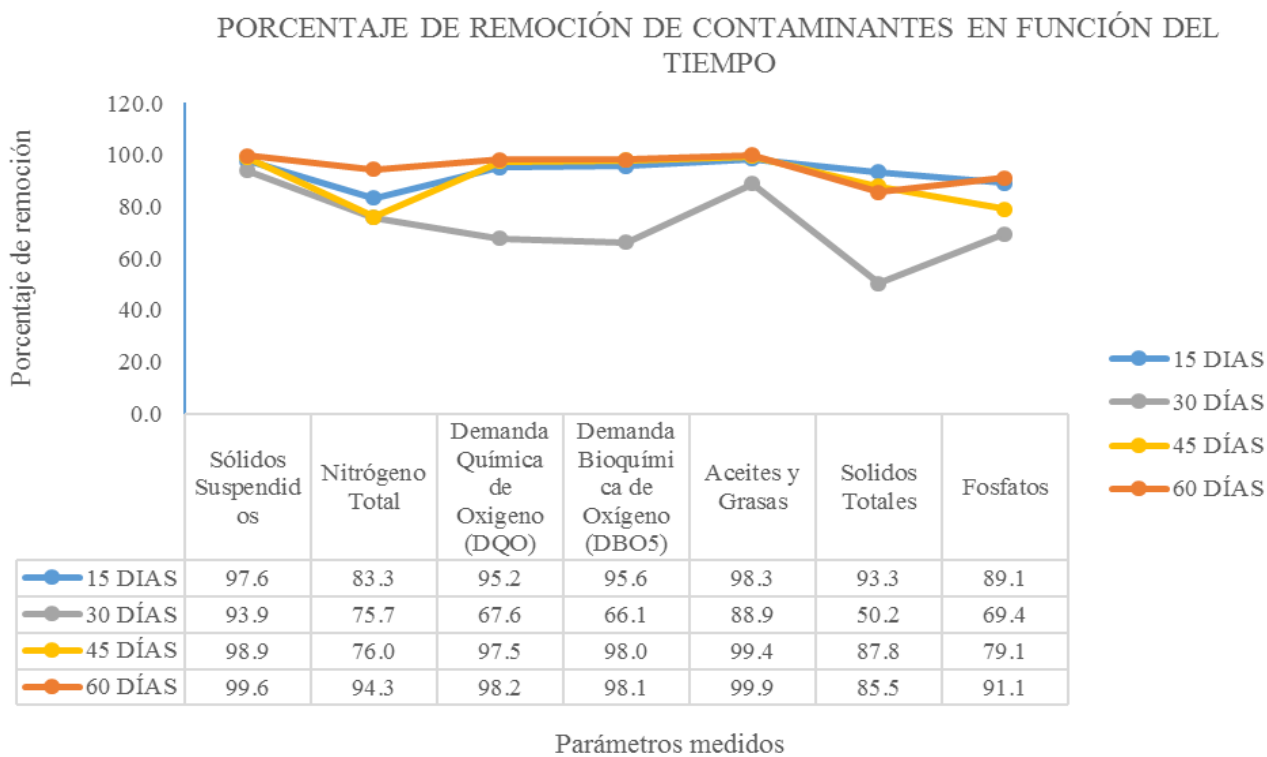
Tabla 3

*Resultados de altura de crecimiento diario promedio de las Totoras durante dos meses*

<b>CRECIMIENTO PROMEDIO ESPECIE VEGETAL TOTORA</b>	<b>PROMEDIO LECHO 1</b>	<b>PROMEDIO LECHO 2</b>	<b>PROMEDIO LECHO 3</b>	<b>UNIDADES</b>
Primera Semana	1.6	2.3	1.7	cm
Segunda Semana	3.2	7.8	3.8	cm
Tercera Semana	3.8	14.2	6.5	cm
Cuarta Semana	4.3	16.8	7.3	cm
Quinta Semana	4.8	18	8.3	cm
Sexta Semana	5.7	20.1	10	cm
Séptima Semana	8.7	23.5	14.7	cm
Octava Semana	12.2	26.5	18.3	cm

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.

Los porcentajes de remoción de contaminantes a los 15, 30, 45 y 60 días de funcionamiento fueron los que se muestra en la figura 6 donde se observa los resultados obtenidos luego del análisis realizado al efluente en el sistema de humedales artificiales con Totorá, aquí se puede evidenciar una mayor remoción de contaminantes a los 60 días del tratamiento esto se debe a que la especie vegetal ya pasó su etapa de maduración además del brote y crecimiento de nuevas especies por ello ya se encuentran realizando eficientemente los procesos de fitorremediación y depuración.



**Figura 6.** Porcentaje de remoción de contaminantes en función del tiempo.

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.

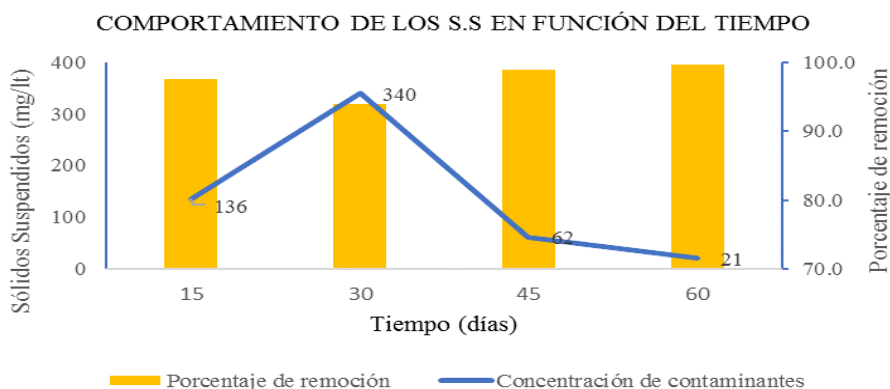
A continuación, se muestran detalladamente los resultados del comportamiento de cada uno de los parámetros analizados en función del tiempo, en la tabla 4 se observa el porcentaje de remoción de los Sólidos Suspendidos obtenido por el sistema de humedales artificiales empleando Totorá durante los días que se realizó el tratamiento.

Tabla 4

*Porcentaje de remoción de los Sólidos Suspendidos por la especie Schoenoplectus californicus (Totorá) en función del tiempo*

SOLIDOS SUSPENDIDOS (S.S)		
Tiempo (Días)	Resultado (mg/l)	%REMOCIÓN
15	136	97.6
30	340	93.9
45	62	98.9
60	21	99.6

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.



**Figura 7.** Comportamiento de los S.S. en función del tiempo.

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.

En la figura 7 se puede apreciar que la remoción de los Sólidos Suspendidos es mayor a 92 % durante los dos meses de experimentación, la causa por la que se obtuvieron estos altos

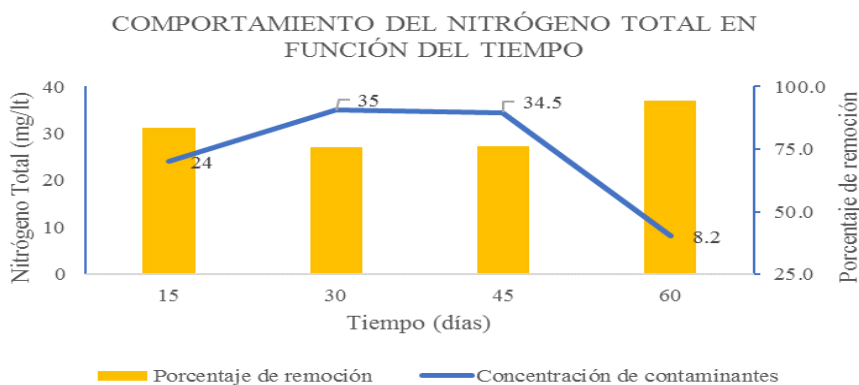
porcentajes de retención es por la utilización de grava de distinta granulometría como material de relleno y la baja velocidad de flujo en los lechos de los humedales además de la ayuda del tanque de almacenamiento que funcionó como fosa séptica que permitió la sedimentación de la materia orgánica en suspensión y su acumulación en el fondo de forma de lodos que se fueron descomponiendo anaeróbicamente, este proceso de descomposición se le denomina digestión (García & Corzo, 2010) y permite reducir el volumen de lodos gracias a la producción de gases, principalmente dióxido de carbono y metano.

Tabla 5

*Porcentaje de remoción del Nitrógeno total por la especie Schoenoplectus californicus (Totora) en función del tiempo*

NITRÓGENO TOTAL		
Tiempo (Días)	Resultado (mg/l)	%REMOCIÓN
15	24	83.3
30	35	75.7
45	34.5	76.0
60	8.2	94.3

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.



**Figura 8.** Comportamiento del nitrógeno total en función del tiempo.

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.

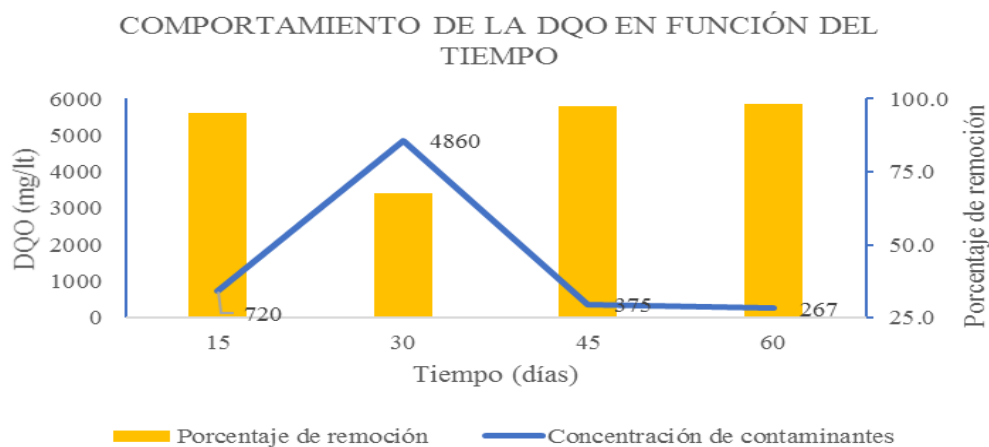
El comportamiento del nitrógeno total se aprecia en la figura 8 obteniendo una mayor remoción a los 60 días del tratamiento con un 94.3%, en los anteriores días de igual manera se observa un porcentaje de remoción mayor al 75% esto se debe a la comunidad bacteriana adherida al material de relleno la cual por las condiciones en que se encuentra distribuida en el primer lecho removi6 dicho elemento por procesos de nitrificaci6n/desnitrificaci6n como indica Suarez (2014), la remoci6n adicional se debe a las plantas presentes en el humedal en los lechos 2 y 3 las cuales toman el nitr6geno amoniaco para sus procesos metab6licos.

Tabla 6

*Porcentaje de remoci6n de la Demanda Qu6mica de Ox6geno (DQO) por la especie Schoenoplectus californicus (Tora) en funci6n del tiempo*

DEMANDA QU6MICA DE OX6GENO (DQO)		
Tiempo (D6as)	Resultado (mg/l)	%REMOCI6N
15	720	95.2
30	4860	67.6
45	375	97.5
60	267	98.2

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.



**Figura 9.** Comportamiento de la DQO en funci6n del tiempo.

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.

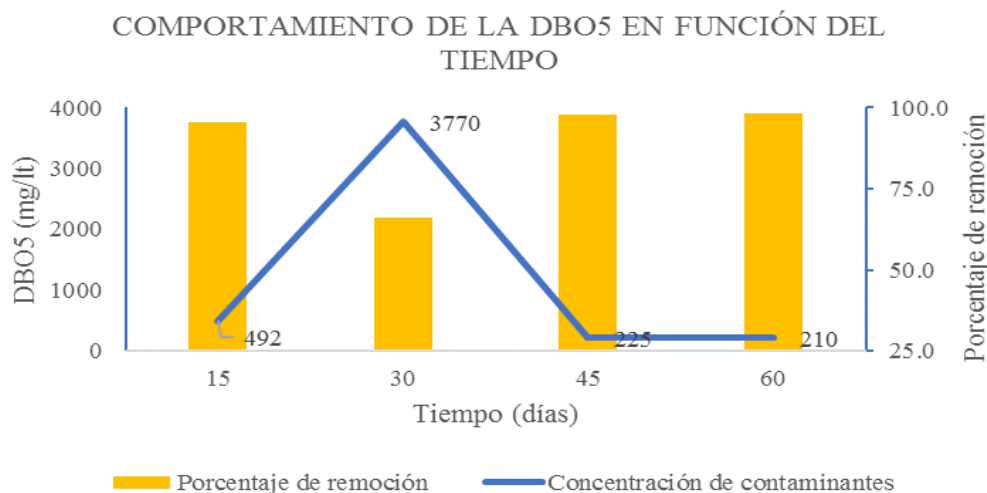
La figura 9 indica el grado de remoción de DQO en el sistema obteniéndose el mayor porcentaje a los 60 días del tratamiento con un 98.2 %, el análisis de los 30 días nos dio un resultado de 67.5% relativamente bajo debido a factores climáticos que se presentaron esos días con altas temperaturas en la mañana y lluvias constantes en horas de la tarde además que en dichos días no se pudo controlar con frecuencia el humedal ni el tiempo de retención hidráulica debido a los días de feriado nacional del 2 a 5 de Noviembre en donde no se facilitó el ingreso a la Universidad para monitorear el sistema, sin embargo durante los 45 y 60 días del tratamiento se obtuvo porcentajes de remoción mayores al 95 % esto se debe a los procesos de aireación mediante la deposición y filtración del agua en cada uno de los lechos y a los procesos de mineralización de materia orgánica que están siendo realizados por la biomasa adherida al material de relleno (grava) presente en el sistema lo que ayuda a una posterior aparición mejor asimilación de las plantas.

Tabla 7

*Porcentaje de remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) por la especie Schoenoplectus californicus (Totora) en función del tiempo*

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO <sub>5</sub> )		
Tiempo (Días)	Resultado (mg/l)	%REMOCIÓN
15	492	95.6
30	3770	66.1
45	225	98.0
60	210	98.1

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.



**Figura 10.** Comportamiento de la DBO<sub>5</sub> en función del tiempo.

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.

La remoción de materia orgánica en el sistema se muestra en la figura 10 en donde al igual que la DQO y los demás parámetros a los 30 días se obtuvo un menor porcentaje de remoción debido a factores climáticos, falta de monitoreo y control de los humedales, no obstante como se muestra el mayor porcentaje de remoción se obtuvo a los 60 días del tratamiento siendo un 98.1%, esto se debe a que las plantas ya pasaron su etapa de maduración se dio el brote y aparición de nuevas especies vegetales y así realizaron el proceso de fitorremediación de manera eficiente donde en el primer lecho la materia orgánica es descompuesta aeróbica y anaeróbicamente, luego en los lechos 2 y 3 los microorganismos presentes en las plantas igualmente ayudan a que la DBO siga siendo removida del agua residual.

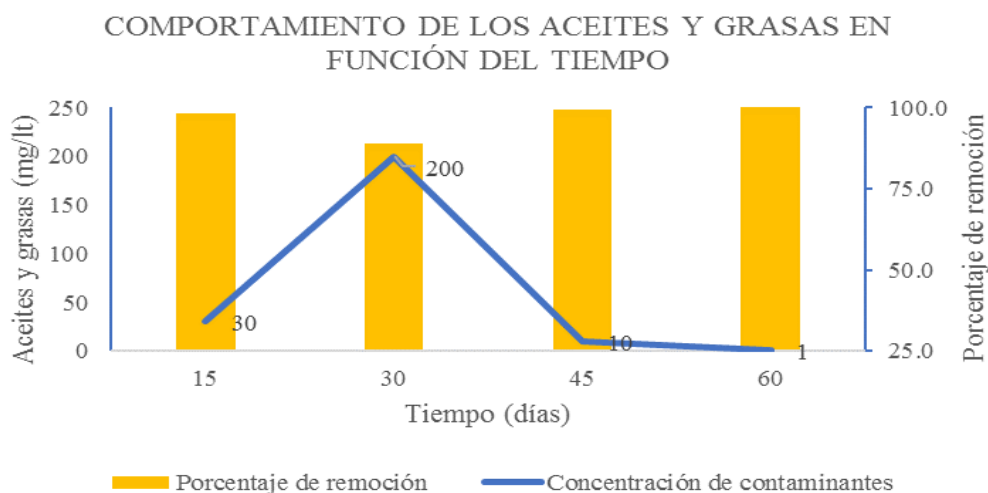
La materia orgánica particulada es retenida por filtración cerca de la entrada en sistemas horizontales (García & Corzo, 2010) y su degradación se da vía aeróbica cerca de la superficie del agua (en los primeros 0,05 m de profundidad) y en las zonas cercanas a las raíces.

Tabla 8

*Porcentaje de remoción de la Aceites y grasas por la especie Schoenoplectus californicus (Totora) en función del tiempo*

ACEITES Y GRASAS		
Tiempo (Días)	Resultado (mg/l)	%REMOCIÓN
15	30	98.3
30	200	88.9
45	10	99.4
60	1	99.9

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.



**Figura 11.** Comportamiento de los aceites y grasas en función del tiempo.

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.

La remoción de aceites y grasas se evidencia en la figura 11 donde se observa casi una totalidad de remoción a los 60 días con un 99.9% esto se debe a que antes de ingresar a los lechos de los humedales el tanque de almacenamiento cumple la función de tanque séptico y trampa de grasas ya que estas se quedan suspendidas en la parte superior para posteriormente en los lechos de los humedales y con la ayuda de los medios filtrantes y parámetros hidráulicos ser



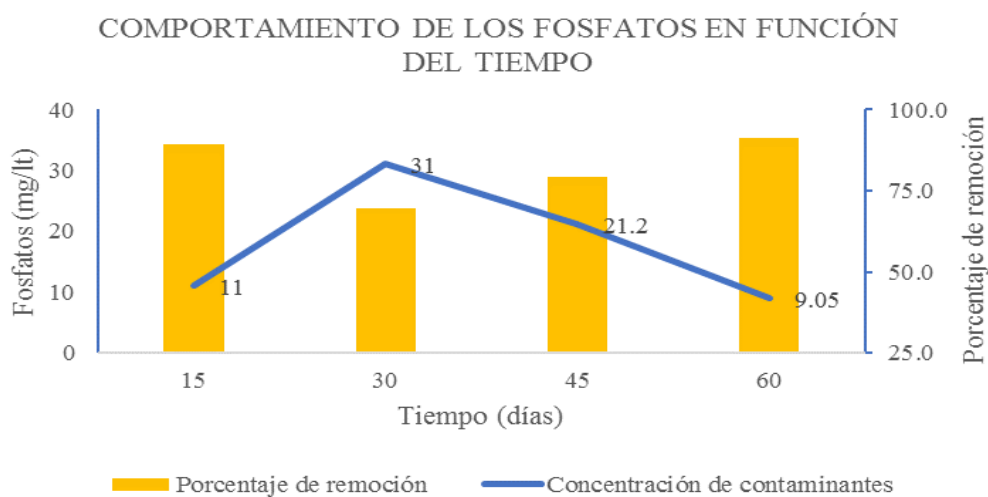
removidos casi en su totalidad, como ya se indicó anteriormente las empresas de productos lácteos poseen una gran cantidad de grasas por la materia prima utilizada en los procesos por lo que se puso mayor énfasis en la retención de estos contaminantes logrando así con la ayuda de los humedales artificiales una presencia casi nula de aceites y grasas en el agua tratada.

Tabla 9

*Porcentaje de remoción de los Fosfatos por la especie Schoenoplectus californicus (Totora) en función del tiempo*

FOSFATOS		
Tiempo (Días)	Resultado (mg/l)	%REMOCIÓN
15	11	89.1
30	31	69.4
45	21.2	79.1
60	9.05	91.1

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.



**Figura 12.** Comportamiento de los fosfatos en función del tiempo.

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.

La remoción de los fosfatos fue mayor en los 60 días de funcionamiento del humedal con un 91.1 % esto se debe a que un porcentaje de los contaminantes se fijaron en los lechos filtrantes y el resto fue asimilado por las plantas lo que nos da a entender que la dicha especie vegetal Totora es muy buena en eliminación de este compuesto ya que el fósforo es un macroelemento esencial para el crecimiento biológico de las plantas las cuales por posteriores procesos aeróbicos y anaeróbicos dan un alto porcentaje de remoción de fosfatos.

Los valores obtenidos por Hernández et al. (2010) en su investigación titulada “Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas” se muestran en la tabla 10 donde se evidencia un porcentaje de remoción con la especie *Hedychium montana* en el tercer módulo del DQO de 88,5% y DBO de 81,8%, dichos valores se comparó en la Tabla 13 con los resultados obtenidos de los análisis de aguas realizados a los 15, 30, 45 y 60 días de tratamiento mediante el sistema piloto con la especie vegetal Totora.

Tabla 10

*Resultados del porcentaje de remoción de contaminantes de la especie “Hedychium montana” a los 30 días en el tercer módulo del sistema piloto obtenidos por Hernández et al. (2010)*

<b>PARÁMETROS</b>	<b>% DE REMOCIÓN</b>
<b>Sólidos Suspendidos</b>	97.5
<b>Nitrógeno Total</b>	95.2
<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</b>	88.5
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)</b>	81.8

<b>Sólidos Totales</b>	97.9
<b>Fosfatos</b>	90.5
<b>Sulfatos</b>	84.2

Adaptado de S. Arias, F. Betancur, G. Gómez, J. Salazar, M. Hernández (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcina.

Los mejores resultados de remoción de contaminantes en el sistema piloto fue después de los 60 días de funcionamiento donde después de tomar la cuarta muestra de análisis del agua residual tratada en el humedal con Totorá se obtuvieron los resultados reflejados en la tabla 11, donde podemos evidenciar una considerable reducción de DQO (267 mg/l) y DBO (210 mg/l) llevándonos a la conclusión de que el sistema se encuentra funcionando de manera eficiente logrando obtener un porcentaje de remoción del DQO de 98,2 % y DBO de 98.1 %.

El contaminante que tuvo un mayor porcentaje de remoción fueron las grasas y aceites con un 99% a los 60 días de tratamiento, en cambio el que obtuvo el menor porcentaje de retención y remoción fue el de los Sólidos Totales como muestra tabla 11 con un 85.5% y un 50% a los 30 días como muestra la figura 6, esto se debió a que no se implementó un pre-tratamiento con procesos físicos como un desarenador y una rejilla que permitiría la retención de los sólidos de grandes tamaños (rocas mayores a 60mm, ramas) y logrando así disminuir el porcentaje de retención de los mismos, por lo cual es conveniente que en Humedales a escala real siempre se implementen todos los procesos unitarios a fin de obtener mayores eficiencias de estos sistemas.

Tabla 11

*Resultados del Análisis Químico del efluente a los 60 días del agua tratada de la Industria láctea “San Salvador” en el sistema piloto de Humedales Artificiales empleando Totorá*

PARÁMETROS ANALIZADOS	UNIDADES	*MÉTODO	**LÍMITES	RESULTADOS	% DE REMOCIÓN	OBSERVACIONES
<b>Sólidos Suspendidos</b>	mg/l	2540-B	-	21	99.6	-
<b>Nitrógeno Total</b>	mg/l	-	60	8.2	94.3	Si Pasa (✓)
<b>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</b>	mg/l	5202-C	500	267	98.2	Si Pasa (✓)
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)</b>	mg/l	5210-B	250	210	98.1	Si Pasa (✓)
<b>Aceites y Grasas</b>	mg/l	Extracción con solvente	70	1	99.9	Si Pasa (✓)
<b>Sólidos Totales</b>	mg/l	2540-D	1600	1180	85.5	Si Pasa (✓)
<b>Fosfatos</b>	mg/l	-	15	9.05	91.	Si Pasa (✓)

\*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF 21 ed.

\*TULSMA TABLA 9. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público.

Fecha de análisis: 22 de Diciembre del 2017, Fecha de entrega de resultados: 27 de Diciembre del 2017

Adaptado de Laboratorio de Servicios Químicos y Microbiológicos en aguas y alimentos, Dra Gina Álvares R.

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.

El porcentaje de remoción de la DBO<sub>5</sub> y DQO fue más del 95 % en ambos casos debido a la deposición y filtración en el sistema SFS donde esta materia orgánica sedimentable es descompuesta aeróbica o anaeróbicamente dependiendo del oxígeno disponible (Hernández, 2010) así mismo el resto de la DBO que se encuentra en estado disuelto o en forma coloidal continúa siendo removida del agua residual al entrar en contacto con los microorganismos que crecen en el sistema encontrándose ya dentro de los límites de descarga al sistema de

alcantarillado público a pesar de que su concentración inicial era sumamente alta superando los 10000 mg/l, todos los demás parámetros de interés sanitario como son los Sólidos Suspendidos, Nitrógeno total, Aceites y grasas, Solidos Totales y Fosfatos también lograron disminuir más de un 80%.

Tabla 12

*Comparación de resultados del porcentaje de remoción de contaminantes obtenidos por Hernández et al. (2010) y esta investigación con Humedales Artificiales empleando Totorá*

<b>PARÁMETROS</b>	<b>% De Remoción a los 30 días con <i>Hedychium montana</i> (Matandrea)</b>	<b>% De Remoción a los 60 días con <i>Schoenoplectus californicus</i> (Totorá)</b>
Sólidos Suspendidos	97.5	99.6
Nitrógeno Total	95.2	94.3
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	88.5	98.2
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	81.8	98.1
Aceites y grasas	-	99.9
Solidos Totales	97.9	85.5
Fosfatos	90.5	91.1

**Elaborado por:** Guerra S. Bryan G.

Después de analizar los resultados de remoción de la especie *Hedychium montana* y los que se obtuvo en el sistema piloto con *Schoenoplectus californicus* (Tabla 12) se constató que la especie vegetal Totorá, con ayuda de los medios filtrantes (Grava de distinta granulometría), los

parámetros hidráulicos (Tuberías y válvulas instaladas en el sistema) y el control que se le dio al sistema contribuyeron a que los valores de los contaminantes se redujeran considerablemente y logrando obtener un mayor porcentaje de remoción de materia orgánica que el artículo en comparación de Hernández *et al.* (2010) a excepción del nitrógeno que fue menor porcentaje, algo importante a destacar es que el diseño y construcción de la unidad piloto fue realizada técnicamente y de manera muy controlada y supervisada por el tutor de la investigación, por otra parte la implementación del tanque de almacenamiento sirvió y funcionó como tanque sedimentador y trampa de grasas ya que se observó que las grasas y sólidos de baja densidad quedaron suspendidos en la parte superior y los sólidos por el contrario se quedaron en la parte inferior del tanque realizando un proceso de digestión en un tratamiento primario con lo cual permitió que únicamente el flujo del agua pase al primer lecho del humedal y una vez allí los medios filtrantes y el proceso de fitorremediación de la especie vegetal contribuyeron a la depuración de las aguas residuales de la industria láctea.

## 8. DISCUSIÓN

Se conoce que los humedales artificiales (HA) son utilizados para aguas residuales de tipo municipales y de origen industrial, dando resultados de remoción de la DQO hasta de 95.73% en estiaje de y 90.2% en temporada de lluvias (Romero et al., 2009), por lo cual el estudio fue comparativo y comprobado experimentalmente evaluando los resultados obtenidos por Hernández et al. en su artículo “Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcina” en el cual después de varias pruebas obtuvieron que la planta que dio mejores resultados de remoción fue la *Hedychium montana* “Matandrea” originaria de Colombia, dichos resultados se muestran en las tablas anteriores.

Se basó entonces en el sistema piloto del autor citado, con las mismas condiciones hidráulicas y lechos filtrantes, se varió las dimensiones y la vegetación, tomando en cuenta que los contaminantes de la industria láctea son distintos, se obtuvieron los porcentajes de remoción a los 15, 30, 45 y 60 días los mismos que se mostraron en las tablas de anteriores, éstas nos dan resultados similares de remoción en el caso de los Solidos Totales y suspendidos con valores mayores al 85%, pero en el caso de la “Totora” se obtuvo un porcentaje de remoción de DBO5 del 98.1 % frente al 81.8 % al utilizar la “Matandrea”, y del DQO del 98.2 % superior al 88.5 % que se obtuvo en la investigación anterior.

Un análisis en cuanto al sistema piloto construido y que se desarrolló en el proyecto se puede aseverar que al ser un área más reducida se necesita controlar el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) para que las plantas pasen su etapa de maduración y realicen el proceso de fitorremediación de manera satisfactoria, no es recomendable que el flujo en el sistema piloto se deje abierto como en el caso de los humedales convencionales (área muy grande) en donde se

observa que el caudal abastece toda la superficie de la especie vegetal, en cambio en el sistema piloto a escala sabiendo que el área es menor, el caudal y el flujo tienden a evacuar de manera rápida sin que las raíces de las plantas absorban los nutrientes necesarios para depurar el agua, dicho esto y comprobando con esta investigación se puede aseverar que para obtener una buena eficiencia de los humedales artificiales es necesario que sean diseñados correctamente mediante cálculos hidráulicos, que sean monitoreados y controlados constantemente con el fin de obtener resultados de depuración esperados.

El THR que se obtuvo en el sistema piloto fue de 33.9 horas el cual se fijó en 1 día y medio, este es un aspecto a tomar en cuenta ya que al principio del funcionamiento del humedal su control es muy importante porque las raíces de las plantas aún no han madurado por completo por ende no logran captar los nutrientes, ya después de un tiempo de maduración de un mes la especie vegetal ya se ha adaptado a su nuevo hábitat y distintos contaminantes y se desarrollan de mejor manera para lo cual las raíces ya absorben los nutrientes de manera satisfactoria.

Pese a que el grado de contaminantes de la industria láctea son mayores en cuanto a materia orgánica en comparación con la industria porcina se obtuvieron resultados superiores de remoción de la carga orgánica debido a que la especie vegetal Totorá al ser una planta autóctona de la zona se adapta bien a los cambios de temperatura y realiza un buen proceso de fitorremediación y al ser correctamente combinadas con los lechos filtrantes ayudó a la remoción casi del 100% de sólidos suspendidos, grasas y aceites, otro factor que pudo influir en los resultados obtenidos es la cantidad de plantas utilizadas (25 en el primer lecho, 30 en el Segundo y 35 en el tercero) el constante monitoreo de los caudales, los parámetros hidráulicos de



disposición de las tuberías y válvulas de desagüe en el sistema lo que permitió un buen control del tiempo de retención hidráulica en cada módulo.

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con la investigación realizada se logró obtener el porcentaje de remoción de contaminantes de la especie vegetal *Schoenoplectus californicus* (Totora) mediante una experimentación en un sistema piloto verificando así que los humedales artificiales son sistemas altamente eficientes, estéticamente atractivos y económicamente ventajosos para el tratamiento de aguas residuales industriales lácteas como se demostró en este estudio y que no solo se pueden utilizar en aguas residuales urbanas sino industriales donde se produce un grado más alto de contaminantes.

Con el análisis de los resultados de remoción de contaminantes de interés sanitario por parte de la especie vegetal, los medios filtrantes, los parámetros hidráulicos (tuberías y válvulas instaladas en el sistema) y el control que se le dio al sistema se constató que los valores de contaminantes se redujeron considerablemente con lo cual se obtuvo mejores resultados de remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO, Sólidos en suspensión, fosfatos y aceites en comparación con el estudio anterior realizado en Colombia al utilizar la especie vegetal *Hedychium montana*.

Para realizar la experimentación se construyó un sistema piloto controlado de manera técnica con modelos a escala en los cuales se colocó medios filtrantes como grava de distinta granulometría el mismo que debe ser limpio, exento de finos contaminantes, homogéneo, durable y la especie vegetal *Schoenoplectus californicus* (Totora) con lo cual se evidenció que los

humedales son una buena solución para depuración de aguas residuales industriales convirtiéndose en una alternativa sustentable al lograr minimizar el daño o impacto ambiental.

Se realizó gráficos y análisis comparativos de la disminución de contaminantes en función del tiempo y mediante esto concluimos finalmente que los humedales artificiales con esta especie vegetal resultan ser una buena opción para depurar la descarga de aguas residuales proveniente de una industria de productos lácteos en una zona con clima templado-frío siempre y cuando sean correctamente diseñados, construidos y monitoreados ya que se obtuvo altos resultados de depuración y se logró cumplir con los límites establecidos de contaminación por la normativa local de descarga a alcantarillado público.

Con la investigación realizada se complementa el vacío que se tiene de técnicas de depuración mediante humedales con plantas autóctonas (Totorá) en la industria láctea ya que ésta genera cantidades significativas y altos índices de residuos líquidos y que la descarga de éstos sin tratamiento previo se convierte en un gran foco contaminante, por lo cual se evaluó esta alternativa de depuración de bajo costo pero con la obtención de resultados satisfactorios y así dando la posibilidad de que las industrias puedan a futuro implementar y realizar un diseño con esta técnica de tratamiento de aguas.

Como recomendación se propone que en investigaciones futuras se realicen nuevos estudios de tratamiento de aguas donde evalúen más tipos de suelos, medios filtrantes y con otras especies vegetales de distintas zonas para demás industrias.

Para procesos de reutilización de agua residual se plantea realizar estudios futuros sobre tratamientos terciarios de desinfección y cloración para que el caudal de agua tratada pueda ser utilizada en procesos agrícolas u otras actividades.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias Martínez S., Betancur Toro F., Gómez Rojas G. & Hernández M. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcina. *Informador Técnico (Colombia)*, 12-22.
- Buenaño Dávalos, M. (2015). *Propuesta de una planta de tratamiento de aguas residuales de una empresa envasadora de leche del cantón Rumiñahui para que cumpla con la norma técnica ambiental (T.U.L.A.S)* (Tesis de grado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Carrasco Cobos, J., Cayambe Yambay, B. (2017). *Diseño del Sistema del Alcantarillado Sanitario, Planta de Tratamiento de Aguas Residuales con Sistema Wetland Subsuperficial Horizontal para la Parroquia San Gerardo del Cantón Guano de la Provincia de Chimborazo*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Casierra Martínez, H., Casalins Blanco, J., Vargas Ramírez, X., & Caselles Osorio, A. (2016). Desinfección de agua residual doméstica mediante un sistema de tratamiento acoplado con fines de reúso. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 97-112.
- Dayna Yocum. (2012) *Manual de Diseño: Humedal Construido para el Tratamiento de las Aguas Grises por Biofiltración*, Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara.
- García Serrano, J., & Corzo Hernandez, A.(2010). *Depuración con Humedales Construidos*. Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de: [http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/2474/JGarcia\\_and\\_ACorzo.pdf?sequence=1](http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/2474/JGarcia_and_ACorzo.pdf?sequence=1).
- Herrera Perez, J. & Muñoz Chafla J.,(2017). *Reutilización de aguas residuales provenientes de comunidades rurales en actividades agrícolas*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

- Hoekstra A. (2010). The water footprint: water in the supply chain. *The environmentalist*, 12-13.
- Huertas R., Marcos C., Ibarguren N. & Ordás S.(2012) *Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Valladolid: Confederación Hidrográfica del Duero (CHD).
- Lara Borrero, J. A. (1999). *Depuración de aguas residuales Municipales con humedales artificiales*. Barcelona, España, 122 p. Trabajo final (Título Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental). Universidad Politécnica de Cataluña. Instituto Catalán de Tecnología.
- Llanos Campaña, D. M. (2013). *Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria de productos lácteos "Píllaro" ubicada en el cantón Píllaro-Provincia de Tungurahua*. (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- López, D., Jorquera, C., Vidal, G., & Vera, I. (2016). Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: reflexiones. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Mayo-Junio, 19-35.
- Macas Paguay, J. (2013). *Diseño del sistema de tratamiento y reutilización del agua residual en la planta de lácteos Espoch*. (Tesis de grado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Muñoz Paredes, J. F., & Ramos Ramos, M. (2014). Reactores discontinuos secuenciales: Una tecnología versátil en el tratamiento de aguas residuales. *Revista de Ciencia e Ingeniería* , 49-66.
- Ramalho , R. S. (2003). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Barcelona: Editorial Reverté, S. A.
- Romero Aguilar M., Colin Cruz A., Sanchez Salinas E. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista internacional de contaminación ambiental* , 157-167.

Suárez A., Agudelo N., Rincón J., Millán N. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Mutis* 4(1), 8-14.

TULSMA. (n.d.). NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES: RECURSO AGUA. Libro VI. Anexo 1. Tabla 9. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público

Zamora Carillo, M. (2011). *Caracterización de los parámetros de calidad del agua desalojada por la empresa de productos lácteos Marco's con el fin de disminuir su contaminación en el cantón Píllaro, Provincia de Tungurahua* (Tesis de grado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.

## 10. ANEXOS

**10.1. Anexo 1.-** Plano con diseño y parámetros hidráulicos del sistema piloto de humedales artificiales con totora.

10.2. **Anexo 2.-** Cálculos hidráulicos del sistema piloto con humedales artificiales basados en el diseño de Lara (1999) y Hernández (2010).

Tabla 13

*Parámetros físicos y variables para el diseño de la unidad piloto de humedales artificiales*

Parámetros		Valores		
DBOa	11120 mg/lt	n	0.35	
EDBOs	75 %	Temperatura	18 °C	
DBOe	2780 mg/lt	Q	Calcular	K20 1.104
SSt	2224 mg/lt	L	0.55 m	
M	0.001	W	0.38 m	
Y	0.2 m	As	0.651 m <sup>2</sup>	

Adaptado de Hernández et al. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas

Donde:

- kt: Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura,  $d^{-1}$ .
- T: Temperatura.
- DBOa: Concentración DBO<sub>5</sub> a la entrada al sistema.
- EDBO<sub>5</sub>: Eficiencia requerida de % remoción DBO<sub>5</sub>
- DBOe: Concentración DBO<sub>5</sub> a la salida del sistema.
- Q: Caudal.
- m: Pendiente.
- y: Profundidad del humedal
- n: Porosidad
- w: Ancho
- L: Largo
- As: Área superficial

### Procedimiento de cálculo:

Antes de iniciar se debe señalar que el procedimiento de cálculo para el diseño de un humedal artificial se parte de un caudal conocido, se diseña se calculan las dimensiones geométricas de largo y ancho de los lechos de las celdas mediante la Ley de Darcy  $Q = k_s \cdot A_s \cdot s$  donde “ $k_s$ ” es la conductividad hidráulica de los agregados del sistema, “ $A_s$ ” la superficie del humedal y “ $s$ ” la gradiente hidráulica o pendiente que describe el régimen del flujo en un medio poroso, pero como en el caso de estudio es un Sistema piloto a escala de humedales se partirá de un Área Superficial conocida de  $0,651 \text{ m}^2$  (Hernández, 2010) y se calculará el caudal necesario de ingreso al sistema y el tiempo de retención hidráulica en cada módulo mediante la ecuación del  $A_s$  para un dimensionamiento Biológico.

- Primeramente, calculamos la constante de reacción de primer orden ( $kt$ ) según la temperatura del agua residual que fue igual a  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$kt = k_{20} * 1,06^{(T_a - 20)} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$kt = 1,104 * 1,06^{(18 - 20)}$$

$$kt = 0,983 \text{ d}^{-1}$$

- De la fórmula del área superficial ( $A_s$ ) para un dimensionamiento biológico, despejamos y calculamos el caudal ( $Q$ ) de entrada al sistema, con el  $A_s$  conocida de  $0.651 \text{ m}^2$ :

$$As = \frac{Q * (\ln DBOa - \ln DBOe)}{kt * y * n} \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$Q = \frac{As * kt * y * n}{(\ln DBOa - \ln DBOe)}$$

$$Q = \frac{0,651 * 0,983 * 0,20 * 0,35}{(\ln 11120 - \ln 2780)}$$

$$Q = 0,032 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$Q = 32,30 \text{ lt/día}$$

Nota: Se tomó la decisión de incrementar el caudal calculado de 32,20 lt/día a 50 lt/día ó 2,1 lt/hora a partir de la cuarta semana del tratamiento debido a que se verificó en campo que dicho caudal calculado no abastecía a la especie vegetal de los humedales ya que estas empezaron a secarse.

- Se calculó el tiempo de retención hidráulica (THR) con el caudal obtenido:

$$THR = \frac{As * y * n}{Q} \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$THR = \frac{0,651 * 0,20 * 0,35}{0,032}$$

$$THR = 1,411 \text{ días} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} = 33,86 \text{ horas}$$

El tiempo de retención hidráulica se fijó en un día y medio.

- Finalmente se calculó el diámetro de la tubería de conducción, usando la ecuación de continuidad, con una velocidad en el sistema de 200 cm/min:

$$Q = A * V \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$A = \frac{22,429 \text{ cm}^3/\text{min}}{200 \text{ cm/min}}$$

$$A = 0,112 \text{ cm}^2$$



$$\text{Diametro} = 0,38 \text{ cm } \acute{o} \text{ 3.8mm}$$

Se asume un diámetro de tubería de  $\frac{3}{4}$  de pulgada o 19mm el mismo que las válvulas de control.

- Una vez realizada la experimentación durante los 60 días planteados para calcular el porcentaje de remoción de cada contaminante en el sistema piloto se procedió a realizar el siguiente proceso:

DOB<sub>5</sub> a los 60 días de tratamiento = 210 mg/l

DOB<sub>5</sub> al inicio del tratamiento = 11120 mg/l

$$\% \text{ De Remoción} = \frac{\left(11120 - 210 \frac{\text{mg}}{\text{lt}}\right) * 100}{11120 \frac{\text{mg}}{\text{lt}}}$$

$$\% \text{ De Remoción} = 98.11$$

## 10.3. Anexo 3.- Huella hídrica de diferentes productos (Hoekstra, 2010)

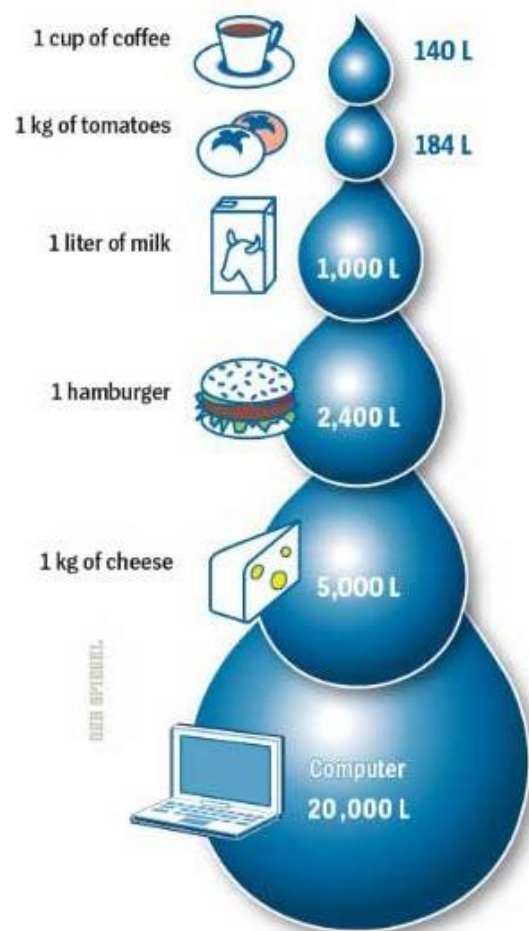
**The water footprint of different commodities**

Commodity	Unit	Global average water footprint (litres)
Apple or pear	1 kg	700
Banana	1 kg	860
Beef	1 kg	15,500
Beer (from barley)	1 glass of 250 ml	75
Bio-diesel from soybean	1 litre	14,000
Bio-ethanol from maize	1 litre	2,600
Bio-ethanol from sugar beet	1 litre	1,400
Bio-ethanol from sugar cane	1 litre	2,500
Bread (from wheat)	1 kg	1,300
Cabbage	1 kg	200
Cheese	1 kg	5,000
Chicken	1 kg	3,900
Chocolate	1 kg	24,000
Coffee	1 cup of 125 ml	140
Cotton	1 shirt of 250 gram	2,700
Cucumber or pumpkin	1 kg	240
Dates	1 kg	3,000
Eggs	one 60-gram egg	200
Goat meat	1 kg	4,000
Groundnuts (in shell)	1 kg	3,100
Leather (bovine)	1 kg	17,000
Lettuce	1 kg	130
Maize	1 kg	900
Mango	1 kg	1,600
Milk	1 glass of 250 ml	250
Pork	1 kg	4,800
Potato	1 kg	250
Rice	1 kg	3,400
Lamb	1 kg	6,000
Sugar (from sugar cane)	1 kg	1,500
Sugar (from sugar beet)	1 kg	935
Tea	1 cup of 250 ml	30
Tomato	1 kg	180
Wine	1 glass of 125 ml	120

Source: Water Footprint Network ([www.waterfootprint.org](http://www.waterfootprint.org))

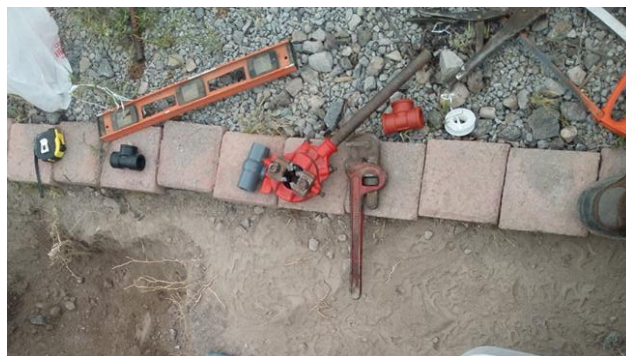
**Calculating Water Footprints**

How much water is needed, either used or polluted, to make common consumer goods



10.4. **Anexo 4.-** Proceso constructivo del sistema piloto de humedales artificiales con Totora

1. Primeramente, se realizó una limpieza y se estableció un lugar de trabajo, en esta etapa se retiró la vegetación y objetos existentes que se encontraban en el sitio donde se construyó el sistema piloto para finalmente obtener una plataforma libre y plana de trabajo, además se transportó todos los componentes hidráulicos (válvulas, tuberías, accesorios)



2. Una vez definida la plataforma de trabajo se realizó el replanteo según las dimensiones y especificaciones del diseño original, para esto se utilizó indicadores (estacas, varillas) que señalaron los puntos más importantes, estos a su vez sirvieron para marcar las cotas y alturas de la excavación para posteriormente determinar las pendientes.



3. Definido ya en el terreno donde irá cada elemento del humedal se procedió a excavar y rellenar según fue el caso, dicha excavación se realizó manualmente y se procuró hacer una limpieza de la superficie en especial del tercer lecho dejando a manera de talud para evitar el desprendimiento de tierra y que caiga dentro del lecho.



4. Terminada la excavación se comprobó las dimensiones según el diseño y se procedió a la nivelación y colocación de las gavetas plásticas, ésta fue una actividad muy importante ya que una incorrecta nivelación provocará que en los lechos el agua circule a mayor o menor velocidad y por una sola zona lo que disminuirá la eficiencia para la cual fue diseñado el humedal.



5. Se realizó rosca en cada tubería con ayuda de una tarraja para facilitar su unión, se colocó teflón y realizaron las conexiones dentro de las gavetas plásticas, al utilizar dichas gavetas como cada lecho del sistema se evitó el método tradicional que se hace en humedales a escala real que la impermeabilización con capas de geomembrana, este proceso es importante para evitar la filtración de las aguas residuales hacia el suelo.



6. Se procedió a colocar los sistemas de distribución y recogida como son las tuberías de  $\frac{3}{4}$  pulgada de diámetro según el diseño, en estas se hicieron huecos de 5mm a manera de flauta para que el flujo circule equitativamente al ingreso y salida de cada uno de los lechos, la instalación de las tuberías y válvulas de control se realizó cuidadosamente, dichas válvulas ayudarán al control y medición del caudal el control del tiempo de retención hidráulica y cuando se requiera dar un mantenimiento del sistema.



7. Una vez obtenido el material granular de la mina de “Cerro Negro” se realizó una distribución granulométrica para obtener un tamaño nominal exacto de los agregados que fueron utilizados en el sistema, se utilizó agregados de tres tamaños  $\frac{1}{4}$ ”,  $\frac{1}{2}$ ”, 1” (ver Anexo 1) posteriormente se lavó el material para evitar que este al momento de colocar este completamente limpio y libre de finos, se evitó el uso de arena debido a que esta produce un taponamiento de las tuberías de distribución.



8. Se relleno cada gaveta con los tres tipos de agregados según las especificaciones del diseño, comenzando con el de mayor tamaño al inicio del lecho junto a la tubería tipo flauta de distribución, se construyó una caja de revisión al final del humedal donde se tomaron las muestras del agua tratada y se continuó con una conexión del sistema con tuberías y accesorios hacia el pozo de alcantarillado sanitario.



9. La vegetación *Schoenoplectus californicus* (Totoras) se seleccionó y trasplantó del sector aledaño de Cubijés por la gran abundancia que presenta dicho sector, se insertaron y enraizaron realizando pequeños agujeros manualmente que después fueron tapados con el agregado más fino, cabe recalcar que la especie fue trasplantada al lecho previamente preparado con raíces que tenían una longitud entre 10 a 15 cm y altura de la planta entre 1.50 a 2 m, para efectos de transporte se procedió a su corte dejando la especie aproximadamente en 40 cm, se recomienda realizar este proceso de trasplantado y no de sembrado in situ a partir de semillas en el humedal para evitar un estricto control del agua, el tiempo de maduración y crecimiento inicial de la planta ya que por investigaciones previas (García & Corzo, 2010) se necesita entre 2 a 3 meses para que la especie madure y empiece con el proceso de remoción de contaminantes.



10. Una vez se ha realizado la plantación es conveniente que el agua esté uno o dos centímetros por encima del nivel del medio granular para evitar el crecimiento de malas hierbas. Luego, cuando los vegetales han alcanzado un buen desarrollo, el nivel se sitúa a 5 centímetros por debajo de la superficie del medio granular (este es el nivel con el que se opera habitualmente). (García & Corzo, 2010), finalmente se puso en funcionamiento el sistema piloto el cual se monitoreo contantemente el caudal de entrada y el crecimiento diario de la especie vegetal para evitar complicaciones y se espero los resultados de la experimentación realizada.





### 10.5. Anexo 5.- Altura de crecimiento diario de la especie vegetal Totora.

Tabla 14

*Altura de crecimiento diario de la especie vegetal totora durante un mes*

<b>DIAS</b>	<b>FICHAS</b>	<b>FECHAS</b>	<b>PROMEDIO LECHO 1</b>	<b>PROMEDIO LECHO 2</b>	<b>PROMEDIO LECHO 3</b>	<b>UNIDADES</b>
Día 1	Ficha 1	Viernes 13/Oct	42.8	40.2	39.7	cm
Día 4	Ficha 2	Lunes 16/ Oct	43.0	40.2	39.7	cm
Día 5	Ficha 3	Martes 17/ Oct	43.8	41.2	40.3	cm
Día 6	Ficha 4	Miércoles 18/ Oct	44.1	41.2	40.7	cm
Día 7	Ficha 5	Jueves 19/ Oct	44.2	41.3	41.0	cm
Día 8	Ficha 6	Viernes 20/ Oct	44.4	42.5	41.3	cm
<b>CRECIAMIENTO PROMEDIO EN UNA SEMANA</b>			<b>1.6</b>	<b>2.3</b>	<b>1.7</b>	<b>cm</b>
Día 11	Ficha 7	Lunes 23/ Oct	44.8	43.3	41.8	cm
Día 12	Ficha 8	Martes 24/ Oct	45.3	43.7	42.4	cm
Día 13	Ficha 9	Miércoles 25/ Oct	45.6	44.3	42.6	cm
Día 14	Ficha 10	Jueves 26/ Oct	45.8	45.2	43.5	cm
Día 15	Ficha 11	Viernes 27/ Oct	45.9	45.8	43.5	cm
Día 18	Ficha 12	Lunes 30/ Oct	46.0	48.0	43.5	cm
<b>CRECIAMIENTO PROMEDIO EN DOS SEMANAS</b>			<b>3.2</b>	<b>7.8</b>	<b>3.8</b>	<b>cm</b>
Día 19	Ficha 13	Martes 31/ Oct	46.1	49.2	43.7	cm
Día 20	Ficha 14	Miércoles 01/Nov	46.1	50.0	45.3	cm
Día 25	Ficha 15	Lunes 06/ Nov	46.4	53.4	46.0	cm
Día 26	Ficha 16	Martes 07/ Nov	46.7	54.4	46.2	cm
<b>CRECIAMIENTO PROMEDIO EN TRES SEMANAS</b>			<b>3.8</b>	<b>14.2</b>	<b>6.5</b>	<b>cm</b>
Día 27	Ficha 17	Miércoles 8/ Nov	46.7	55.0	46.3	cm
Día 28	Ficha 18	Jueves 9/ Nov	46.7	55.0	46.3	cm
Día 29	Ficha 19	Viernes 10/ Nov	46.7	56.0	46.5	cm
Día 32	Ficha 20	Lunes 13/ Nov	46.8	56.7	46.7	cm
Día 33	Ficha 21	Martes 14/ Nov	47.0	56.7	47.0	cm
Día 34	Ficha 22	Miércoles 15/ Nov	47.2	57.0	47.0	cm

<b>CRECIAMIENTO PROMEDIO EN CUATRO SEMANAS</b>	<b>4,3</b>	<b>16,8</b>	<b>7,3</b>	<b>cm</b>
--	------------	-------------	------------	-----------

Elaborado por: Guerra S. Bryan G.

Tabla 15

*Altura de crecimiento diario de la especie vegetal totora durante dos meses.*

<b>DÍAS</b>	<b>FICHAS</b>	<b>FECHAS</b>	<b>PROMEDIO LECHO 1</b>	<b>PROMEDIO LECHO 2</b>	<b>PROMEDIO LECHO 3</b>	<b>UNIDADES</b>
Día 35	Ficha 23	Jueves 16/Nov	47,2	57,2	47,2	cm
Día 36	Ficha 24	Viernes 17/ Nov	47,3	57,2	47,3	cm
Día 37	Ficha 25	Lunes 20/ Nov	47,3	58,2	47,5	cm
Día 40	Ficha 26	Martes 21/ Nov	47,5	58,2	47,7	cm
Día 41	Ficha 27	Miércoles 22/ Nov	47,7	58,2	47,8	cm
Día 42	Ficha 28	Jueves 23/ Nov	47,7	58,2	48,0	cm
<b>CRECIAMIENTO PROMEDIO EN CINCO SEMANAS</b>			<b>4,8</b>	<b>18</b>	<b>8,3</b>	<b>cm</b>
Día 43	Ficha 29	Viernes 24/ Nov	47,7	58,2	48,0	cm
Día 46	Ficha 30	Lunes 27/ Nov	48,0	58,3	48,3	cm
Día 47	Ficha 31	Martes 28/ Nov	48,2	58,7	48,7	cm
Día 48	Ficha 32	Miércoles 29/ Nov	48,2	58,8	48,7	cm
Día 49	Ficha 33	Jueves 30/ Nov	48,3	59,0	49,2	cm
Día 50	Ficha 34	Viernes 01/ Dic	48,5	60,3	49,7	cm
<b>CRECIAMIENTO PROMEDIO EN SEIS SEMANAS</b>			<b>5,7</b>	<b>20,1</b>	<b>10,0</b>	<b>cm</b>
Día 53	Ficha 35	Lunes 04/ Dic	49,3	60,8	50,2	cm
Día 54	Ficha 36	Martes 05/ Dic	49,3	60,8	50,3	cm
Día 55	Ficha 37	Miércoles 06/ Dic	49,5	61,3	51,3	cm
Día 56	Ficha 38	Jueves 07/ Dic	50,0	61,5	52,7	cm
Día 57	Ficha 39	Viernes 08/ Dic	50,5	61,8	53,0	cm
Día 60	Ficha 40	Lunes 11/ Dic	51,5	63,7	54,4	cm
<b>CRECIAMIENTO PROMEDIO EN SIETE SEMANAS</b>			<b>8,7</b>	<b>23,5</b>	<b>14,7</b>	<b>cm</b>
Día 61	Ficha 41	Martes 12/ Dic	52,0	64,0	55,3	cm

Día 62	Ficha 42	Miércoles 13/ Dic	52,0	64,2	55,5	cm
Día 63	Ficha 43	Jueves 14/ Dic	52,2	64,8	55,7	cm
Día 64	Ficha 44	Viernes 15/ Dic	52,3	65,3	56,7	cm
Día 67	Ficha 45	Lunes 18/ Dic	54,0	65,8	57,3	cm
Día 68	Ficha 46	Martes 19/ Dic	55,0	66,7	58	cm
<b>CRECIAMIENTO PROMEDIO EN OCHO SEMANAS</b>			<b>12,2</b>	<b>26,5</b>	<b>18,3</b>	<b>cm</b>

Elaborado por: Guerra S. Bryan G.

10.6. **Anexo 6.-** Resultados del Análisis Químico del agua residual del efluente de la Industria láctea “San Salvador”

**SAQMIC**  
Servicios Analíticos Químicos y Microbiológicos en Aguas y Alimentos

CÓDIGO: 164-17

Análisis solicitado por: Bryan Guerra  
Fecha de Análisis: 04 de julio del 2017  
Fecha de Entrega de Resultados: 11 de julio del 2017  
Tipo de muestra: Agua residual de la industria láctea San Salvador  
Localidad: Riobamba

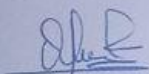
**Análisis Químico**

Determinaciones	Unidades	*Método	**Límites	Resultados
Sólidos totales disueltos	mg/l	-	-	590
Sólidos suspendidos	mg/l	2540-B	-	5560
Nitrógeno total	mg/l	-	60	144
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	5220-C	500	15000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	5210-B	250	11120
Aceites y Grasas	mg/l	Extracción con solvente	70	1800
Sólidos totales	mg/l	2540-D	1600	8140
Fosfatos	mg/l	-	15	101.25
Sulfatos	mg/l	-	400	300

\*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF 21 ed.  
\*\*TULSMA TABLA 9. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público

Observaciones:

Atentamente,



**SAQMIC**  
Servicios Analíticos Químicos y Microbiológicos en Aguas y Alimentos

Dra. Gina Álvarez R.  
RESP. LABORATORIO DE ANÁLISIS

Nota: El presente informe afecta solo a la muestra analizada.

**Análisis químico del efluente de agua tratada en el humedal artificial con Totorá a los 15 días de funcionamiento.**

**SAQMIC**  
Servicios Analíticos Químicos y Microbiológicos  
en Aguas y Alimentos

CÓDIGO: 333-17

Análisis solicitado por: Bryan Guerra  
Fecha de Análisis: 30 de octubre del 2017  
Fecha de Entrega de Resultados: 06 de noviembre del 2017  
Tipo de muestra: Agua Tratada de la industria láctea San Salvador  
Localidad: Riobamba

**Análisis Químico**

Determinaciones	Unidades	*Método	**Límites	Resultados
Sólidos suspendidos	mg/l	2540-B	-	136
Nitrógeno total	mg/l		60	24
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	5220-C	500	720
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	5210-B	250	492
Aceites y Grasas	mg/l	Extracción con solvente	70	30
Sólidos totales	mg/l	2540-D	1600	548
Fosfatos	mg/l	-	15	11

\*Métodos Normalizados: APHA, AWWA, WPCF 21 ed.  
\*\*TULSMA TABLA 9. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público

Observaciones:  
Atentamente.



Dra. Gina Álvarez R.  
RESP. LABORATORIO DE ANÁLISIS  
Nota: El presente informe afecta solo a la muestra analizada.

**SAQMIC**  
Servicios Analíticos Químicos y Microbiológicos  
en Aguas y Alimentos

**Análisis químico del efluente de agua tratada en el humedal artificial con Totorá a los 30 días de funcionamiento.**

**SAQMIC**  
Servicios Analíticos Químicos y Microbiológicos en Aguas y Alimentos

CÓDIGO: 338-17

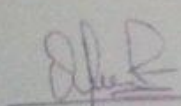
Análisis solicitado por: Bryan Guerra  
Fecha de Análisis: 17 de noviembre del 2017  
Fecha de Entrega de Resultados: 22 de noviembre del 2017  
Tipo de muestra: Agua Tratada de la industria láctea San Salvador  
Localidad: Riobamba

**Análisis Químico**

Determinaciones	Unidades	*Método	**Límites	Resultados
Sólidos suspendidos	mg/l	2540-B	-	340
Nitrógeno total	mg/l		60	35
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	5220-C	500	4860
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	5210-B	250	3770
Aceites y Grasas	mg/l	Extracción con solvente	70	200
Sólidos totales	mg/l	2540-D	1600	4050
Fosfatos	mg/l	-	15	31

\*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF 21 ed.  
\*\*TULSMA TABLA 9. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público

Observaciones:  
Atentamente.



**SAQMIC**  
Servicios Analíticos Químicos y Microbiológicos

Dra. Gina Álvarez R.  
RESP. LABORATORIO DE ANÁLISIS  
Nota: El presente informe afecta solo a la muestra analizada.

**Análisis químico del efluente de agua tratada en el humedal artificial con Totorá a los 45 días de funcionamiento.**

**SAQMIC**  
Servicios Analíticos Químicos y Microbiológicos  
en Aguas y Alimentos

CÓDIGO: 342-17

Análisis solicitado por: Bryan Guerra  
Fecha de Análisis: 05 de diciembre del 2017  
Fecha de Entrega de Resultados: 11 de diciembre del 2017  
Tipo de muestra: Agua Tratada de la industria láctea San Salvador  
Localidad: Riobamba


**Análisis Químico**

Determinaciones	Unidades	*Método	**Límites	Resultados
Sólidos suspendidos	mg/l	2540-B	-	62
Nitrógeno total	mg/l	5220-C	500	375
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	5210-B	250	225
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	Extracción con solvente	70	10
Ácidos y Grasas	mg/l	2540-D	1600	996
Sólidos totales	mg/l	-	15	21.2
Fosfatos	mg/l	-	-	-

\*Métodos Normalizados: APHA, AWWA, WPCF 21 ed.  
\*\*TULSMA TABLA 9. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público

Observaciones:

Atentamente:



**SAQMIC**  
Servicios Analíticos Químicos y Microbiológicos

Dra. Gina Álvarez R.  
RESP. LABORATORIO DE ANÁLISIS  
Nota: El presente informe afecta solo a la muestra analizada.

**Análisis químico del efluente de agua tratada en el humedal artificial con Totorá a los 60 días de funcionamiento.**

**SAQMIC**  
Servicios Analíticos Químicos y Microbiológicos  
en Aguas y Alimentos

CÓDIGO: 352-17

Análisis solicitado por: Bryan Guerra  
Fecha de Análisis: 22 de diciembre del 2017  
Fecha de Entrega de Resultados: 27 de diciembre del 2017  
Tipo de muestra: Agua Tratada de la industria láctea San Salvador  
Localidad: Riobamba

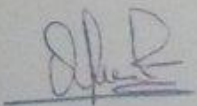
**Análisis Químico**

Determinaciones	Unidades	*Método	**Límites	Resultados
Sólidos suspendidos	mg/l	2540-B	-	21
Nitrógeno total	mg/l		60	8.2
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	5220-C	500	267
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	5210-B	250	210
Aceites y Grasas	mg/l	Extracción con solvente	70	<1
Sólidos totales	mg/l	2540-D	1600	1180
Fosfatos	mg/l	-	15	9.05

\*Métodos Normalizados. APHA, AWWA, WPCF 21 ed.  
\*\*TULSMA TABLA 9. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público

Observaciones:

Atentamente.



**SAQMIC**  
Servicios Analíticos Químicos y Microbiológicos  
en Aguas y Alimentos

Dra. Gina Álvarez R.  
RESP. LABORATORIO DE ANÁLISIS

Nota: El presente informe afecta solo a la muestra analizada.

10.7. **Anexo 7.-** Respaldo fotográfico de todo el proceso de investigación y experimentación.



**Anexo 6.1.-** Inicio y fin del proceso constructivo del sistema piloto del humedal artificial.



**Anexo 6.2.-** Recolección de las aguas residuales de una caja de revisión de la industria de productos lácteos “San Salvador” y su posterior transporte al tanque de almacenamiento del sistema piloto (Dicho transporte se realizó semanalmente desde la empresa hasta el sitio de funcionamiento del humedal)





**Anexo 6.2.-** Medición diaria del caudal de entrada al sistema, monitoreo y medición de la altura de crecimiento de la especie vegetal.



**Anexo 6.2.-** Toma de muestra del efluente de agua tratada en el sistema piloto a los 15 días de funcionamiento.



**Anexo 6.3.-** Toma de muestra del efluente de agua tratada en el sistema piloto a los 30 días de funcionamiento.



**Anexo 6.4.-** Toma de muestra del efluente de agua tratada en el sistema piloto a los 45 días de funcionamiento.



**Anexo 6.5.-** Toma de muestra del efluente de agua tratada en el sistema piloto a los 60 días de funcionamiento.



**Anexo 6.6.-** Sistema piloto del 1, 30 y 60 días de funcionamiento.