



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS

**“REDISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES UTILIZANDO HUMEDALES ARTIFICIALES PARA
LA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA PEXA DEL CANTON LA
CONCORDIA”**

Trabajo de Titulación para optar al grado académico de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTOR: ROBERT DENNIS VILLAMARIN VILLENA

TUTOR: DR. FAUSTO YAULEMA

RIOBAMBA-ECUADOR

2015

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE CIENCIAS QUIMICAS

El tribunal de tesis certifica que: El trabajo de titulación “**REDISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES UTILIZANDO HUMEDALES ARTIFICIALES PARA LA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA PEXA DEL CANTON LA CONCORDIA**”, de responsabilidad del Egresado Sr. Robert Dennis Villamarín Villena ha sido prolijamente revisado por los miembros del Tribunal, quedando autorizada su presentación.

NOMBRE

FIRMA

FECHA

Dr. Fausto Yaulema.

DIRECTOR DEL

TRABAJO DE TITULACIÓN

.....

.....

Ing. Juan Carlos González.

MIEMBRO-TRIBUNAL

.....

.....

“Yo, **Robert Dennis Villamarín Villena**, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este trabajo de titulación, y el patrimonio intelectual del trabajo de titulación pertenecen a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo”

Robert Dennis Villamarín Villena

DEDICATORIA

De la manera más cariñosa que sea posible este trabajo está dedicado a mi madre NANCY DEL SAGRARIO VILLENA y mi padre FRANCISCO ESTUARDO VILLAMARÍN GALARZA que con su cariño y constancia supieron instruirme de la mejor manera.

A mis hermanos y amigos que día a día hemos compartido momentos gratos e inolvidables en cada instante de mi vida a todos ellos Dios los bendiga.

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la salud y por poner retos en mi vida para poder superarlos y así lograr alcanzar mis metas.

A mis padres FRANCISCO VILLAMARÍN y NANCY VILLENA, por su apoyo incondicional y su confianza, por haberme educado con los valores y principios más preciados para mí.

A mis hermanos que con su apoyo y comprensión hicieron de este periodo de estudio sea más llevadero posible.

A la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO, a la Facultad de Ciencias, Al Dr. Fausto Yaulema y al Ing. Juan Carlos González, quienes con sus enseñanzas, acogida, amistad y dirección impulsaron mi carrera.

Robert V.

CONTENIDO

RESUMEN	xvi
SUMMARY	xvii
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEORICO	4
1.1. Antecedentes de La Investigación.....	4
1.2. El Agua.	4
1.3. Ciclo del Agua.	5
1.4. Aguas Residuales	6
1.4.1. Generalidades, definición y Origen.....	6
1.4.2. Clasificación de las Aguas Residuales	7
1.4.3. Características de las Aguas Residuales.	7
1.4.3.1. Características Físicas.	8
1.4.3.2. Características Químicas.....	9
1.4.3.3. Características Biológicas.	11
1.5. Tratamiento de Aguas Residuales.....	13
1.5.1. Pretratamiento	14
1.5.2. Tratamiento Primario.	14
1.5.3. Tratamiento Secundario	15
1.5.4. Tratamiento Terciario	15

1.6.	Sistemas Naturales de Depuración.....	15
1.6.1.	Lagunaje.....	16
1.6.1.1.	Funcionamiento.....	16
1.6.1.2.	Tipos de Lagunas.	17
1.6.2.	Humedales Artificiales.....	18
1.6.2.1.	Clasificación de los Humedales Artificiales.	18
1.6.2.1.1.	Humedales artificiales de flujo superficial.....	19
1.6.2.1.2.	Humedales artificiales de flujo Subsuperficial	20
1.6.2.1.3.	Partes de los humedales de flujo subsuperficial.....	23
1.6.2.2.	Mecanismo de remoción de contaminantes.	28
1.6.2.2.1.	Remoción de sólidos suspendidos.....	29
1.6.2.2.2.	Remoción de Materia Orgánica.	29
1.6.2.2.3.	Remoción del Nitrógeno.	30
1.6.2.2.4.	Remoción del Fósforo.....	32
1.6.2.2.5.	Remoción de Metales pesados.	32
1.6.2.2.6.	Remoción de Bacterias.....	33
1.6.2.3.	Funciones de las Macrófitas en los mecanismos de remoción.....	33
1.6.3.	Ventajas y Desventajas de los Humedales Artificiales.	34
1.7.	Diseño y Construcción.....	35
1.7.1.	Modelo general de diseño de un humedal Artificial.	35
1.7.1.1.	Cálculo del Caudal medio.....	36

1.7.1.2.	Cálculo del área superficial.....	37
1.7.1.3.	Cálculo de la constante de primer orden.....	37
1.7.1.4.	Cálculo del tiempo de retención.....	38
1.7.1.5.	Cálculo del largo y ancho del humedal.....	38
1.7.2.	Parámetros de diseño para humedales artificiales.....	39
1.7.2.1.	Parámetros para Humedales Subsuperficiales de flujo Horizontal.....	39
1.7.2.2.	Parámetros para Humedales Subsuperficiales de flujo Vertical.....	41
1.7.3.	Construcción de humedales de flujo Subsuperficial Vertical y Horizontal.....	43
1.8.	Normativa Ambiental.....	44
1.8.1.	Normativa de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua.....	44
2.	PARTE EXPERIMENTAL.....	46
2.1.	Localización de la Investigación.....	46
2.2.	Descripción de los Procesos de la Extractora Pexa.....	48
2.2.1.	Recepción de Fruta.....	48
2.2.2.	Esterilización del Fruto.....	49
2.2.2.1.	Inactivar la Lipasa.....	49
2.2.2.2.	Desprendimiento del Fruto.....	49
2.2.2.3.	Ablandamiento de los tejidos de la Pulpa.....	49
2.2.2.4.	Calentamiento y Deshidratación de las Almendras.....	49
2.2.2.5.	Coagulación de las proteínas.....	49
2.2.2.6.	Hidrolisis y descomposición del material mucilaginoso.....	50

2.2.3.	Desfrutación.....	50
2.2.4.	Digestión.....	50
2.2.5.	Prensado.....	51
2.2.6.	Clarificación.....	51
2.2.7.	Sedimentador de Aceite.....	52
2.2.8.	Tanques de Agua lodosas-Florentinos.....	52
2.3.	Método de medición del Caudal.....	52
2.4.	Método de Muestreo.....	52
2.5.	Método de Caracterización del Agua Residual.....	53
2.6.	Método de selección del lugar.....	54
2.7.	Métodos de Construcción de los humedales artificiales.....	55
2.7.1.	Construcción del dique de Contención.....	55
2.7.2.	Permeabilización del dique de Contención.....	55
2.7.3.	Implementación del sistema de Recolección.....	55
2.7.4.	Llenado del arena y grava.....	56
2.7.5.	Implementación del sistema de Aplicación.....	56
2.7.6.	Plantación de la Vegetación.....	56
2.8.	Métodos para el Dimensionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.....	57
2.8.1.	Evaluación Técnica.....	57
2.8.2.	Procesamiento de Datos.....	57
2.8.3.	Dimensionamiento de la Planta de Tratamiento.....	57

2.9.	Método para elaboración de Planos.	57
3.	CÁLCULOS, ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	58
3.1.	Determinación del Estado Actual de la Planta.	58
3.2.	Descripción de la Planta de Tratamiento.	58
3.2.1.	Volumen de efluente generado en el proceso de extracción.	59
3.2.2.	Caudal del Efluente que va a las Lagunas de Oxidación.	59
3.2.3.	Características del Sistema de Tratamiento.	60
3.2.3.1.	Área y volumen para el tratamiento del Efluente.....	60
3.2.3.2.	Fases de Tratamiento.	61
3.3.	Caracterización Físico, Químico y Microbiológico del Agua.....	62
3.3.1.	Análisis del Agua Tratada en las lagunas de oxidación.	62
3.4.	Rediseño de la Planta de la Tratamiento.	64
3.4.1.	Adecuación de la laguna de retención y enfriamiento.	64
3.4.2.	Dimensionamiento de los Humedales Artificiales.....	65
3.4.2.1.	Caudal de Diseño.	65
3.4.2.2.	Cálculo de la constante de reacción de primer orden (K_T).....	65
3.4.2.3.	Cálculo del área necesaria.	66
3.4.2.4.	Cálculo del tiempo de retención.....	67
3.4.2.5.	Cálculo del ancho del humedal.	67
3.4.2.6.	Cálculo del largo del humedal.....	69
3.4.2.7.	Cálculo de la cantidad del medio filtrante para los humedales.	69

3.5.	Resultados	73
3.5.1.	Resultados de los cálculos de diseño de los Humedales artificiales.	73
3.5.2.	Resultados Experimentales.	74
3.5.2.1.	Reducción del PH.....	74
3.5.2.2.	Reducción de la Turbidez.....	75
3.5.2.3.	Reducción de la Conductividad.	76
3.5.2.4.	Reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).	77
3.5.2.5.	Reducción de Aceite y grasas.	79
3.5.2.6.	Reducción de Cobre.	80
3.5.2.7.	Reducción de Aluminio.	81
3.5.2.8.	Reducción de los Coliformes fecales.	82
3.5.2.9.	Reducción de los Coliformes totales.....	83
3.6.	Análisis y discusión de resultados.....	84
	CONCLUSIONES.....	85
	RECOMENDACIONES.....	86
	GLOSARIO	
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

INDICE DE TABLAS

TABLA 1-1: Agentes infecciosos potencialmente presentes en el agua residual doméstica bruta.	12
TABLA 1-2: Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales. ...	24
TABLA 1-3: Especies vegetales empleadas en la depuración de aguas residuales.....	27
TABLA 1-4: Mecanismos de remoción en los sistemas de tratamiento basados en macrófitas. ...	28
TABLA 1-5: Ventajas y Desventajas de los Humedales Artificiales.....	34
TABLA 1-6: Comparación entre humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal y vertical.....	35
TABLA 1-7: Características principales de los sustratos utilizados en los humedales.	38
TABLA 1-8: Parámetros de diseño de humedal subsuperficial de flujo horizontal.....	40
TABLA 1-9: Características del sustrato para diseño de humedales verticales.	42
TABLA 1-10: Parámetros de diseño de humedal subsuperficial de flujo vertical.	42
TABLA 1-11: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.....	44
TABLA 2-1: Coordenadas de Ubicación de las áreas de Proceso.....	48
TABLA 2-2: Métodos y Normas para análisis Físicos-Químicos y Microbiológicos del Agua Residual.....	54
TABLA 3-1: Volumen de Efluente Generado.....	59
TABLA 3-2: Caudal del efluente Generado por año.....	60
TABLA 3-3: Caudal del efluente generado por día.	60
TABLA 3-4: Área y volumen de las lagunas de Oxidación.....	60

TABLA 3-5: Descripción de las fases de tratamiento.....	61
TABLA 3-6: Resultados del Agua residual tomada en la primera laguna anaerobia.....	62
TABLA 3-7: Resultados del agua residual tomada en el punto 1 de la segunda laguna anaerobia.	63
TABLA 3-8: Resultados del agua residual tomada en el punto 2 de la segunda laguna anaerobia.	63
TABLA 3-9: Resultados del Agua residual tomada en la tercera laguna anaerobia.	63
TABLA 3-10: Características de la laguna de retención y Enfriamiento.....	64
TABLA 3-11: Especificaciones técnicas de la motobomba Evans.	65
TABLA 3-12: Caudal de Diseño generado por la motobomba.	65
TABLA 3-13: Valores de porosidades utilizadas para el cálculo del Área Superficial.	66
TABLA 3-14: Valores de conductividad hidráulica utilizadas para el cálculo del ancho del humedal.	68
TABLA 3-15: Características y espesores del sustrato recomendadas para la construcción de los humedales propuestos.....	69
TABLA 3-16: Especificaciones para la construcción de los lechos filtrantes.....	71
TABLA 3-17: Valores de dimensionamiento propuestos para la construcción de los humedales. .	73
TABLA 3-18: Características de la planta piloto.	74
TABLA 3-19: Variación del PH en los tratamientos.	74
TABLA 3-20: Variación de la Turbiedad en los tratamientos.	75
TABLA 3-21: Variación de la Conductividad en los tratamientos.	76
TABLA 3-22: Variación de la DBO en los tratamientos.	77
TABLA 3-23: Variación de la concentración de Aceites y Grasas en los tratamientos.....	79

TABLA 3-24: Variación de la concentración de cobre en los tratamientos.....	80
TABLA 3-25: Variación de la concentración de Plomo en los tratamientos.....	81
TABLA 3-26: Variación de la concentración de Coliformes Fecales en los tratamientos.....	82
TABLA 3-27: Variación de la concentración de Coliformes Totales en los tratamientos.....	83

INDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURA 1-1:	Estructura de la molécula del Agua.	5
FIGURA 1-2:	Representación del ciclo Hidrológico.	6
FIGURA 1-3:	Características cualitativas de las Aguas Residuales.	8
FIGURA 1-4:	Oxígeno disuelto consumido en función del tiempo.	11
FIGURA 1-5:	Esquema de una EDAR (Metcalf & Eddy, 2003).	13
FIGURA 1-6:	Simbiosis entre algas y Bacterias.	17
FIGURA 1-7:	Clasificación de Humedales Artificiales con Macrófitas.	19
FIGURA 1-8:	Humedal Artificial de Flujo Superficial.	20
FIGURA 1-9:	Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial.	20
FIGURA 1-10:	Humedales subsuperficiales de flujo horizontal.	22
FIGURA 1-11:	Humedales de flujo subsuperficial vertical.	23
FIGURA 1-12:	Diagrama del metabolismo del nitrógeno.	30
FIGURA 2-1:	Ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Extractora de Aceite de Palma PEXA.	47
FIGURA 2-2:	Puntos de Muestreo.	53
FIGURA 2-3:	Medidas del Dique Construido.	55
FIGURA 2-4:	Sistema de Tuberías de Aplicación de Agua residual.	56
FIGURA 2-5:	Modelo de Plantación del Pasto Alemán.	57
FIGURA 3-1:	Representación gráfica del efluente generado por proceso.	59

FIGURA 3-2:	Esquema de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.....	61
FIGURA 3-3:	Estructura del lecho filtrante a utilizarse en la fase de lijado.	72
FIGURA 3-4:	Estructura del lecho filtrante a utilizarse en la fase de pulido.	73
FIGURA 3-5:	Representación gráfica de la variación del PH en los tratamientos.	75
FIGURA 3-6:	Representación gráfica de la variación de la Turbiedad.	76
FIGURA 3-7:	Representación gráfica de la variación de la Conductividad.	77
FIGURA 3-8:	Representación gráfica de la variación de la concentración de la DBO.	78
FIGURA 3-9:	Representación gráfica de la variación de la concentración de Aceites y Grasas.	79
FIGURA 3-10:	Representación gráfica de la variación de la concentración de Cobre.....	80
FIGURA 3-11:	Representación gráfica de la variación de la concentración de Aluminio.	81
FIGURA 3-12:	Representación gráfica de la variación de la concentración de Coliformes fecales.	82
FIGURA 3-13:	Representación gráfica de la variación de la concentración de Coliformes totales.	83

RESUMEN

El rediseño de la planta de tratamiento de aguas residuales de la extractora de aceite de palma Pexa se lo realizó en el cantón la concordia de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas.

Para su evaluación técnica se empleó métodos analíticos como una caracterización físico- químico y microbiológico de las aguas residuales realizadas en los laboratorios del Cestta y Saqmic empleando normas estandarizadas con la finalidad de determinar el rendimiento actual del sistema de tratamiento, la recolección de muestras fue realizada de acuerdo a un plan de muestreo utilizando botellas de 1 litro color ámbar y frascos estériles para análisis microbiológicos.

Los resultados obtenidos demostraron que los parámetro como la Demanda Bioquímica de Oxígeno: 1940 mg/L, aceites y grasas: 92.00 mg/l, cobre: 1.41 mg/l, aluminio: 22.82 mg/l, coliformes fecales: 6×10^3 UFC, coliformes totales: 248×10^3 no cumplían con los límites permisibles exigidos por la normativa ambiental vigente, luego de un mes de tratamiento se obtuvo una reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en un 95.05%, aceites y grasas en un 99.67%, cobre en un 85.8 %, aluminio en un 97.89%, coliformes fecales en un 99.97%, coliformes totales en un 99.91% permitiendo cumplir con los parámetros establecidos por el texto unificado de legislación ambiental secundaria del ministerio del ambiente (TULSMA) en el libro VI, anexo 1, tabla 12 “Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce”.

Concluyendo que el rediseño propuesto mejorará la calidad del efluente para poder ser descargado al río cocola dentro de los parámetros establecidos por la normativa vigente, se recomienda que la extractora Pexa cuente con un cronograma de mantenimiento y limpieza para mantener un buen funcionamiento del sistema.

PALABRAS CLAVES: <REDISEÑO> <PLANTA DE TRATAMIENTO>
<CARACTERIZACION> <EVALUACION TECNICA> <NORMATIVA AMBIENTA>
<PARAMETROS> <LIMITES PERMISIBLES> <DESCARGAS A CUERPOS DE AGUA>
<AGUAS RESIDUALES> <PLAN DE MUESTREO>.

SUMMARY

The redesign of Pexa, a treatment plant for the wastewater coming from an extractor of palm oil, was conducted in the Concordia canton belonging to Santo Domingo de los Tsáchilas province.

In order to carry out the technical evaluation of the plant; analytical methods like physical-chemical and microbiological characterization of the wastewater were applied in the laboratories of Cestta and Saqmic by using standardized rules to determine the current performance of the treatment system. The sample collection was carried out according to a sampling plan by using amber coloured bottles of 1 litre capacity as well as sterile jars to microbiological analyses.

The gathered results from this study revealed that values of the following parameters: biochemical oxygen demand: 1940 mg/l, oils and fats: 92.00 mg/l, copper: 1.41 mg/l, aluminium: 22.82 mg/l, faecal coliform bacteria: 6×10^3 CFU (colony forming units), total coliforms 248×10^3 CFU; did not comply the permissible limits required by the current environment legislation, after a month of treatment; it was possible to reach a reduction on 95.05%, oils and fats in a 96.67%, copper in a 85.8% aluminium in 97.89%, faecal coliforms in a 99.97%, total coliforms in 99.91% enabling compliance with the parameters set by the unified text of the secondary legislation of the environmental ministry (TULSMA) text book VI, annex 1, table 12, discharge limits to a body of fresh water.

Having as a concluding point that the proposed redesign will improve the quality of the effluent to be discharged into the Cocola river within the parameters established by the current legislation, it is recommended that the extractor Pexa counts on a cleaning and maintenance schedule to ensure a good performance of this system.

KEYWORDS: <REDESING> <TREATMENT PLANT> <CHARACTERISTICS> <TECHNICAL EVALUATION> <ENVIROMENTAL COMPLIANCE> <PARAMETERS> <PERMISSIBLE LIMITS> <DISCHEGES TO WATER BODIES> <WATEWATER> <SAMPLING PLAN>.

INTRODUCCIÓN

Situación Problemática

En las últimas décadas las diferentes industrias dedicadas a la transformación de la materia en productos que puedan ser incorporados al mercado han tomado fuerza debido a que el ser humano ha sentido una mayor necesidad de explotar todos los recursos necesarios para la satisfacer de los requerimientos mínimos de su vida diaria. Debido a esta necesidad existen varias actividades económicas que poseen potencial de contaminar el agua tales como las actividades dedicadas a la obtención de aceites vegetales procedente de la palma, existen alrededor de unas 78 empresas dedicadas a la extracción de aceite de palma en el Ecuador, las cuales utilizan el recurso agua para casi todos sus procesos de extracción y clarificación del aceite de la palma Africana.

PEXA es una industria dedicada a la extracción del aceite de palma africana, se encuentra localizada al noroeste del país en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, en el Cantón la Concordia, en la parroquia la Unión, esta industria cuenta con procesos como: Recepción y almacenamiento, esterilización, desfrutación, digestión, prensado, clarificación, almacenamiento y palmitera demandando de gran cantidad de agua para dichos procesos. Estas aguas residuales procedentes de dichos procesos son liberados a temperaturas que oscilan entre 60 a 70°C además posee gran cantidad de materia orgánica, elevadas cantidades de nitratos, fosfatos son descargadas directamente a fuentes hídricas.

Estas aguas descargadas sin un previo tratamiento para reducir su carga contaminante pueden provocar cambios físicos-químicos y microbiológicos del agua, estimula al crecimiento de vida no deseada y peligrosa para el ser humano, contribuyendo en el deterioro de la calidad del agua, vida acuática y por ende sufriría una severa alteración de todo nuestro ecosistema que actúa simbióticamente.

Formulación del Problema

¿Es el pasto alemán el material vegetativo indicado para utilizarse en un sistema de depuración natural para el tratamiento de las aguas residuales de la extractora de aceite de palma PEXA?

JUSTIFICACIÓN

Toda actividad industrial genera residuos sean estos sólidos líquidos y material particulado que deben tener un previo tratamiento para su descarga al ambiente con la finalidad de reducir al máximo el impacto negativo en nuestros ecosistemas.

En los últimos años la gran problemática es la contaminación del agua, por compuestos orgánicos e inorgánicos generados por actividades industriales, estos deben ser tratados con tecnologías de bajo costo y de gran efectividad para así evitar que la contaminación se extienda hacia los mantos freáticos de nuestro país.

La Extracto de aceite PEXA dedicada a la extracción de aceite vegetal necesita contar con un sistema de óptimo rendimiento para el tratamiento de sus aguas residuales debido a que toda industria que genera aguas residuales debe realizar sus descargas después de un previo tratamiento y verificando que los parámetros de sus aguas de descarga estén dentro de los límites permisibles indicados en la **tabla 12** “límites de descarga a un cuerpo de agua dulce” del Tulsma.

Por lo dicho anteriormente se plantea la necesidad de un rediseño de la planta de tratamiento de aguas residuales que cuenta la extractora de aceite de palma Pexa con la finalidad de mejorar la capacidad y rendimiento de la planta de tratamiento que cuenta PEXA, bajando Los Parámetros De Carga Orgánica, DBO, DBQ, Fosfatos, Nitratos, a través de la mejora del sistema utilizado para el tratamiento de las aguas residuales.

OBJETIVO

General

Rediseñar la planta de tratamiento de Aguas Residuales de la extractora de aceite de palma PEXA, utilizando humedales artificiales.

Específicos

- Realizar un diagnóstico del rendimiento actual de la planta de tratamiento de las Aguas residuales a partir del porcentaje de reducción de carga orgánica.
- Determinar el porcentaje de reducción de DBO, aceites y grasas, coliformes fecales, coliformes totales y metales pesados de las aguas residuales de la extractora PEXA utilizando pasto alemán como material vegetal en el tratamiento con humedales artificiales.
- Determinar los parámetros de rediseño adecuados para el sistema de tratamiento de las aguas residuales de la extractora de aceite de palma PEXA.

CAPITULO I

1. MARCO TEORICO

1.1. Antecedentes de La Investigación

En el Ecuador, desde el año de 1999 hasta la presente fecha, existen 11 sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante la tecnología de fitodepuración artificial. De estos, 2 están ubicados en la provincia de Esmeraldas, 1 en Santo Domingo de los Colorados, 1 el Lago Agrio, 6 en Shushufindi y 1 el La Joya de los Sachas, siendo Shushufindi el pionero de esta tecnología alterativa en el Ecuador.

Palmeras del ecuador, es una empresa asentada en la parte éste del cantón Shushufindi y se dedica al cultivo de palma africana, así como también a la extracción de aceite rojo, de este proceso, descarga cerca de 600m³/d de aguas residuales que son depurados en una zona pantanosa natural que se adecuó solamente con simples canales para drenar de las aguas y donde el único factor existente son las halófitas como es el *Phragmites australis* (pasto alemán), esta planta de tratamiento configura 5 lechos, los mismos que funcionan con libre espejo de agua (flujo superficial).

Este sistema carece de otros elementos fundamentales para mejorar su rendimiento como son: un sistema de distribución uniforme, un sistema de recolección, no contiene ninguna capa de sustrato, no existe un adecuado control de caudales, y no se puede establecer el tiempo de retención mínimo necesario para la depuración de un determinado volumen de agua.

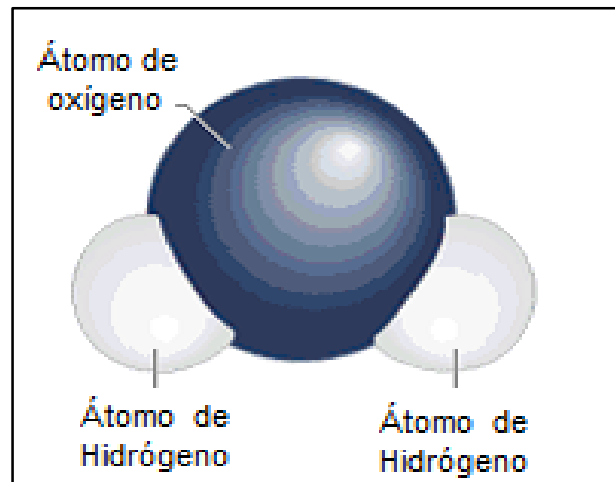
Pese a estos limitantes este sistema logra alcanzar remociones significativas en el orden de hasta un 96% o más de las cargas recibidas, la experiencia brindada nos enseña que si se adecúa esta planta de mejor manera los resultados mejorarían.

1.2. El Agua.

Sustancia incolora, inodora e insípida, indispensable para la vida humana, animal y vegetal y el más utilizado como disolvente, su punto de fusión es de 0°C (32°F) y su punto de ebullición de 100°C (212° F), su densidad máxima es a una temperatura de 4° C y se expande en el estado de congelación.

Como muchas otras sustancias o líquidos el agua puede permanecer en estado sobre enfriado, es decir que el agua puede estar en su estado líquido aun si su temperatura este por debajo de su temperatura de congelación, fácilmente se puede enfriar a 25° C sin que se congele.

FIGURA 1-1: Estructura de la molécula del Agua.



FUENTE: Benayas. J, 1989.

El agua es fuente de vida, toda la vida que existe depende del agua, constituye el 70% del peso corporal. Necesitamos el agua para todos los procesos corporales como es la respiración, desintoxicación de nuestro cuerpo y para la mantención de su temperatura normal y constante. Por eso estudios demuestran que una persona puede soportar hasta dos semanas sin comer pero solo puede soportar dos a tres días sin beber agua dándonos a entender la gran importancia del agua como líquido vital.

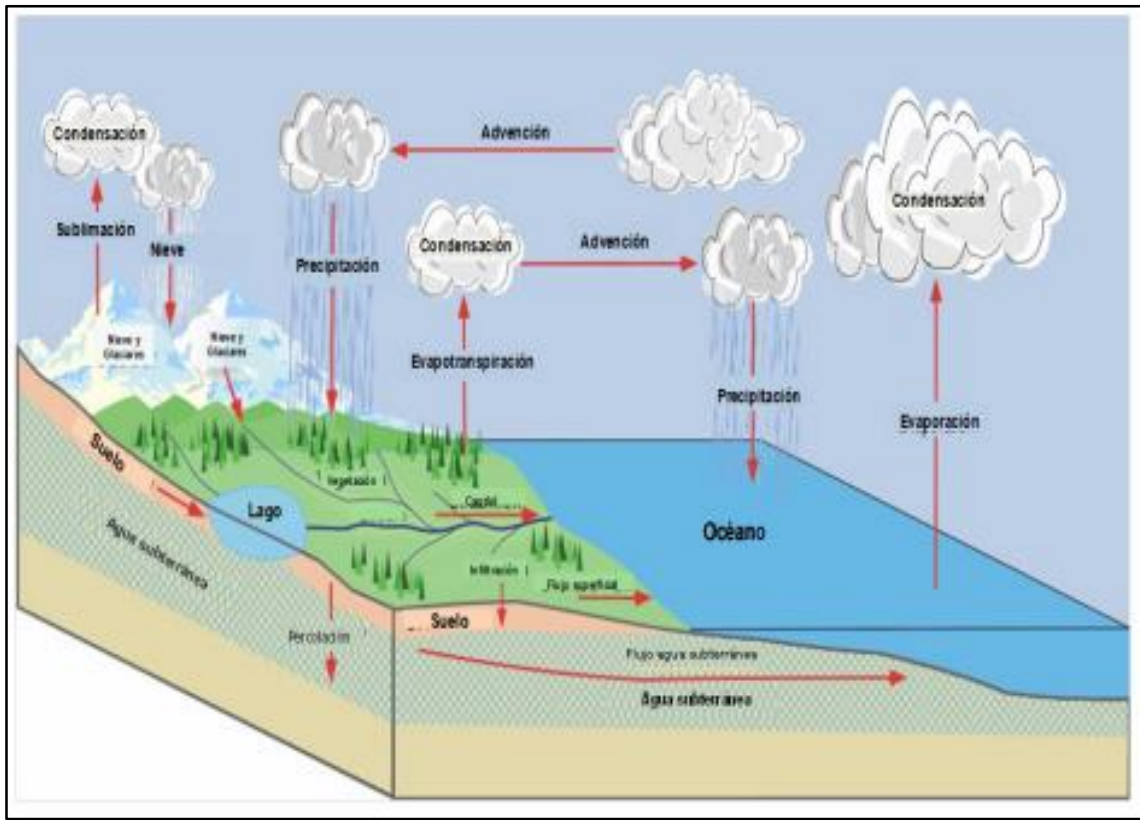
1.3. Ciclo del Agua.

El mar atrapa la sal del agua que recogió del suelo, la tierra, rocas que estaban presentes en los lugares donde transita el río, la envían hacia la atmósfera en estado puro y evaporado.

De la atmósfera el agua precipita como lluvia regando los prados los campos nutriendo las cosechas y frutas, regando troncos, ramas de las plantas, arboles etc., colmándolos de vida.

El agua al encontrar fisuras o grietas que se encuentran en las rocas y del suelo se infiltra dentro de la tierra formando las redes hídricas y pozos subterráneos, las aguas subterráneas alimentan a las aguas de pequeñas cascadas, manantiales presentes en la superficie. A todo este proceso del agua se le conoce como ciclo del agua o ciclo hidrológico, gracias a este fenómeno probablemente durante toda nuestra vida volveremos a beber esta misma agua unas cien veces según. (BENAYAS. J, 1989 p. 5)

FIGURA 1-2: Representación del ciclo Hidrológico.



FUENTE: www.eoearth.org/article/Hydrologic_cycle adaptado por ORDOÑEZ, 2011.

1.4. Aguas Residuales

1.4.1. Generalidades, definición y Origen

“Las aguas residuales pueden definirse como las aguas que proceden de la red de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido transformadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias, siendo recolectadas por el sistema de alcantarillado que las guiará hacia un destino adecuado”. (MARA, 1976 p. 132)

Las aguas residuales resultan de la combinación o mezcla de líquidos y sólidos que son transportados o arrastrados por el agua que proviene de viviendas, oficinas, edificios comerciales e instituciones, en junta de los residuos procedentes de industrias y de actividades del sector agrícola, pueden agregarse eventualmente a las aguas residuales las aguas subterráneas, superficiales o de precipitaciones. (MENDOCA. S, 1987 p. 132)

1.4.2. Clasificación de las Aguas Residuales

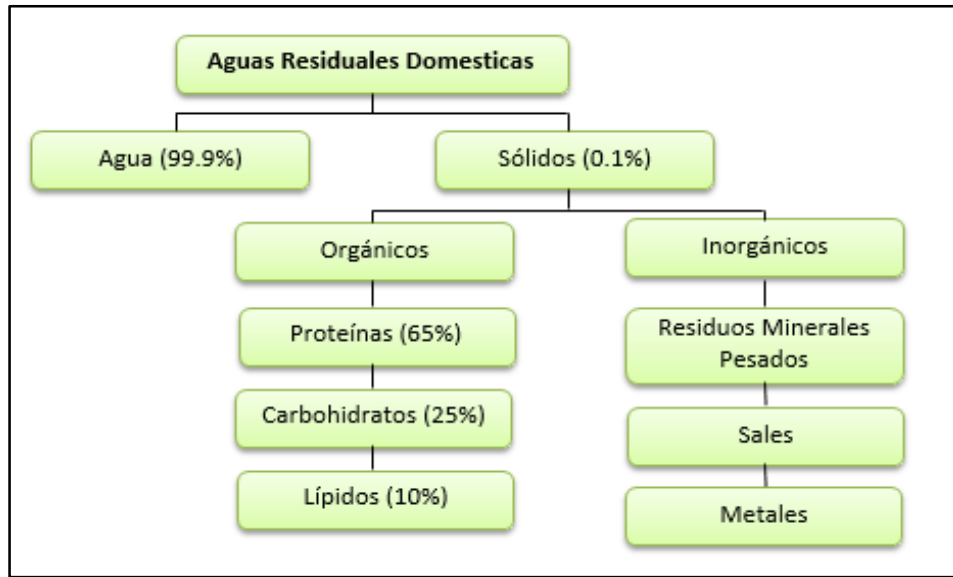
Dentro de esta clasificación se incluyen aguas con diversos orígenes.

- Aguas residuales domésticas o aguas negras: Aguas procedentes de actividades humanas como: aseo personal, necesidades biológicas, actividades de cocina y limpieza de viviendas, estas aguas poseen gran cantidad de materia orgánica y microorganismos así como presencia de resto de jabones, detergentes y grasas.
- Aguas blancas: Estas aguas pueden considerarse de procedencia atmosférica como lluvia, nieve o hielo, o de actividades de riego y limpieza de calles, aceras, parques y lugares públicos. En aquellas zonas donde las precipitaciones atmosféricas son muy abundantes, estas aguas pueden ser evacuadas de forma separadas para que los sistemas de depuración no se saturen o colapsen.
- Aguas residuales industriales: Procedente de actividades de procesamiento realizados en fábricas, y empresas industriales, estas aguas contiene restos de aceites, antibióticos, ácidos y grasas, productos y subproductos que pueden ser de origen mineral, animal, vegetal o químico. Dependiendo de los procesos industriales que realicen su composición es muy fluctuante.
- Aguas residuales agrícolas: Procedente de actividades agrícolas de zonas rurales, estas aguas tienen su origen de aguas urbanas que son utilizadas para labores de riego con o sin un previo tratamiento. (GARCÍA. E, 1985 pp. 54-56)

1.4.3. Características de las Aguas Residuales.

Es de gran importancia la caracterización de las aguas residuales para la determinación principalmente de la carga orgánica y de los sólidos que transporta, establecer efectos que causa la descarga a los cuerpos de agua y elegir las operaciones y procesos de tratamiento que resulten adecuados, económicos y más efectivos.

FIGURA 1-3: Características cualitativas de las Aguas Residuales.



FUENTE: Metcalf & Eddy, 1995.

1.4.3.1. Características Físicas.

Las principales características físicas de las aguas residuales son la cantidad presente de los sólidos suspendidos, sedimentables, disueltos, color olor, temperatura, turbiedad, y densidad.

- **Sólidos Totales:** Se llama sólidos totales a toda la materia que se obtiene después de que toda el agua se haya sometido a evaporación a temperaturas de (103° C- 105° C), sin tomar en cuenta a la materia perdida en este proceso, los sólidos sedimentables son los sedimentos obtenidos de la muestra de agua luego después de haber estado en el cono de Imhoff.
- **Olor:** Los olores presentes en el agua residual por lo general son resultados de los gases liberados a la atmosfera por acción de los procesos descomposición de la materia orgánica, estos olores generados son muy desagradables, debido a que son indicativos de presencia de sulfuros de hidrógeno (H₂S), esto se produce al transformarse los sulfatos en sulfitos por labor de los microorganismos anaerobios, en las aguas residuales de origen industrial pueden variar o tener otras características.
- **Temperatura:** En las aguas residuales la temperatura es un parámetro muy significativo, por lo habitual la temperatura de las aguas residuales son mayores que las del agua potable, esto se debe a que el calor específico del agua es relativamente mayor a la del aire, con excepción en las épocas de verano donde hay mucho calor sujetándose a la geografía del lugar, la temperatura de las aguas residuales oscila entre (10 a 20° C) que es el valor intermedio representativo.

- **Color:** El color es uno de los indicativos con el cual se puede juzgar o calificar las aguas residuales, el color puede referir específicamente a la edad de las mismas, por lo general el color característico de estas aguas es gris, al pasar el tiempo las condiciones hacen que la presencia de oxígeno se reduzca a su vez estas aguas van ganando un color más oscuro finalmente hasta llegar a negra, este color final es característico de presencia de sulfuros metálicos.
- **Turbidez:** Su característica se debe a la presencia de materia en suspensión como puede ser arcilla, limo, partículas de sílice, trazas de materia inorgánica entre otras. La determinación de la turbidez es un parámetro de control de gran importancia en aguas residuales o contaminadas, su determinación se lo puede realizar en campo o laboratorio.
- **Densidad:** Es un parámetro determinado por la relación entre masa y el volumen, la densidad puede ser expresada en distintas unidades la más utilizadas son Kg/m^3 o g/cm^3 .

1.4.3.2. *Características Químicas.*

El estudio de las características químicas de las aguas residuales se basa principalmente en tres partes que son: materia orgánica, materia inorgánica y los gases presentes en este tipo de aguas.

- **Materia Orgánica:** Según los sólidos presentes en las aguas residuales de concentración media se puede concluir que 75% de los sólidos en suspensión y el 40% de los sólidos filtrables son orgánicos, su origen es proveniente de plantas, animales, estos compuestos orgánicos son hechos por la mezcla de carbono, oxígeno e hidrógeno y en ocasiones de nitrógeno. Las grasas llegan a las aguas residuales en forma de mantequilla, como aceite vegetal o animales.
- **Carbono Orgánico Total:** Es uno de los métodos más utilizados para la determinación de materia orgánica presente en una muestra de agua, es recomendado utilizar este método preferentemente para muestras de bajas concentraciones de materia orgánica. El método utilizado para su determinación consiste en introducir cantidades conocidas a elevadas temperaturas dentro de un horno, la oxidación del carbono orgánica a anhídrido carbónico se obtiene mediante un catalizador.
- **Demanda Teórica de Oxígeno:** La materia orgánica es uno de los componentes presentes en las aguas residuales, este componente resulta de la mezcla de carbono, oxígeno, nitrógeno, e hidrógeno, uno de los elementos principales de este tipo son los productos resultantes de la descomposición de proteínas, grasas y carbohidratos.

- **Materia Inorgánica:** Las agua ya sea de origen residual como natural poseen constituyentes inorgánicos, los cuales son indicativos que determinan la calidad de dichas aguas, la eliminación del porcentaje del agua mediante el proceso de evaporación aumenta la concentración de los componentes inorgánicos presentes en las aguas, existen varios parámetros importantes que deben ser analizados para su mejor comprensión de lo explicado anteriormente.
- **PH:** Es uno de los parámetros más importantes que ayuda a determinar la calidad de dichas aguas sean estas residuales o naturales, la alteración de los iones de hidrógeno presentes en el agua es un indicativo de problemas en los procesos biológicos.
- **Cloruros:** La mayoría de las aguas residuales de origen industrial o domestica tienen en su composición presencia de cloruros, de la misma manera las aguas naturales sean estas de manantiales o vertientes poseen cloruros provenientes de la disolución de suelos y rocas.
- **Nitrógeno:** Es considerado como uno de los elementos necesarios para el crecimiento de los microorganismos y plantas, por lo que se lo conoce también como un nutriente, la ausencia de este elemento en el agua residual reduce la facilidad de su tratamiento, el contenido total del nitrógeno están presente en forma de nitrógeno orgánico, amoniac, nitritos y nitratos.
- **Fósforo:** Considerado como uno de los elementos principales que ayudan al crecimientos de algas y otros organismos biológicos, por lo general las aguas superficiales se caracterizan por el excesivo crecimiento de algas.
- **Azufre:** Considerado como un elemento necesario para la síntesis de las proteínas, el azufre se encuentra presente tanto en las aguas residuales así como también en el agua potable y es liberado durante el proceso de degradación de las proteínas. Los sulfatos por acción de bacterias y sin la presencia de oxígeno se transforman a sulfuros y sulfuros de hidrógeno.
- **Gases:** Dentro de las aguas residuales se encuentran presentes ciertos gases en mayor proporción como son: oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono, metano, amoniac y sulfuros de hidrógeno.
- **Metano:** Es un gas con características incoloras e inodoras de gran poder energético, es obtenido mediante la descomposición de materia orgánica presente en el agua residual por acción bacteriana.
- **Sulfuro de Hidrógeno:** Gas que posee características o propiedades inodoras e inflamables y de olor desagradable, en las aguas residuales la formación de los sulfuros de hidrógeno que a su vez

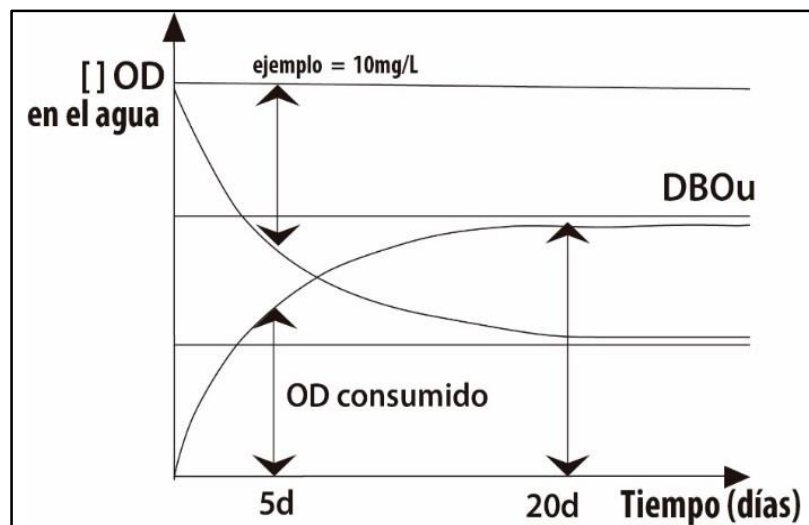
al combinarse con el hierro forman sulfuro ferroso y otros sulfuros metálicos, proceso por el cual estas aguas son oscuras color característicos. (CRITES. R, 2000 pp. 33, 42-44, 46-48)

1.4.3.3. Características Biológicas.

A continuación los principales parámetros biológicos presentes en las aguas residuales son:

- **Microorganismos:** Hay tres grupos principales de microorganismos presentes en las aguas residuales o superficiales estas son: las eucariotas, eubacterias y arqueobacterias, las eubacterias abarcan el mayor grupo de organismos. Las algas, protozoos y hongos que se encuentran en la categoría protista dentro de los organismos eucariotas, los animales vertebrados e invertebrados se encuentran dentro de la clasificación de eucariotas multicelulares. En las aguas residuales se puede encontrar presencia de virus y su clasificación está en relación al sujeto infectado.
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno:** Es el principal parámetro más empleado para la determinación de la contaminación tanto para aguas superficiales y residuales, la DBO_5 determina la cantidad de oxígeno que consumen los microorganismos en los procesos bioquímicos de oxidación de la materia orgánica. (METCALF & EDDY, 1995 pp. 41-43)

FIGURA 1-4: Oxígeno disuelto consumido en función del tiempo.



FUENTE: Metcalf & Eddy, 1995.

- **Demanda Química de Oxígeno:** Este parámetro es utilizado para determinar la cantidad de oxígeno utilizado para degradar la materia orgánica esta degradación es causada por un oxidante químico, este parámetro es mayor a la DBO debido a que es mayor la oxidación de sustancias por vía química que por vía biológica. (GRACÍA. E, 1985 p. 168)

- Organismos Patógenos: En las aguas residuales se encuentra la presencia de estos organismos que pueden tener procedencia de los desechos humanos infectados o que haya contraído algún tipo de enfermedad, estos organismo patógenos se caracterizan por causar enfermedades entre la más conocidas están la tifoidea, el cólera y la diarrea.

En las aguas residuales la presencia de los organismos patógenos se encuentra en pequeñas cantidades y son de difícil identificación, por lo que se utiliza colonias de coliformes fecales como indicadores ya que son de mayor proliferación y de fácil comprobación.

TABLA 1-1: Agentes infecciosos potencialmente presentes en el agua residual doméstica bruta.

ORGANISMOS	ENFERMEDADES	COMENTARIO
Bacterias		
<i>Escherichia Coli</i>	Gastroenteritis	Diarrea
<i>Legionella pneumophila</i>	Legionelosis	Enfermedades respiratorias
<i>Leptospi (150 esp.)</i>	Leptospirosis	Leptospirosis (enfermedad de Weil)
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea	Fiebre alta, disrrea, úlceras en el intestino delgado
<i>Salmonella (1700 esp.)</i>	Salmonelosis	Envenenamiento de Alimentos
<i>Shigella (4 esp.)</i>	Shigelosis	Disentería Bacilar
<i>Vidrio Cholerae</i>	Cólera	Diarreas extremadamente fuertes, deshidratación
<i>Yersinia enterolítica</i>	Yersinosis	Diarrea
Virus		
<i>Adenovirus</i>	Enfermedades respiratorias	
<i>Enterovirus</i>	Gastroenteritis	
<i>p.e. poli, eco, y virus (coxsakie)</i>	Anomalías cardíacas, meningitis	
<i>Hepatitis A</i>	Hepatitis infecciosa	Leptospirosis, fiebre
<i>Agente Norwalk</i>	Gastroenteritis	Vómito
<i>Reovirus</i>	Gastroenteritis	
<i>Rotavirus</i>	Gastroenteritis	
Protozoos		
<i>Balantidium Coli</i>	Balantidiasis	Diarrea, disentería
<i>Cryptosporidium</i>	Chriptosporidiosis	Diarrea
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amebiasis (disentería amébrica)	Diarreas prolongadas, con sangre, abscesos en el hígado e intestino delgado
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis	Diarrea, nauseas, indigestión

Helmintos		
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis	Infectaciones de gusano
<i>Enterobius Vericularis</i>	Enterobiasis	Gusano
<i>Fasciola Hepática</i>	Fascioliasis	Gusano (tercera)
<i>Hymenolepis nana</i>	Hymealepiasis	Tenia enana
<i>Taeniasaginata</i>	Teniasis	Tenia (buey)
<i>T. solium</i>	Teniasis	Tenia (cerdo)
<i>Trichuristrichiura</i>	Trichuriasis	Gusano

FUENTE: Metcalf & Eddy, 1995.

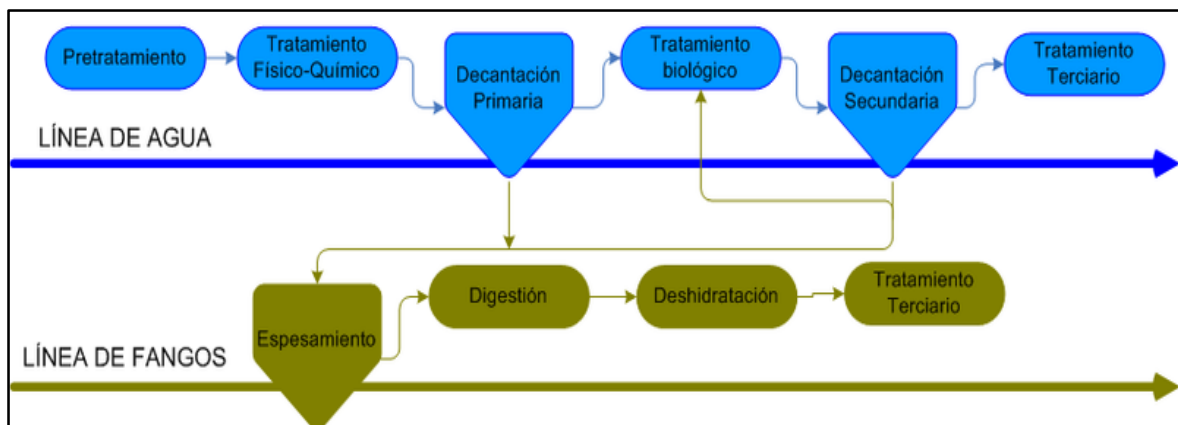
1.5. Tratamiento de Aguas Residuales

El objetivo principal de una planta encargada de la depuración de las aguas residuales conocida también como planta depuradora de aguas residuales (EDAR) es reducir los contaminantes presentes en dichas aguas por ende volver sus vertidos aceptables para el ambiente acuático natural como son; los ríos, lagos, mares, embalses, o el suelo, también ser reutilizados para fines agrícolas o actividades industriales o de otros fines.

Para la obtención del nivel de depuración que debe tener cada clase o tipo de contaminante está en función de los modelos de autodepuración del medio receptor, de revisión de normativas vigentes y que se deben cumplir y del alcance de los objetivos propuestos.

El grado de dificultad de un sistema de tratamiento de una estación depuradora puede estar en función de los objetivos propuestos para el efluente proveniente de dicho tratamiento, poniendo a consideración la cantidad de operaciones y procesos con que cuenta el sistema de depuración para las aguas residuales los niveles o proceso comunes en una planta depuradora son: tratamiento preliminar, tratamiento primario, Tratamiento secundario, tratamiento terciario o avanzado. (MOZÓN. I, 2001 p. 365)

FIGURA 1-5: Esquema de una EDAR (Metcalf & Eddy, 2003).



FUENTE: Crites. R, 2000.

1.5.1. Pretratamiento

Es un proceso anterior al tratamiento primario, su objetivo primordial es retener todo el material de gran tamaño y visible que transporta el agua residual. La descarga de estos materiales gruesos genera gran impacto visual o estético al medio que recepta, a continuación lo que se busca eliminar con el pretratamiento:

- Se trata de eliminar residuos sólidos o basura presentes en los colectores, para así prevenir daños o estancamientos en los procesos de tratamientos posteriores de las aguas residuales.
- Eliminar presencia de partículas sedimentables o de arena que puedan perjudicar a los diferentes procesos de eliminación de contaminantes, también previene el desgaste producido por el arena sobre mecanismos, en los procesos de sedimentación y otros lugares afectando el flujo.
- Reteniendo grasas, espuma flotantes presentes en las aguas residuales que puedan afectar en la aireación de las aguas en los procesos biológicos aerobios, evita la adhesión a los objetos al subir a la superficie.

Los procesos más utilizados en el pretratamiento son los siguientes: Desbaste, desarenado, desengrasado, en algunas ocasiones se puede incluir el tamizado, preaireación y predecantación etc.

1.5.2. Tratamiento Primario.

El objetivo principal de este tratamiento es la reducción del material que se encuentra en suspensión a excepción las partículas coloidales o las partículas disueltas en el agua, así este tipo de tratamiento primario permite alcanzar una remoción del 60 a 65% de los sólidos sedimentables e incluso un 30 a 35% de sólidos suspendidos y una considerable disminución bacteriológica que se encuentran presentes en las aguas residuales.

La eficiencia en la remoción de contaminantes de estos tratamientos varía en función del proceso utilizado y las características que poseen las aguas residuales a tratarse.

Hay una variedad de procesos que se pueden tomar en consideración dentro de los tratamientos primarios como son: (filtración, tamizado, lagunas, fosas sépticas, tanques Imhoff, etc.), los procesos más utilizados en el tratamiento de las aguas residuales se pueden clasificar de la siguiente manera:

1.- Procesos de separación sólidos-líquidos:

- Sedimentación o decantación primaria
- Flotación

2.- Proceso mixto:

- Decantación-Flotación

3.- Procesos complementarios de mejora:

- Floculación
- Coagulación proceso químico-físico

1.5.3. Tratamiento Secundario

Conocidos también como tratamientos biológicos, este tipo de tratamiento permite la aceleración de la descomposición de contaminantes orgánicos mediante reacciones bioquímicas causadas por la acción de los microorganismos, en este tipo de tratamiento los procesos más comúnmente utilizados tenemos: lodos activados, filtros percolados, lagunas de aireación y estabilización, así como la utilización de oxígeno como tratamiento biológico y tratamiento anaerobio. (MOZÓN. I, 2001 pp. 367, 387)

Los tratamientos empleados en este tipo tienen una eficiencia de remoción que alcanza un 90% o más de DBO. (SEOÁNEZ. M, 2000 p. 66)

1.5.4. Tratamiento Terciario

Este tipo de tratamiento consiste en procesos físico-químicos especiales que permiten conseguir limpiar el agua de contaminantes concretos como el fósforo, nitrógeno, minerales, metales pesados, virus, compuestos orgánicos, este tratamiento es más costoso que los anteriores y son utilizados para casos más exclusivos como la depuración de contaminantes de algunas industrias. En algunas ocasiones este tipo de tratamiento se utiliza para mejorar los efluentes de los tratamientos biológicos secundarios.

1.6. Sistemas Naturales de Depuración.

Una de las principales diferencias que poseen los diferentes procesos biológicos está dada por la proporción de masa bacteriana que utilizan dichos procesos, los sistemas intensivos tecnológicos como lechos bacterianos, fangos activados demandan de cantidades elevadas de microorganismos

degradadores que operan durante tiempos excesivamente cortos, mientras los sistemas extensivos como es la autodepuración natural trabajan con pequeñas cantidades de biomasa que realizan su acción a lo largo de periodos de tiempo extensos.

Para tener un aceleramiento del proceso se requiere una mezcla mecánica de la biomasa activa con las aguas residuales, esta actividad tiene como finalidad poner en contacto al oxígeno proveniente de la atmósfera con las bacterias para favorecer de mejor manera su respiración.

Los sistemas extensivos o naturales demandan de la fuerza que posee la naturaleza en lugar de utilizar fuerza mecánica o artificial, se utiliza factores como la fuerza del viento para la agitación, o por acción de corrientes provocadas por el acción del calentamiento de las aguas, la incorporación del oxígeno en diversos sistemas se asegura por acción de las algas.

Los procesos utilizados en los sistemas de depuración natural requieren de mayores periodos de tiempo para degradar la materia orgánica, mayores periodos de tiempo de permanencia de las aguas, y mayor superficie de operación, a estos procesos naturales como los humedales artificiales y los sistemas de lagunaje son considerados como sistemas de bajo coste.

1.6.1. Lagunaje

Llamadas también lagunas de estabilización son diseños sencillos de tierra expuesta a condiciones ambientales, factores que favorecen e influyentes en el tratamiento, las aguas parcialmente tratadas o brutas son estabilizadas por acción de los factores ambientales como la luz solar, el aire y microorganismos.

Estos sistemas de lagunaje son empleados favorablemente en zonas con climas calurosos y soleados, pero también se puede implementar en zonas con climas fríos y nublados obteniendo resultados favorables.

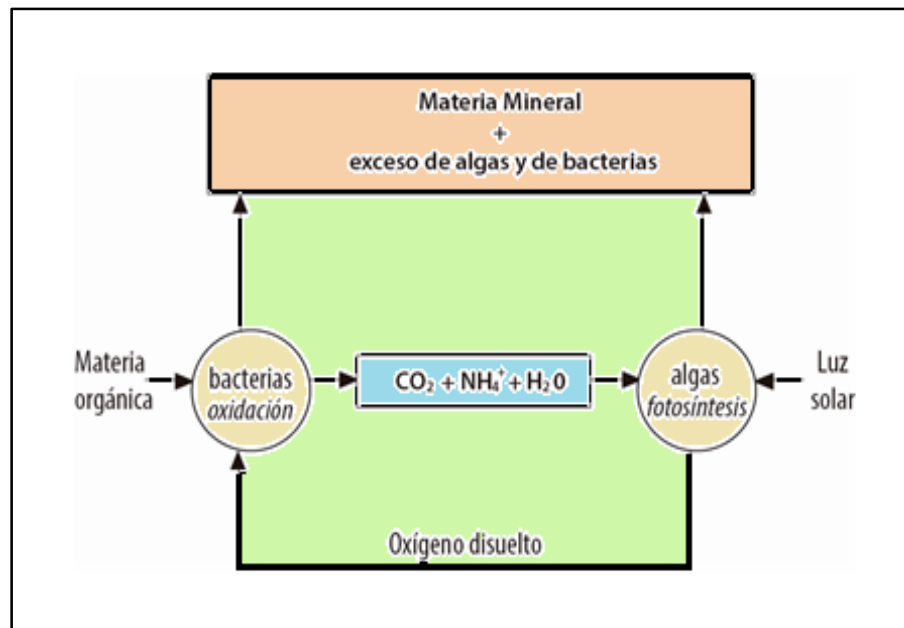
1.6.1.1. Funcionamiento

Se forma un ciclo simbiótico en la parte interior de la laguna por el cual las algas, los microorganismos autótrofos producen su propio material celular a partir de la materia inorgánica liberando oxígeno, mientras las bacterias presentes utilizan la materia orgánica procedente de los desechos para sintetizar su alimento y utilizando el oxígeno disuelto presente en el agua para su respiración, acción que libera dióxido de carbono indispensable para el proceso fotosintético de las algas.

El material entrante como los sólidos presentes en las aguas negras ingresan en la laguna en estado de descomposición y salen transformados en células de algas muy estables sin producir efectos perjudiciales.

Los parámetros que mejor simbolizan el funcionamiento de las lagunas son: el oxígeno disuelto, pH y la alcalinidad que cambian con relación del tiempo, la estación climatológica y la profundidad del estanque o laguna.

FIGURA 1-6: Simbiosis entre algas y Bacterias.



FUENTE: Mozón, I, 2001.

1.6.1.2. Tipos de Lagunas.

La clasificación de las lagunas de estabilización se puede realizar de diferentes puntos de vista, a continuación su clasificación se realizó según su actividad microbiana.

- **Aerobias:** Son aquellas en las que las bacterias aerobias descomponen los residuos como fuente de alimentación, mientras que las algas por acción fotosintética suministran de oxígeno necesario para conservar las condiciones aerobias.
- **Anaerobias:** Operan de igual forma que la de un digestor donde la descomposición de la materia orgánica se encargan las bacterias anaeróbicas.

- Facultativas: Son aquellas en las que se puede hallar presencia de organismos aeróbicas, anaeróbicas y facultativas, este tipo posee una zona aerobia superior sostenida por las algas y una zona anaerobia en el fondo. (MOZÓN. I, 2001 pp. 388, 405, 515, 517, 519. 536)

1.6.2. Humedales Artificiales.

Son sistemas encargados de la depuración de las aguas residuales, este sistema consiste en el desarrollo de macrófitas enraizadas sobre un fondo o lecho de grava impermeabilizada. La intervención de las macrófitas hace posible una serie de interacciones físicas, químicas y biológicas por las cuales las aguas residuales afluentes serán depuradas en forma progresiva y lentamente.

Los humedales artificiales son utilizados para tratamientos de una gran variedad de efluentes:

- Efluentes domésticos y urbanos.
- Efluentes industriales incluyendo fabricación de papel, productos químicos y farmacéuticos, cosméticos, alimentación, refinerías y mataderos entre otros.
- Efluentes de drenaje de extracciones mineras.
- Efluentes de escorrentía superficial agrícola y urbana.
- Tratamientos de fangos de depuración convencionales, mediante deposición superficial en humedales de flujo subsuperficial donde se deshidratan y mineralizan. (García et al., 2004 p. 7)

“Estos sistemas depuran mediante la remoción del material orgánico (DBO), oxidan el amonio, reduciendo los nitratos y removiendo fósforo. Los mecanismos son complicados e implican oxidación bacteriana, filtración, sedimentación, y precipitación química”. (Cooper et al., 1996 p. 7)

La fitodepuración se refiere al tratamiento de las aguas residuales utilizando material vegetal como plantas (macrófitas) en humedales o sistemas acuáticos ya sean estos naturales o artificiales.

La palabra macrófitas en términos científicos se refiere a las plantas acuáticas incluyendo a diversas especies como plantas vasculares, musgos, algas y helechos. (Fernández et al., 2004 p. 8)

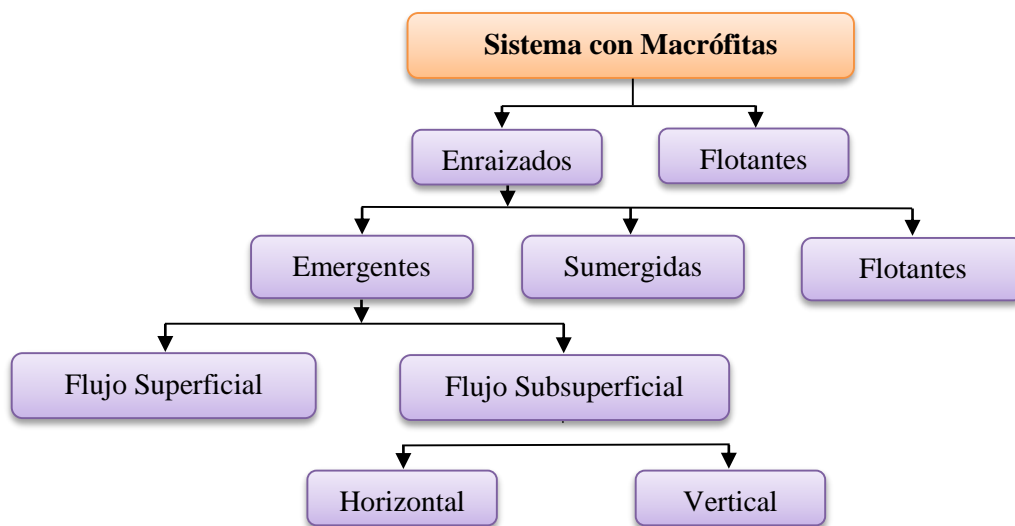
1.6.2.1. Clasificación de los Humedales Artificiales.

La clasificación de los humedales artificiales puede realizarse según el tipo de macrófitas que se emplee en su funcionamiento en: Macrófitas fijas al sustrato (enraizadas) o Macrófitas flotantes libres.

A continuación su clasificación considerando según la forma de vida que presentan las macrófitas:

- Sistemas de tratamiento basados en macrófitas de hojas Flotantes: Principalmente angiospermas sobre suelos anegados, las especies más empleadas en este sistema es el Jacinto de agua, y la lentejuela de agua.
- Sistemas de tratamiento basados en macrófitas sumergidas: En este tipo comprenden algunos helechos, musgos, carófitas y muchas angiospermas.
- Sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergentes: En este tipo son plantas perennes en suelos anegados permanente o temporalmente con órganos reproductores aéreos. (Cricyt, 2007 p. 8)

FIGURA 1-7: Clasificación de Humedales Artificiales con Macrófitas.



FUENTE: Delgadillo & Camacho, 2010.

En la siguiente clasificación se destacaremos las características de los humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial con macrófitas enraizadas de tipo emergentes, las cuales son las más importantes en nuestro estudio.

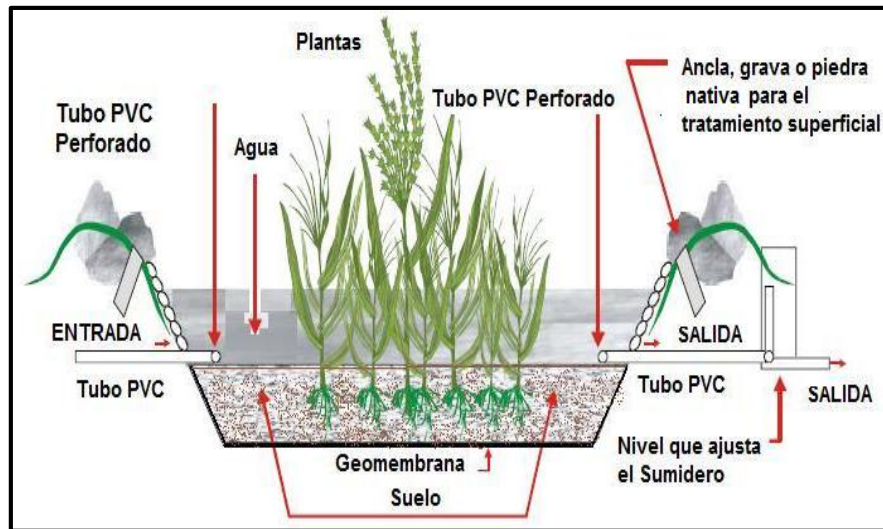
1.6.2.1.1. Humedales artificiales de flujo superficial.

Estos tipos de humedales se caracterizan porque el flujo del agua transita preferentemente entre los tallos de las plantas esta circulación está expuesta a condiciones atmosféricas por estar sobre la superficie, esta clase de humedales surgió de la modificación del sistema de lagunaje tradicionales o conocidos, estas se diferencian por su poca profundidad (no mayor a 0.6 m) y por presencia de plantas.

Este tipo de sistema en términos de paisaje tiene la característica de albergar distintas variedades de especies como peces, anfibios, aves, etc. también pueden considerarse como un espacio turístico y

por su interacción biológica que existe en este sistema puede dar lugar a el interés de estudio de múltiples disciplinas.

FIGURA 1-8: Humedal Artificial de Flujo Superficial.

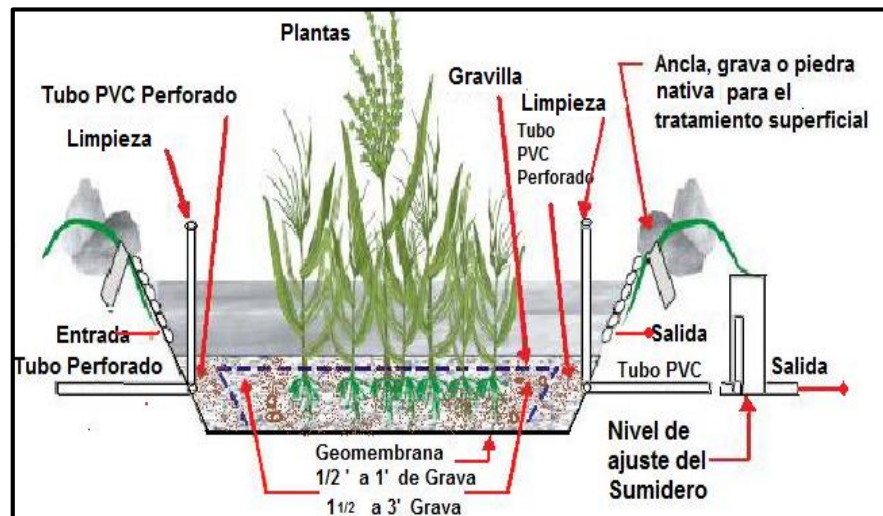


FUENTE: Adaptado por Diana C, 2010.

1.6.2.1.2. Humedales artificiales de flujo Subsuperficial

Este tipo de humedales artificiales se diferencian porque el flujo del agua circula por un medio granular (subterráneo), este sistema puede trabajar con una profundidad del agua aproximada a 0.6 m, las plantas utilizadas para este tipo de tratamiento se encuentran plantadas en el medio granular y las raíces y rizomas de las plantas están siempre en contacto con el agua.

FIGURA 1-9: Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial.



FUENTE: Adaptado por Diana C, 2010.

Estos tipos de humedales artificiales de flujo Subsuperficial se puede clasificar en dos tipos:

- a) Humedales de flujo subsuperficial horizontal.
- b) Humedales de flujo subsuperficial vertical.

A continuación describiremos cada uno de estos tipos de humedales artificiales de flujo Subsuperficial, sus características y diferencias entre ellas.

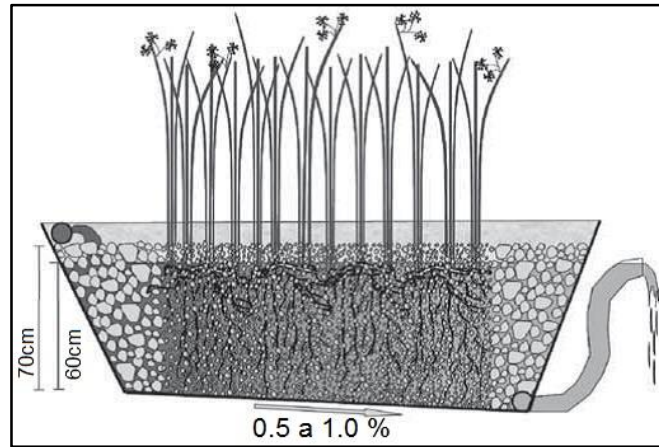
a) Humedales subsuperficiales de flujo horizontal.

Este tipo de humedales por lo habitual su diseño consta de una plataforma o cama de tierra, grava o arena donde es plantada la vegetación acuática utilizadas para el tratamiento, la más utilizada en la mayoría de los casos es la caña común o carrizo (*Phragmites australis*), la cama es recubierta en su totalidad con una membrana impermeable para evitar posibles infiltraciones hacia el suelo. (Brix en Kolb, 1998 pg. 10)

El agua que se quiere tratar ingresa de forma constante por la parte superior de un extremo y es recolectada por un extremo inferior opuesto de donde ingresa el agua. El agua residual es tratada a medida de que transcurre por el medio poroso conocido como flujo pistón, la profundidad del lecho oscila entre 0.45 a 1 m con una pendiente que varía entre 0.5 a 1%.

El ingreso del agua no es directo al medio granular si no que existe una zona de amortiguamiento de grava gruesa, para la recolección de las aguas tratadas se cuenta con un tubo de drenaje cribado rodeada con la misma grava utilizada al inicio, el diámetro de la grava utilizada tanto al ingreso como a la salida de los humedales su diámetro varía entre 50 a 100 mm y para la zona de plantación está constituida por grava fina con un diámetro que varía entre 3 a 32 mm.

FIGURA 1-10: Humedales subsuperficiales de flujo horizontal.



FUENTE: Delgadillo & Camacho, 2010.

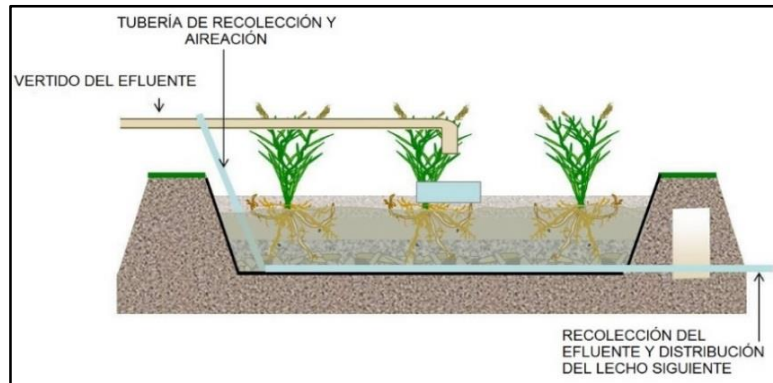
b) Humedales de flujo subsuperficial vertical

Estos sistemas verticales se diferencian porque el ingreso del agua es de forma intermitente, las condiciones de saturación de la cama del sistema con agua son seguidas de periodos de insaturación del sistema esto ayuda a la estimulación del abastecimiento de oxígeno. (Kolb, 1998 pg. 10)

A este tipo de sistema también se le conoce como filtros intermitentes, el ingreso del agua residual se lo realiza a través de una tubería y el sistema lo recibe de arriba hacia abajo, pasando el agua verticalmente a través de los componentes del sistema (grava y arena) y es recolectada a través de redes de recolección por tuberías que están ubicadas en la parte inferior por debajo del sustrato inerte del humedal, el suministro del agua es de forma intermitente para estimular las condiciones aerobias del sistema,.

la vegetación utilizada se debe plantar en el medio granular, a más del ingreso del agua de forma intermitente para favorecer las condiciones aerobias también se suele implementar un sistema de chimeneas cribadas con salientes hacia la superficie, una de las más notables diferencias con los humedales de flujo subsuperficial horizontal es que el sustrato cuenta con varias capas que va desde la capa más fina que se encuentra ubicada en la parte superior hasta la capa de grava más gruesa ubicada en el fondo del humedal.

FIGURA 1-11: Humedales de flujo subsuperficial vertical



FUENTE: Joan & Angélica, 2008.

1.6.2.1.3. Partes de los humedales de flujo subsuperficial.

Los humedales Subsuperficiales están constituidos básicamente por cuatro constituyentes principales.

- Agua residual.
- Sustrato
- Vegetación
- Microorganismos

a).- Agua Residual

Las aguas residuales son procedentes de una red de abastecimiento de agua en beneficio de una población y que han sufrido diversas alteraciones por algún tipo de actividad doméstica, puede ser industrial, o de uso comunitario, estas aguas son recolectadas por un sistema de alcantarillado que las llevará a su tratamiento en los humedales. (Mara en Rolim, 2000 pg. 11)

Estas aguas residuales según su uso procede de la mezcla de los líquidos con los sólidos provenientes de oficinas, locales comerciales, residencias, edificios e instituciones combinados con sólidos resultantes de procesos industriales, actividades agrícolas, también son incluidos las aguas subterráneas y superficiales y también las aguas procedentes de precipitaciones. (Mendo en Rolim, 2000 pg. 11)

Según Lara (1999) considera a la hidrología como el componente de diseño más importante dentro de un humedal implementado porque consideraba que encerraba en si todas las funciones de un humedal y además alcanzando a ser un factor primario determinante que delimita el éxito o fracaso del sistema.

A continuación indicaremos en una tabla los contaminantes importantes y de interés en el tratamiento de las aguas residuales.

TABLA 1-2: Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales.

CONTAMINANTES	IMPORTANCIA
Sólidos Suspendidos	Lo sólidos suspendidos pueden llevar al desarrollo de depósitos de lodos y condiciones anaeróbicos, cuando los residuos no tratados son lanzados al ambiente acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuestos principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas, por lo general se miden en términos de DBO y DQO. Si es descargada sin tratamiento al medio ambiente, su estabilización biológica puede llevar al consumo de las fuentes de oxígeno natural y al desarrollo de condiciones sépticas.
Microorganismos Patógenos	Los organismos patógenos existentes en las aguas residuales pueden transmitir enfermedades.
Nutrientes	Cuando son lanzados en el ambiente acuático, pueden llevar al crecimiento de vida acuática indeseable. Cuando son aplicados al suelo en cantidades excesivas, puede contaminar también el agua subterránea.
Compuestos tóxicos	Compuestos orgánicos e inorgánicos seleccionados en función de sus conocimiento o sospecha de carcinogenicidad, teratogenicidad o elevada toxicidad. Muchos de esos compuestos se encuentran en las aguas residuales.
Materia Orgánica Refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales, ejemplo típicos incluyen detergentes, fenoles y pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son normalmente adicionales mediante actividades humanas, tiene una alta persistencia en el ambiente lo que incrementa su posibilidad de acumulación y toxicidad.
Sólidos Inorgánicos disueltos	Componentes inorgánicos, como calcio, sodio y sulfato, deben ser removidos si se va a usar nuevamente el agua residual, por ser potenciales degradadores del suelo.

FUENTE: Metcalf & Eddy en Rolim, 2000.

b).- Sustrato (Medio Granular)

Los humedales están formados por constituyentes como son: arena, grava, roca, sedimentos y restos vegetales que aparecen y se almacenan dentro del humedal debido al crecimiento biológico.

El medio granular tiene que tener una característica principal que es la permeabilidad adecuada para que permita el paso del agua a través del medio, esta situación obliga a utilizar un tipo de suelo granular en especial la grava seleccionada con un diámetro aproximado de 5mm, la importancia del sustrato, sedimentos y restos vegetales en los humedales artificiales son por varias razones:

- Porque soportan a una gran cantidad de microorganismos que viven dentro de los humedales.
- La movilidad del agua dentro de los humedales se ve influenciada por la permeabilidad del sustrato.
- Existe varias transformaciones químicas y biológicas que se dan en el interior del sustrato.
- Porque proporciona el sustrato almacenamiento para una gran cantidad de contaminantes.
- Al acumularse gran cantidad de materia vegetal aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal, la materia orgánica da parte al intercambio de materia, ayuda a la fijación de microorganismos, sirviendo también como fuente de carbono y energía para algunas reacciones biológicas de importancia en el interior del humedal. (Lara, 1999 p. 12)

De forma directa el medio granular retiene sustancias contaminantes mediante interacciones física y químicas. De forma indirecta elimina contaminantes por servir de soporte a las plantas y bacterias que ayudan a biodegradar dichos contaminantes.

c).- Vegetación

El rol de importancia de la vegetación utilizada lo realiza las raíces y rizomas enterradas en el medio que sirve de soporte, las plantas son organismos foto autótrofas es decir que acumulan energía solar para transformar el carbono inorgánico a carbono orgánico.

Poseen una capacidad de incorporar a través de las hojas, tallos oxígeno a la atmósfera y al medio en donde se encuentran las raíces, este oxígeno incorporado forma zonas aerobias donde es aprovechado por los microorganismos el oxígeno existente en esta región para efectuar diversas reacciones de degradación de materia orgánica y de nitrificación. (Arias, 2004 p. 13)

Según Lara (1999) las plantas emergentes juegan un papel importante en el tratamiento de las aguas residuales y vertidos por varias razones:

- Ayudan a estabilizar el sustrato y a limitar la canalización del agua del flujo.
- Originan a que las aguas tengan velocidades bajas y permiten el depósito de los materiales en suspensión.
- Incorporan en los tejidos de las plantas carbono, nutrientes y elementos trazas tomados del sustrato.
- Transfieren gases de la atmósfera y de los sedimentos.
- Oxigenan otras zonas dentro del sustrato mediante el escape del oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas.
- Las plantas poseen tallos y raíces que brindan espacios para la fijación de gran variedad de microorganismos. (DELGADILLO & CAMACHO, 2010 pp. 7-13)

Pasto Alemán (*Echinochloa polystachya*).

Pertenece a la familia de las Poaceae, subfamilia: Panicoideae, tribu: Paniceae, es conocida como pasto alemán, hierba de río entre otros. Es una gramínea perenne, muy robusta con tallos erectos cuando son jóvenes y decumbentes cuando adulta de una altura de 90 cm, con contenido de proteína de 13,8% a las cuatro semanas, está distribuida en: América del Norte, Mesoamérica, Caribe, América del Sur.

Esta es una especie nativa de pantanos, lagos y costas de las tierras húmedas, esta especie es permanente en humedales naturales y crecen en el agua a 30 cm de profundidad, tolera un amplio rango de la fertilidad del suelo, y pH que oscilan entre 4,0-8,0; este pasto suele plantarse de tallo o estolón esquejes.

Pasto Elefante (*Pennisetum purpureum* Schumacher)

Pertenece a la familia de las Poaceae Subfamilia: Panicoideae, Tribu: Paniceae, es conocida por sus nombres comunes: Elefante, Yerba Elefante, Napier, Bruja, Gigante, (“Elephant Grass, Merker”). La yerba elefante es nativa del África, es una planta perenne de crecimiento vigoroso, que forma grandes cepas con tallos erectos de abundante follaje y alcanza una altura de más de 8 pies (2.5 m). Esta yerba se parece bastante a la caña de azúcar en cuanto a requisitos ecológicos y hábitos de crecimiento. Se adapta a diferentes tipos de suelos, aunque requiere 1,200 mm de lluvia al año para producir altos rendimientos.

Bambú (*Bambusa vulgaris* Schrad Wendl).

Pertenece a la familia de las Poaceae, Subfamilia: Bambusoideae, Tribu: Bambuseae conocido por sus Nombres comunes: Bambú Común, Bambúa, (“Bamboo, Common Bamboo”) El bambú común es oriundo de Sur de Asia. Este tiene una forma de crecimiento similar a un arbusto u árbol, alcanza unos 60 pies (18 m.) de altura. Debido a que los tallos son ahuecados, excepto en los nudos, en muchos países tropicales se utilizan como cañerías y para construcción de viviendas, muebles e instrumentos musicales. Existen otras especies de bambú que difieren al común, mayormente en su tamaño pero no todas pertenecen al género *Bambusa*. La mayoría de las especies pequeñas pertenecen al género *Phyllostachys*. El bambú se propaga vegetativamente mediante la siembra de rizomas y tallos, y se utiliza para estabilizar bancos de ríos, taludes, como ornamental y en artesanías. (EDWIN. G, 2006 pp. 30, 60, 111)

En la siguiente tabla se detalla algunas especies vegetales más utilizadas en el tratamiento de aguas residuales.

TABLA 1-3: Especies vegetales empleadas en la depuración de aguas residuales.

Familia	Nombre Latino	Nombre Común	Temperatura Deseable °C	Salinidad Tol. *ppt	Rango pH
Ciperáceas	<i>Carex sp.</i>	-	14 a 32	20	5 a 7,5
	<i>Eleocharis sp.</i>	-			
	<i>Scripus lacustris</i> L.	Junco de laguna	18 a 27		4 a 9
Gramíneas	<i>Glyceria fluitans</i>	Hierba del maná	12 a 35	45	2 a 8
	<i>Phragmites australis</i>	Pasto alemán			
		Pasto elefante			
	<i>Phragmites communis</i>	Carrizo			
Caña bambú					
Iridáceas	<i>Iris</i>	Lirio amarillo	16 a 26	20	5 a 7,5
	<i>Pseudacorus L.</i>	Espadaña fina			
Juncáceas	<i>Juncus sp.</i>	Junco			
Tifáceas	<i>Thypha sp.</i>	Eneas	10 a 30	30	4 a 10
		Espadaña			

FUENTE: Lara. J, 1999.

d).- *Microorganismos*

Los encargados de realizar el tratamiento biológico son los microorganismos, estos se encuentran en la región superior del humedal donde prevalece el oxígeno procedente de las raíces de las plantas y el oxígeno incorporado de la atmosfera, en esa zona se proliferan colonias de microorganismos

aerobios que utilizan el oxígeno para sus procesos, en las demás zona del humedad predomina los microorganismos anaerobios. Los procesos principales que realizan los microorganismos es la degradación de la materia orgánica, la eliminación de los elementos trazas, nutrientes y el proceso de desinfección. (Arias, 2004 p. 14)

En la biopelícula existente en el humedal existen microorganismos como bacterias, levaduras, hongos y protozoos, esta biomasa microbiana utiliza para su alimentación gran parte del carbono y nutrientes.

La principal actividad que tienen los microorganismos es de transformar una gran cantidad de sustancias orgánicas e inorgánicas, estas sustancias son convertidas en productos inocuos, inofensivos e insolubles y alterando el potencial de reducción y oxidación del sustrato perturbando así la capacidad de procesos del humedal, así también se debe agradecer a los procesos microbiológicos que muchos de los contaminantes son transformados a gases que son liberados al atmósfera según Lara (1999).

1.6.2.2. Mecanismo de remoción de contaminantes.

Dentro de un humedal se generan diversos procesos o mecanismos de remoción de contaminantes que se encuentran presentes en las aguas residuales, así mismo se dan un amplio rango de procesos químicos, físicos y biológicos dentro del humedal, dando a entender la dificultad de la influencia e interacción de cada componente involucrado.

A continuación se expresa en una tabla los principales procesos y mecanismos que ocurren en los humedales implementados.

TABLA 1-4: Mecanismos de remoción en los sistemas de tratamiento basados en macrófitas.

PARAMETROS EVALUADOS	MECANISMOS DE REMOCIÓN
Sólidos Suspendidos	- Sedimentación/Filtración
DBO	- Degradación microbiana (aeróbica y anaeróbica). - Sedimentación (acumulación de M.O/lodo en la superficie del sedimento).
Nitrógeno Amoniacal	- Amonificación seguida de nitrificación y desnitrificación amoniacal. - Captado por la planta.
Patógenos	- Sedimentación/Filtración - Declinación - Radiación ultravioleta - Excreción de antibióticos por las raíces de las Macrófitas.

FUENTE: BRIX, 1993 citado por KOLB, 1998.

1.6.2.2.1. *Remoción de sólidos suspendidos.*

En el tratamiento previo la mayor cantidad de los sólidos suspendidos y sedimentos son reducidos, una de las funciones del humedal es de ayudar la remoción en su totalidad de los remanentes. La intervención de las raíces de las macrófitas y el sustrato disminuyen la velocidad del agua, beneficiando ambos procesos. La implementación de un tratamiento previo es importante para evitar que el humedal se obstruya o se sature rápidamente.



Remoción de sólidos suspendidos.

1.6.2.2.2. *Remoción de Materia Orgánica.*

La remoción de la materia orgánica se logra principalmente mediante el proceso de degradación aeróbica o anaeróbica, mediante la fijación de la materia orgánica a los sólidos suspendidos mediante procesos físicos como sedimentación y filtración una pequeña porción es removida por esta acción. Los microorganismos están encargados de la biodegradación, estos se encuentran principalmente albergados y proliferados en las raíces de las plantas y en la superficie de los sedimentos. (Brix en Kolb, 1998 p. 15)

Todos los microorganismos que intervienen en los procesos de tratamientos necesitan una fuente de energía y carbono así como también nutrientes y elementos trazas para poder generar o sintetizar células nuevas, los microorganismos de acuerdo a su fuente de nitrógeno se pueden clasificar en autótrofos y heterótrofos. Los microorganismos heterótrofos se diferencian porque utilizan material orgánico como fuente de carbono para generar sintetizar nuevos microorganismos mientras que los autótrofos no utilizan materia orgánica como fuente de carbono si no dióxido de carbono. (Gray en Kolb, 1998 p. 15)

Ambas clases de microorganismos se asemejan por utilizar luz o algún tipo de reacción química de oxidación-reducción como fuente de energía para llevar a cabo todas las diferentes síntesis se les conoce también como bacterias fotótrofos y quimiótrofos respectivamente. (Cooper, 1996 p. 15)

Hay dos grupos de microorganismo que participan en la degradación aeróbica conocidos como aeróbicos quimioheterótrofos que pueden oxidar compuestos orgánicos y liberar amonio mientras que los quimioautótrofos transforman mediante oxidación el nitrógeno amoniacal a nitritos y nitratos, los heterótrofos son los microorganismos encargados de la remoción de la materia orgánica debido a la tasa de metabolismo más alto la presencia del oxígeno es su limitante.

A continuación la degradación anaeróbica se puede expresar de la siguiente manera.

Orgánicos → alcohol, ácidos + nuevas células → CH₄, H₂S, NH₃, H₂, nuevas células

Remoción de Materia Orgánica.

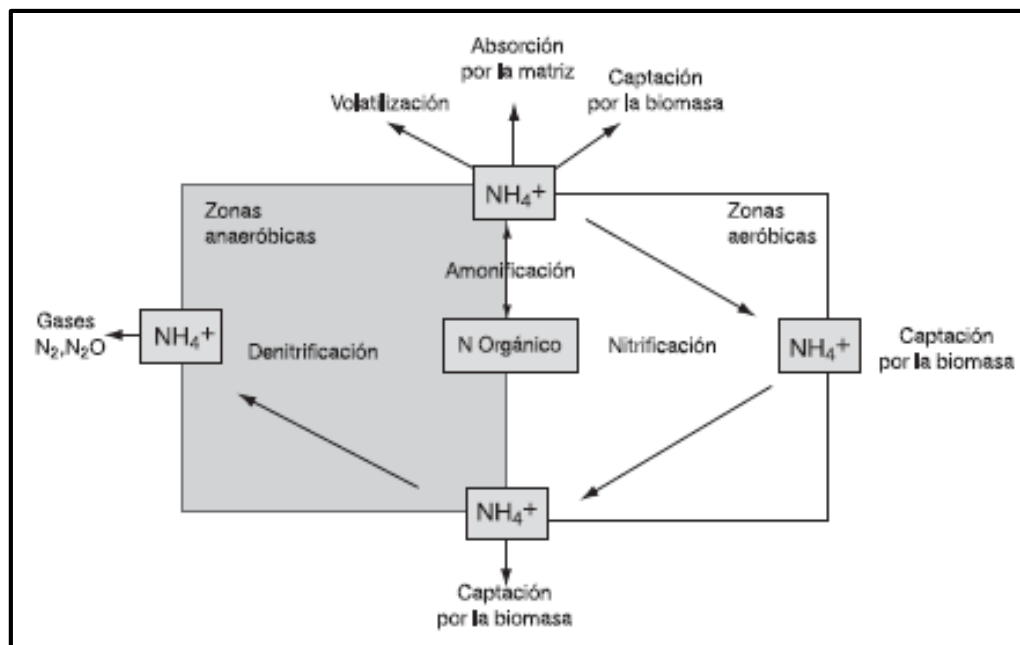
La degradación anaerobia es un proceso de cuatro pasos realizada por bacterias anaeróbicas comparando con la degradación aeróbica es menos eficiente pero predominara si el oxígeno no esta disponible. (Cooper, 1996 p. 15)

1.6.2.3. Remoción del Nitrógeno.

Al ingresar el agua residual para su tratamiento en el humedal el nitrógeno se encuentra en forma de amonio o en alguna forma como compuesto inestable, que fácilmente se puede transformar a amonio. La nitrificación y desnitrificación son los principales mecanismos de remoción del nitrógeno en humedales implementados, estos mecanismos ocurren en diferentes zonas del sustrato, todos estos procesos se los puede considerar como pasos secuenciales iniciando desde la amonificación seguido de la nitrificación y después la desnitrificación.

En zona aeróbica y zonas anaeróbica ocurre el mecanismo de amonificación esto se da por mineralización del nitrógeno presente en los orgánicos.

FIGURA 1-12: Diagrama del metabolismo del nitrógeno.



FUENTE: Cooper et al., 1996.

El mecanismo de nitrificación necesita oxígeno disuelto, amonio, o nitrito para utilizarlo como fuente de energía y como fuente de carbono la presencia de dióxido de carbono, la oxidación ocurre en dos fases cada una de ellas utilizan diferentes especies de bacterias nitrificantes quimioautótrofos.

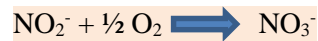
Primer paso es la oxidación de los iones amonio a nitrito (nitrosificación).



Oxidación de iones amonio a nitrito.

En este proceso hay liberación de iones de hidrógeno bajando el pH por lo que es necesario contar con medio alcalino fuerte para mantener un pH constante que este en un rango de 7.5 a 8.6 según. (Cooper, 1996 p. 16)

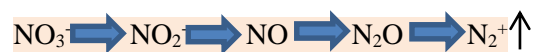
La especie bacteriana conocida para catalizar esta reacción se llama nitrosomas, y para la transformación del nitrito a nitrato lo realiza el género nitrobacter.



Transformación de nitrito a nitrato.

En el proceso de remoción del nitrógeno la desnitrificación es el procedimiento final, esto ocurre bajo condiciones anóxicas que quiere decir que hay ausencia de oxígeno disuelto o hay presencia de oxígeno menor a un 2% de saturación, en fuentes tales como el nitrato, nitrito, o incluso sulfato hay disponibilidad de oxígeno.

Una amplia gama de microorganismos anaeróbicos facultativos, siendo o más conocidos las Pseudomonas sp, Achromobacter sp, Aerobacter sp, en cargados de realizar los procesos todas las reacciones desde el primer paso que es la conversión de nitrito a nitrato seguido de la producción de óxido nítrico y gas de nitrógeno se puede resumir en la siguiente reacción.



Transformación completa del Nitrógeno Asimilable.

Los tres productos resultantes de los procesos son gases, el gas nitrógeno en su mayoría es perdido en la atmósfera debido que los dos gases restantes son pasajeros en la mayoría de los casos, como es el caso de la nitrificación donde la desnitrificación depende de la temperatura y del carbono como fuente de energía necesaria para realizar los procesos de conversión.

1.6.2.2.4. *Remoción del Fósforo.*

La presencia del fósforo en las alcantarillas se encuentra en tres formas diferentes como: ortofosfato, polifosfato, y fosfato orgánico, siendo este último un componente que se encuentra en menor cantidad en las alcantarillas, el polifosfato demanda una posterior degradación a una forma de ortofosfato más aceptable.

Aproximadamente cerca del 25% del fósforo total presente en las alcantarillas se encuentra como ortofosfato así como: PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , H_3PO_4 , que se encuentra apto para el aprovechamiento metabólico inmediato, en general en función del aprovechamiento en una planta de tratamiento lo más importante es la concentración del fósforo orgánico más que la concentración del fósforo total según. (Gray, 1989 p. 17)

El fosfato presente puede estar en forma de sal soluble o de minerales insolubles esto depende del valor del pH presente en el sustrato, esto a su vez da a conocer que el fósforo puede ser transferido a al interior de un humedal implementado. La incorporación del fósforo por absorción puede variar en función al contenido de óxidos metálicos presentes el sustrato según. (Wissing en Kolb, 1998 p. 17)

1.6.2.2.5. *Remoción de Metales pesados.*

Los metales traza poseen una elevada afinidad para la absorción y mineralización principalmente con materiales orgánicos acumulándose generalmente en la matriz de un humedal edificado, los metales pueden encontrarse en diversas formas como forma solubles o como partículas asociadas, encontrándose de la primera forma más comúnmente por ser de mayor biodisponibilidad.

La distribución entre las partículas y la fase sólida se determina mediante la intervención de los procesos físico-químico como son la precipitación, absorción, complejación, sedimentación, erosión y difusión, hay Parámetros adecuados para controlar la sedimentación en el agua como son la relación de flujo/sólidos suspendidos, también condiciones óxicas y anóxicas, fuerza iónica, contenido de carbono orgánico particulados y disueltos, pH, también se suma la concentración de ligantes orgánicos e inorgánicos, y la movilidad de los metales por acción de reacciones bioquímicas, desgraciadamente es causa de mucha preocupación la resolubilización de metales en humedales ya construidos. (Cooper, 1996 p. 17)

Cabe destacar que en los humedales implementados o construidos existen dos zonas ampliamente distinguidas pero no únicas, una llamada zona aeróbica que se caracteriza por tener alta concentraciones de materia orgánica y la otra zona cuenta con concentraciones de materia inorgánica

a esta se le conoce como zona anaeróbica, existiendo entre estas dos zonas principales una también llamada zona anóxica, la presencia de bacterias encargadas de la oxidación de metales y bacterias que reducen los sulfatos presentes en la zonas aeróbicas y los encargados de causar la precipitación de óxidos de metales y sulfatos correspondientemente ha sido determinado por Cooper (1996).

1.6.2.2.6. Remoción de Bacterias.

Desde el punto de vista de la salud pública los microorganismos de mayor importancia son las bacterias, patógenos y virus, los microorganismos patógenos pueden vivir periodos relativamente cortos en aguas naturales y de mucho mejor manera en aguas con temperaturas más frías y con gran presencia de materia orgánica como son las aguas residuales.

La remoción de las bacterias se da por la acción combinada de factores físicos químicos y biológicos, los factores físicos son filtración, sedimentación, agregados y la acción de la radiación solar, también influye los mecanismos biológicos como predación y ataque por bacteriófagos y la muerte conocida también como declinación die-off. Los factores químicos como oxidación, absorción, exposición a sustancias o toxinas tóxicas fijadas por otras bacterias, y exudadas por las raíces de las plantas, pero aún está en duda que la cantidad de estos antibióticos causen algún efecto sobre los patógenos.

En la república Checa se implementaron varios humedales artificiales reportando remoción de bacterias (coliformes fecales) y enterobacterias alcanzando una gran eficiencia de remoción entre 98 a 99% y algunos casos de tasas de remoción bajas estaba directamente relacionado debido a tiempos de retenciones menores según Vymazal et al., (en Kolb, 1998).

1.6.2.3. Funciones de las Macrófitas en los mecanismos de remoción.

Este tipo de vegetación conocida como macrófitas su adaptación les permite crecer y vivir en suelos saturados con agua esto es gracias a que las macrófitas desarrollan un sistema de espacios aéreos internos, estos espacios les permiten abastecerse de aire bajo condiciones extremas de saturación desde la atmósfera hacia las raíces y rizomas, en algunas especies este sistema de espacios aéreos internos constituyen el 60% del volumen total de su tejido. (Brix en Kolb, 1998 p. 18)

Las macrófitas poseen propiedades importantes que le hacen ser un componente importante para los humedales construidos, entre las más importantes propiedades de la macrófitas se destacan la estabilización de la superficie de los humedales, ayuda a evitar el taponamiento de la matriz, favorece al mejoramiento de las condiciones para la filtración física y proporciona gran espacio para albergar al crecimiento microbiano adjunto. Otra de las propiedades importantes de las macrófitas es la

incorporación de oxígeno de la atmósfera hacia los rizomas aun que la cantidad de oxígeno incorporado oscila en un amplio rango.

1.6.3. Ventajas y Desventajas de los Humedales Artificiales.

Para identificar las ventajas y desventajas de los distintos humedales artificiales conocidos se utilizaran dos cuadros comparativos, en el primer cuadro se compara las características de los humedales de flujo superficial y subsuperficial y el segundo cuadro se compara las diferencias de los Humedales de flujo subsuperficial vertical y horizontal.

En términos económicos los costos de los humedales artificiales subsuperficial son mucho mayores a los humedales artificiales superficiales ya que en los primeros inciden a gastos mayores como es la permeabilización del lugar, aprovisionamiento del material (grava) y colocación del mismo.

TABLA 1-5: Ventajas y Desventajas de los Humedales Artificiales.

	Flujo superficial	Flujo Subsuperficial
Tratamiento	Tratamiento de flujo secundario (aguas ya tratadas por otros medios: lagunas, biodiscos, fangos activados, etc.).	Para tratar flujos primarios (aguas pretratadas ej: tanques IMHOF, pozos sépticos).
Operación	Opera con baja carga orgánica.	Altas tasas de carga orgánica.
Olor	Puede ser controlado.	No existe.
Insectos	Control es caro.	No existe.
Protección térmica	Mala, las bajas temperaturas afectan al proceso de remoción.	Buena, por acumulación de restos vegetales y el flujo subterráneo el agua mantiene una temperatura casi Ctte.
Área	Requiere superficies de mayor tamaño.	Requiere superficies de menor tamaño.
Costo	Menor costo en relación al subsuperficial.	Mayor costo debido al material granular que puede llegar a incrementar el precio hasta un 30%.

Valor ecosistema	Mayor valor como ecosistema para la vida salvaje, el agua es accesible a la fauna.	Mayor valor como ecosistema para la vida salvaje, el agua es difícilmente accesible a la fauna.
Usos generales	Son de restauración y creación de nuevos ecosistemas.	Tratamiento de aguas residuales principalmente para casas aisladas y núcleos menores de 200 hab.
Operación	Son tratamientos adicionales a los sistemas convencionales (usadas para tratamientos terciarios y mejoramiento de calidad del agua).	Puede usarse como tratamiento secundarios.

FUENTE: Delgadillo & Camacho, 2010.

Es necesario recalcar que en los sistemas de flujo horizontal tienden a tener mayor posibilidad a colapsarse en términos de circulación de agua, esto quiere decir que el agua a tratarse debe contener una baja cantidad de material en suspensión.

En cuanto a la evaluación su operatividad, ambos tipos de humedales artificiales requieren una baja operación pero continúa, sin llegar a confundir requerimientos mínimos con ninguno. (DELGADILLO & CAMACHO, 2010 pp. 14-20)

TABLA 1-6: Comparación entre humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal y vertical.

	HORIZONTAL	VERTICAL
Funcionamiento	Continuo	Discontinuo
Estado de oxidación	Más reducido	Más oxidado
Eficiencia	Más superficie	menos superficie
Carga superficial	4-6g DBO ₅ /m ² d	20-40g DBO ₅ /m ² d
Nitrificación	Complicada	Se consigue
Operación	Sencilla	Más compleja

FUENTE: Folch, s.f. usado por Delgadillo & Camacho, 2010

1.7. Diseño y Construcción.

1.7.1. Modelo general de diseño de un humedal Artificial.

Los sistemas de tratamiento de humedales artificiales puede ser considerados como reactores biológicos y su rendimiento puede ser determinado mediante una cinética de primer orden de flujo a pistón para la remoción de la DBO y nitrógeno.

La ecuación básica de los reactores de flujo a pistón es la siguiente expresión:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t}$$

Ecuación básica de los reactores de flujo a pistón.

Donde:

- C_e : concentración del contaminante en el efluente (mg/L).
- C_o : Concentración del contaminante en el afluente (mg/L).
- K_T : Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, (d^{-1}).
- T : Tiempo de retención hidráulica (d).

1.7.1.1. Cálculo del Caudal medio.

Según Lara (1999) sugiere varios diseños por falta de consenso a nivel universal en el verdadero método de diseño proponiendo así la aplicación de las siguientes fórmulas.

$$Q = \frac{Q_e + Q_o}{2}$$

Fórmula para el cálculo del caudal medio.

Donde:

- Q : Caudal medio del humedal en (m^3/s).
- Q_e : Caudal de entrada o efluente en (m^3/s).
- Q_o : Caudal de salida o afluente en (m^3/s).

Es necesario calcular el caudal medio con la finalidad de saber la ganancia o pérdida de agua causada por precipitación o filtración a lo largo de flujo de agua residual en el interior del humedal. Un diseño conservador supone que no existe pérdidas por filtración y estima un valor moderado para las pérdidas por evapotranspiración dando así también un valor razonable justificándose en los registros históricos del lugar para cada mes de operación, es usualmente sensato para el diseño asumir que los caudales de entrada y de salida son iguales.

Después de asumir un diseño conservador se procede a determinar el área superficial. (LARA. J, 1999 pp. 45, 46)

1.7.1.2. Cálculo del área superficial.

Según Delgadillo & Camacho (2010), para calcular el área superficial se lo realiza en función del contaminante que se quiere reducir, eliminar, remover comúnmente el diseño se lo realiza con la finalidad de reducir la DBO₅ y se lo calcula con la siguiente ecuación:

$$As = \frac{Q * \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_T * h * p}$$

Fórmula para el cálculo del área Superficial.

Dónde:

- **Q**: caudal de diseño del humedal en (m³/día)
- **C**: concentración del efluente (mg/L)
- **Co**: concentración del afluente (mg/L)
- **K_T**: constante de primer orden en dependiente de la temperatura (d⁻¹).
- **h**: profundidad del humedal.
- **p**: porosidad del medio granular (% expresado en fracción).

1.7.1.3. Cálculo de la constante de primer orden.

La constante de primer orden se debe calcular de la siguiente manera:

$$K_T = 1.104 * 1.06^{T_2 - 20}$$

Fórmula para calcular la constante de primer orden.

T₂: es la temperatura del agua (°C).

El diseño hidráulico es muy importante para obtener buenos resultados en términos de rendimiento y eficiencia en la depuración de las aguas, en todo tipo de modelo de diseño se asume un flujo de forma uniforme y de tipo pistón.

Por eso es necesario para acercarse al modelo ideal y requerido tomar todas las precauciones necesarias en el diseño hidráulico así como también en las técnicas y métodos de construcción adecuados como también se debe considerar que el flujo del agua que está en el interior del humedal debe romper todas las resistencias creadas por las raíces de la vegetación empleada, por capa de sedimentos y sólidos que se encuentran acumulados en el interior de los humedales, la relación largo-

ancho tiene gran influencia por ese motivo es recomendable que la relación largo-ancho no exceda en 4:1. (DELGADILLO & CAMACHO, 2010 p. 32)

1.7.1.4. Cálculo del tiempo de retención.

La retención hidráulica adecuada para alcanzar los niveles de contaminación deseados para la descarga según Lara (1999) se determina de la siguiente manera:

$$THR = \frac{A_s * h * p}{Q}$$

Fórmula para el cálculo del tiempo de retención.

Donde:

- THR: Tiempo de retención en (d).
- A_s : Área superficial en (m²):
- h: Profundidad del humedal en (m).
- p: Porosidad del medio (% expresado en fracción).
- Q: Cauda en (m³/s).

1.7.1.5. Cálculo del largo y ancho del humedal.

Lara (1999) explica que la conductividad hidráulica varía con el número y tamaño de vacío que se encuentran en el medio usado en el humedal, a continuación se empleará un cuadro demostrativo para mostrar las principales características de los sustratos utilizados en los humedales:

TABLA 1-7: Características principales de los sustratos utilizados en los humedales.

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

FUENTE: Delgadillo & Camacho, 2010.

Para el cálculo del ancho y largo del humedal se debe tener en cuenta que la relación largo-ancho no supere el 4:1 según Lara (1999) y Camacho (2010), tomando esta consideración en cuenta en el ancho del humedal se calcula de la siguiente manera:

$$W = \frac{1}{h} * \left(\frac{(Q)(A_s)}{(s)(K_s)} \right)^{0.5}$$

Fórmula para el cálculo del ancho del humedal.

Donde:

- W: Ancho del humedal en (m).
- Q: Cauda en (m³/s) / para el N° de unidades.
- A_s: Área superficial en (m²) / para el N° de unidades.
- h: Profundidad del humedal en (m).
- s: Pendiente del lecho.
- K_s: Conductividad hidráulica (m/d).

El cálculo del largo del humedal se obtiene mediante relación del ancho del humedal y el área superficial como se muestra en la siguiente ecuación:

$$L = \frac{A_s}{W}$$

Fórmula para el cálculo del largo del humedal.

1.7.2. Parámetros de diseño para humedales artificiales.

Se debe considerar que hay dos tipos de humedales de flujo subsuperficial:

- Humedal subsuperficial de flujo horizontal
- Humedal subsuperficial de flujo vertical. (LARA. J, 1999 pp. 47-57)

1.7.2.1. Parámetros para Humedales Subsuperficiales de flujo Horizontal.

El rango en la profundidad del humedal varía desde 0.3 a 1m, siendo 0.6m el valor más utilizado, con una pendiente que oscila entre 0.1 a 1%, siendo 0.5 el valor más utilizado.

Sustrato:

Es el medio que brinda soporte para el crecimiento de las plantas, microorganismos, y es el lugar donde se realiza todos los mecanismos de depuración, es recomendable para el diseño utilizar grava con un diámetro menor a 30mm (4/3") que es la que funciona de mejor manera.

Relación largo-ancho

Seguidamente se calcula la relación largo-ancho (L/A), cabe explicar que mientras mayor sea la relación largo-ancho mejor es el proceso de depuración de las aguas pero se llega a diferenciar algunos problemas de flujo preferencial, de cortocircuito, presencia de agua sobre la superficie del lecho de grava. Por estos motivos es recomendable que la relación largo-ancho se encuentre dentro de estos valores de diseño: largo-ancho de; 2 a 1, 3 a 1 y 4 a 1.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los principales parámetros que se utiliza en el diseño de los humedales subsuperficiales de flujo horizontal.

TABLA 1-8: Parámetros de diseño de humedal subsuperficial de flujo horizontal.

Parámetros	Unidad	Intervalo	Valor usual
Tiempo de retención hidráulico	días	4-15	7
Profundidad agua	m	0,1-0,8	0,6
Área	m ² /heq	2,5-5	
Carga orgánica	gDBO5/m ² dia	3-7,5	<11
Carga orgánica	kg DBO5/heq.di	<70	
Carga hidráulica	m ³ /m ² .dia	0,1-0,2	
características constructivas			
Grava ingreso Salida	mm	50-100	50
Grava media	mm	3-6 5-10 6-12	19
Coeficiente uniformidad		3-5	<5
Profundidad medio	m	0,70-1,5	0,7
Pendiente	%	0-1	0,5
Relación ancho-largo		2:1-7:1	3:1

Drenaje			
Tubería perforada- tamaño	Pulgada	3-4	4
Distribución de agua			
Tubería perforada - canal	Pulgada	2-4	3

FUENTE: Delgadillo & Camacho, 2010.

1.7.2.2. Parámetros para Humedales Subsuperficiales de flujo Vertical.

En este tipo de humedal la aplicación de agua se lo hace en forma intermitente esto se lo realiza a través de un sistema de tuberías que se encuentra situado por encima del lecho de grava o arena, para mejorar el funcionamiento de estos humedales siempre es recomendable la construcción de dos humedales en el diseño para que trabajen en paralelo, esto busca generar que cada humedal cuente con un periodo de reposo y un periodo de aplicación del agua, concluyendo que el periodo de reposo optimo es que por cada periodo de alimentación de agua se tenga dos periodos de reposo.

El momento de la aplicación del agua se toma en cuenta que la superficie no tenga presencia de agua del riego anterior, esto facilita la oxigenación de la parte interna del lecho filtrante.

Profundidad del Humedal:

La profundidad del humedal se encuentra oscilando entre unos 60 a 80 cm, donde el agua fluirá a través del lecho poroso y se recogerá posteriormente mediante un sistema de tuberías de drenaje que se encuentran situadas en el fondo del humedal.

Pendiente:

Por lo general la pendiente que se encuentra en la superficie del humedal es plana (0%) para que no tener zonas de estancamiento de aguas en la superficie.

La pendiente ubicada en el fondo del humedal oscila entre 0.5 y 2%, pero mayormente se trabaja con una pendiente ligera de 1%.

Sustrato:

El sustrato se conforma de distintas capas de material estas capas varían según el uso que se le dará al humedal sea este tratamiento primario o secundario como se demuestra en la siguiente tabla según sea el caso:

TABLA 1-9: Características del sustrato para diseño de humedales verticales.

	Tratamiento Primario	Tratamiento Secundario
Capa Superficial	h>30cm grava fina, diámetro efectivo de 2-10mm	h>30cm grava fina, diámetro efectivo de 25 a 40mm
Intermedia	h de 10 a 15 cm grava fina diámetro efectivo de 5a10 mm	h de 10 a 15 cm grava fina diámetro efectivo de 3a10 mm
Drenaje	h de 10 cm grava fina diámetro efectivo de 20 a 40 mm	h de 10 cm grava fina diámetro efectivo de 20 a 40 mm

FUENTE: Delgadillo & Camacho, 2010.

Para este tipo de humedales se debe considerar las siguientes condiciones para su diseño. Para los humedales que trabajan como tratamiento primario el coeficiente de uniformidad es menor a 5 y que el caudal de aplicación del agua debe ser mayor al caudal de infiltración, en el agua residual la conductividad hidráulica se reduce debido a la presencia de partículas suspendidas quedando la expresión de la siguiente manera:

En la siguiente tabla se mostrará las principales características y parámetros de los humedales subsuperficiales de flujo vertical.

TABLA 1-10: Parámetros de diseño de humedal subsuperficial de flujo vertical.

Factor	Unidad	Intervalo	Valor Usual
Medio Filtrante			
Arena fina lavada (secundaria)	Mm	0,25-0,75	0,35
Grava Fina (primaria)	Mm	2.00-8.00	2-5mm
Profundidad	Cm	45-90	60
Coeficiente Uniformidad	%	3-6	<4
Porcentaje Finos	%	<4	<4
Drenaje			
Clase (tubería perforada)			
Tamaño	Pulg.	3-4	4
Pendiente	%	0,1-1	0,5
Grava de Drenaje	Mm	20-40	40
Distribución Agua			
Diámetro de tubería	Pulg.	1-2	1,5
Distancia entre tuberías	m	0,5-1,2	0,6
Orificio de Distribución	mm	3-8	6
Distancia entre Orificios	m	0,5-1,2	0,6

Parámetros de Diseño			
Carga Hidráulica	l/m ² *d	40-60	50<0,005
Carga Orgánica	Kg DBO/m ² *d	0,0025-0,01	
Dosificación			
Frecuencia	Veces/d	4-24	12
Volumen/Orificio	l/orif.*dosis	0,6-1,1	0,9
Tiempo de Aplicación	minutos	2-15	5

FUENTE: Delgadillo & Camacho, 2010.

A demás del diseño hidráulico también se debe tomar muy en cuenta el diseño de las tuberías encargadas de la aplicación del agua, así como la potencia de la bomba, el diseño de la red de drenaje de las aguas tratadas, el tiempo de operación y de aplicación de las aguas residuales al humedal.

1.7.3. Construcción de humedales de flujo Subsuperficial Vertical y Horizontal.

Esta es una de las tecnologías naturales encargadas de la depuración de aguas residuales que ha demostrado ser una buena y viable alternativa para el tratamiento de aguas residuales empleada por las plantas de tratamiento de pequeños núcleos urbanos.

Esta nueva tecnología ha sido acogida favorablemente para ser implementado principalmente por diversos aspectos como son: aspecto natural, poca o nula necesidad de energía para su funcionamiento, por su facilidad de operación, bajo costo de implementación y mantenimiento a diferencia de otras tecnologías, mediante experiencias adquiridas en la construcción de los humedales, se sugiere los siguientes pasos para su implementación:

- Reconocimiento previo del terreno.
- Estudios geotécnicos.
- Desmonte del lugar.
- Levantamiento topográfico y replanteo del lugar.
- Toma de energía eléctrica.
- Construcción de diques de contención.
- Construcción de cámaras de registro de entrada y salida.
- Construcción de casetas necesarias de bombeo.
- Impermeabilización del dique (fosa o embalse) de contención.
- Ensamblado de la red o sistema de colección o drenaje.
- Llenado de las capas del sustrato (arena y grava).
- Ensamblado del sistema de aplicación del agua.

Estos pasos son aplicables para la construcción de los humedales subsuperficiales de flujo horizontal como también la construcción de los humedales de flujo vertical. (DELGADILLO & CAMACHO, 2010 pp. 32-52)

1.8. Normativa Ambiental.

1.8.1. Normativa de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua.

La presente norma técnica ambiental es dictada bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental y se somete a las disposiciones de éstos, es de aplicación obligatoria y rige en todo el territorio nacional.

El presente trabajo de investigación está regido a la normativa expuesta por el texto unificado de legislación secundaria del ministerio del ambiente (tulsma), libro VI anexo 1, tabla 12 “Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce” que dice que toda descarga a un cuerpo de agua dulce deberá cumplir con los valores establecidos en la siguiente tabla.

TABLA 1-11: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.

Parámetros	Expresados como	Unidad	Límites máximos permisibles
Aceites grasas	Soluble en hexano	mg/l	0.3
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aldehídos		mg/l	2.0
Aluminio	Al	mg/l	5.00
Arsénico total	As	mg/l	0.1
Bario	Ba	mg/l	2.0
Boro total	B	mg/l	2.0
Cadmio	Cd	mg/l	0.02
Cianuro total	CN ⁻	mg/l	0.1
Cloro activo	Cl	mg/l	0.5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo ECC	mg/l	0.1
Cloruros	Cl ⁻	mg/l	1000
Cobre	Cu	mg/l	1.0
Cobalto	Co	mg/l	0.5
Coliformes fecales		Nmp/100 ml	200
Coliformes totales		Nmp/100 ml	5000
Color real	Color real	Unidades de color	Inapreciable en dilución 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0.2
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0.5
Demanda química de oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	100

Demanda química de oxígeno	DBO	mg/l	250
Dicloroetileno	Dicloroetileno	mg/l	1.0
Estaño	Sn	mg/l	5.0
Fluoruros	F	mg/l	5.0
Fosforo total	P	mg/l	10
Hierro total	Fe	mg/l	10.0
Hidrocarburos totales de petróleo	TPH	mg/l	20.0
Manganeso total	Mn	mg/l	2.0
Material flotante	Visible		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0.005
Níquel	Ni	mg/l	2.0
Nitratos+ Nitritos	Expresados como nitrógeno (N)	mg/l	10.0
Potencial de hidrogeno	pH		5-9
Solidos sedimentables		mg/l	1.0
Solidos suspendidos totales		mg/l	100
Solidos totales		mg/l	1600
Sulfatos	SO ₄	mg/l	1000
Temperatura	°C		< 35

FUENTE: Ministerio del Ambiente, 2013.

CAPITULO II

2. PARTE EXPERIMENTAL

Este trabajo de investigación se realizó con la finalidad de mejorar las condiciones de rendimiento actual de la planta de tratamiento de aguas residuales de la extractora de aceite de palma Pexa, mediante la implementación de un nuevo sistema de depuración natural de mayor rendimiento en cuanto a remoción de los contaminantes, menor costes de implementación y de mayor aceptación con el ambiente.

Se toma de las muestras de las aguas residuales se lo realizo de una manera rigurosa La caracterización de las aguas residuales se lo realizo en los laboratorios del CESTTA (Centro de Servicio Técnico y Transferencia Tecnológica Ambiental) y SAQMIC (Servicios analíticos químicos y Microbiológicos) con los que cuenta la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Con los resultados obtenidos luego de los análisis físicos-químicos se procedió a realizar los cálculos correspondientes para el diseño del nuevo sistema de tratamiento de las aguas residuales que ayudaría a cumplir con el fin propuesto.

2.1. Localización de la Investigación.

La Planta de tratamientos de aguas residuales con la que cuenta la industria de extracción de aceite de palma africana Pexa se encuentra situada en la provincia de Esmeraldas, en el cantón la Concordia en el kilómetro 44 vía Quininde.

Coordenadas

- Latitud: 00°02'19.5"
- Longitud: 079°23'52.6"
- Altitud: 265 msnm
- Temperatura: 20 a 35°C.
- Precipitación promedio anual: 2000 a 3000 mm.

FIGURA 2-1: Ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Extractora de Aceite de Palma PEXA.



FUENTE: <http://es.weather-forecast.com/weather-stations/La-Concordia>.

Linderos del Predio de la Planta extractora de Aceite Pexa.

El predio está limitado de la siguiente manera:

- Norte: lindera con la propiedad del Sr. Rómulo Trujillo.
- Sur: lindera con la propiedad del Sr. Edison Montesdeoca.
- Este: con el río Cocola.
- Oeste: con la vía a la Concordia-Quininde.

Tipo y rutas de acceso.

La planta de tratamiento de aguas residuales se encuentra ubicada en los terrenos propios de la empresa extractora de aceite de palma PEXA, asentada en la provincia de Esmeraldas cantón la concordia, ubicada referencialmente a 2 Km de la parroquia la independencia, Km 47 de la vía Quininde-Santo Domingo.

Para su acceso cuenta con una vía principal de primer orden en excelentes condiciones, y una vía lastrada de entrada de 200 m en buenas condiciones, llegando directamente a los patios de la Extractora Pexa.

Hidrología de Terreno.

El terreno con el que cuenta la empresa extractora de aceite de palma para realizar sus labores de almacenamiento, tratado y extracción del fruto de la palma, existe un cuerpo de agua cercano al área de influencia de la Extractora, la red hídrica más cercana es el río Cocola aproximadamente a 10 m de las lagunas de tratamiento de aguas residuales de la extractora.

Relieve y Topografía de lugar.

La topografía con la que cuentan los terrenos de predio es de tipo llanura, distinguiéndose algunas pendientes que varían aproximadamente entre el 26 a 50% de inclinación.

2.2. Descripción de los Procesos de la Extractora Pexa.

La extractora Pexa se dedica a la producción que consiste a la extracción mecánica de aceites rojos de palma Africana a través de mecanismos físicos como presando, decantación, y almacenamiento temporal en tanques con una capacidad de 500 toneladas.

TABLA 2-1: Coordenadas de Ubicación de las áreas de Proceso.

IDENTIFICACION DE LUGAR	COORDENADAS UTM	
	ESTE	NORTE
Báscula	0678279	0004289
Patio de Fruta	0678319	0004291
Área de Esterilizado	0678332	0004321
Prensado	0678355	0004283
Digestión	0678355	0004283
Florentinos	0678329	0004335
Calderos	0678368	0004282
Generador	0678390	0004320

FUENTE: Extractora Pexa.

2.2.1. Recepción de Fruta.

Para la recepción de la fruta la empresa cuenta con una báscula de 10 m x 3 m con una capacidad de 80 toneladas para pesar a los camiones que entran y salen dejando el fruto, para el control de datos la empresa cuentan con un software y hardware adecuado, y además para la recepción del fruto se cuenta con una plataforma de cemento de 470 m² en donde se descarga manualmente el fruto desde los camiones que transportan.

2.2.2. Esterilización del Fruto.

En la primera fase de extracción de aceite rojo, la esterilización se lo realiza a través de 4 esterilizadores cilíndricos horizontales conocidos también como autoclaves, actualmente la empresa cuenta con dos esterilizados de 14m de largo por 1.4m de diámetro y dos de 10m por 1.7m de diámetro, donde el fruto es sometido a vapor de agua para conseguir algunos objetivos:

2.2.2.1. Inactivar la Lipasa.

La inactivación de la lipasa se logra mediante temperaturas bajas aproximadamente a 60°C, esto se lograría solamente con agua aliente pero para cumplir con las demás fases del proceso se necesita temperaturas más elevadas por esta razón se utiliza vapor de agua para esterilizar.

2.2.2.2. Desprendimiento del Fruto.

El proceso de esterilización del fruto acelera el proceso natural de desprendimiento, esto se logra mediante la evaporación del agua que se encuentra entre el fruto y el racimo ablandándolos, esta acción reduce las pérdidas producidas por una mala desfrutación.

2.2.2.3. Ablandamiento de los tejidos de la Pulpa.

Mediante la esterilización a temperatura baja y tiempo relativamente corto se logra debilitar y romper las celdas de las pulpas que contienen aceite durante el proceso de presado y digestión.

2.2.2.4. Calentamiento y Deshidratación de las Almendras.

La función de la esterilización en este punto es el de reducir el tamaño de la almendra para que este se desprenda de la cáscara en la que está envuelta y así facilitar el proceso de rompimiento de las nueces y la recuperación de las mismas en el proceso de palmistería.

2.2.2.5. Coagulación de las proteínas.

Como en todo en cualquier tejido vivo las proteínas de encuentran en las celdas de los frutos donde contienen el aceite, el objetivo de la esterilización es coagular esas proteínas con la finalidad de reducir el porcentaje de emulsificación del aceite en el agua que esto a su vez depende de la presencia de proteínas.

2.2.2.6. *Hidrolisis y descomposición del material mucilaginoso.*

Dentro del fruto de la palma se ha encontrado presencia de goma y almidones conocidos también como carbohidratos que forman soluciones coloidales (sustancias gelatinosas) en el aceite crudo dificultando el proceso de clarificación del mismo.

Mediante la acción de la temperatura y el tiempo de esterilización se determinó que se puede hidrolizar los carbohidratos y almidones en mayor o menor grado, el material gelatinoso mediante temperaturas de 120°C son descompuestas, coaguladas o hidrolizadas, por eso es recomendable para el proceso de esterilización trabajar con vapores de agua a altas temperaturas y mayor tiempo de exposición del fruto.

2.2.3. *Desfrutación.*

Después de la esterilización los racimos frescos son llevados al segundo proceso en el que consiste en la separación de los racimos en frutos y raquis, quedando los racimos o raquis vacíos que son transportados a través de una banda y recolectados en volquetas para su disposición final que es aplicada como abono orgánico en el campo, a esta segunda fase se la conoce como proceso de desfrutación. El proceso de desfrutación se realiza mediante un tambor rotatorio, este tambor hace girar los racimos en su interior, al llegar a la parte superior los racimos caen golpeándose y desprendiéndose el fruto de sus racimos, la capacidad del equipo desfrutado es de 12 toneladas con un diámetro de 2.45 m y una longitud de 5.6 m, el tambor gira a una velocidad de 23 rpm.

2.2.4. *Digestión.*

Después de la fase de desfrutación el fruto es sometido a recalentamiento para que la pulpa se desprenda de las nueces y macerada para prepararse para extracción por proceso de prensado, la etapa de digestión se lo realiza en un recipiente de forma cilíndrica vertical equipado con unos brazos de agitación y maceración. La pulpa o mesocarpio tiene un espesor variado de acuerdo con la variedad de fruto, está constituida por una corteza externa que la cubre y conformada con un gran número de celdas que contienen aceite y pegadas entre sí por un cemento intercelular como almidón y aun esqueleto de fibra dura, este cemento se puede solubilizar en agua a temperaturas entre 95 a 100°C, permitiendo una fácil extracción mientras el cemento se disuelve, para este tipo de proceso la empresa Pexa cuenta con tres digestores con una capacidad 4 toneladas cada uno.

2.2.5. Prensado.

En esta parte de proceso se busca extraer la fracción líquida de la masa de fruto que sale del proceso de digestión, esta sustancia está compuesta de aceite de pulpa, agua y por un cierto porcentaje de sólidos que quedan en suspensión en el agua, la parte que queda después del presado se le conoce como torta la cual está constituida por fibra y nueces pasa al proceso de desfibrarían.

El proceso de presando se efectúa mediante una prensa con la que cuenta la empresa Pexa con una capacidad de 12 toneladas, esta prensa está constituida por unos tornillos sin fin continuas y una canasta perforada de forma cilíndrica doble horizontal con dos tornillos sin fin de paso progresivo que gira en sentido contrario.

Esto ayuda a facilitar la salida del aceite durante la acción del prensado, en este proceso se agrega agua caliente que debe ser debidamente controlada para asegurar una mejor extracción así como también para obtener una adecuada dilución del aceite crudo para así facilitar el proceso de clarificación.

2.2.6. Clarificación.

En este proceso se tiene como finalidad separar y purificar el aceite que se extrae de la mezcla líquida que sale del proceso de prensado, la cual contiene aceite, agua, lodos livianos (compuestas por goma y pectinas) así como lodos pesados (compuestos por tierra, arena, y otras impurezas), para obtener dicha separación se aprovecha las características de inmiscibilidad entre el agua y el aceite.

Para este proceso está dividido en dos partes:

- Clarificación estática (por decantación): En esta fase se logra remover aproximadamente un 90% del aceite, esto se logra con un clarificador que tiene una capacidad de 23 m³ que tiene un ciclón de alimentación la cual disipa la presión del líquido que es transportado, esto evita la turbulencia en el interior del equipo, aquí no se alienta el líquido para evitar la formación de turbulencia y así como también para evitar que se vuelvan a mezclar nuevamente las capas que se han separado.
- Clarificación dinámica (con centrífuga): Este tipo de clarificador trabaja con el mismo principio del clarificador estático pero aquí la separación se realiza con mayor velocidad por acción de fuerzas centrífugas, en este tipo de centrifuga el agua y los lodos pesados salen por las boquillas o toberas y los aceites y lodos livianos se reúnen en el centro y rápidamente son descargados por un tubo recolector llamado recolector.

2.2.7. Sedimentador de Aceite.

El aceite que se obtiene del proceso de clarificación pasa a los tanques sedimentadores para que las partículas pesadas se decanten por reposo, de allí se bombea el aceite a los secadores de vacío.

2.2.8. Tanques de Agua lodosas-Florentinos.

Los lodos procedentes del proceso de clarificación pasan a un tanque receptor de aguas lodosas y de allí son transportadas por bombeo a los ciclones desarenadores, estos receptores son fabricados de material de cerámica y son automáticos por motivos de duración y para minimizar el porcentaje de pérdida de aceite.

Estos tanques cuentan con una entrada de agua caliente controlada a través de una válvula de flotador que se activara cuando el nivel de lodos se reduzca, también cuenta con un alarma que se activa con un interruptor de flotador en el nivel bajo.

2.3. Método de medición del Caudal.

Para la descarga de las aguas residuales proveniente del proceso de extracción cuentan se lo realiza a través de una tubería que desemboca en la primera laguna con la que cuenta la empresa para el tratamiento de sus aguas residuales, para la medición del caudal de salida se necesitó los siguientes materiales:

- Recipiente con volumen conocido (balde de 20 L).
- Un cronometro.
- libreta de apuntes.
- guantes.

Para medición del caudal se utilizó el método volumétrico que consiste en llenar un recipiente de volumen conocido controlando el tiempo en que se demoró dicha acción, determinando así el caudal de salida del afluente.

2.4. Método de Muestreo.

Para la recolección de la muestra se tuvo que contar necesariamente con una balsa con la cual se pudiera llegar a cualquier punto ubicado en cualquiera de las tres piscinas, la toma de las muestras se lo realizó en envases de vidrio de color ámbar de 1L y de forma puntual en cada piscina, las tomas de las muestras se lo realizó de la siguiente manera:

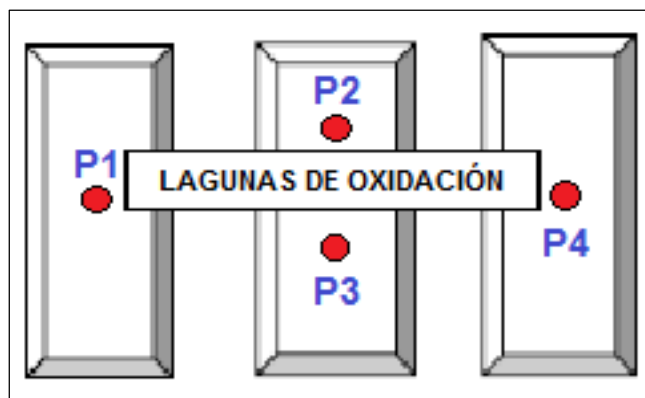
La muestra del primer punto (P1) se lo realizo ingresando en la balsa a la mitad de la primera piscina para su obtención.

Las muestras del P2 y P3 se lo realizaron de igual forma en la mitad de la segunda piscina y con una separación aproximada de 15 metros entre cada punto.

La toma del P4 se lo realizo de igual forma en el centro de la tercera piscina completando así las muestras necesarias para su caracterización.

Las muestras colectadas y debidamente etiquetadas se procedieron a transportar de forma inmediata para asegurar la confiabilidad de los resultados a los laboratorios de CESTTA y SAQMIC para los análisis Físicos-Químicos correspondientes.

FIGURA 2-2: Puntos de Muestreo.



FUENTE: Robert. V, 2015.

2.5. Método de Caracterización del Agua Residual.

El objetivo de la caracterización del agua residual es saber de manera precisa presencia de elementos contaminantes presentes en el agua residual, en otras palabras es necesariamente indispensable conocer la composición de dicha agua objeto de estudio, esto se lo puede lograr mediante métodos analíticos de forma cualitativas que son utilizadas para determinar características físicas así como también de forma cuantitativas que nos servirá para la determinación de características químicas y microbiológica presentes en el agua de estudio.

A continuación una tabla de los parámetros que se tomaron en cuenta en la caracterización del agua residual.

TABLA 2-2: Métodos y Normas para análisis Físicos-Químicos y Microbiológicos del Agua Residual.

PARÁMETROS	LABORATORIO	MÉTODO UTILIZADO
pH	SAQMIC	SM N° 4500-H-B
Conductividad	SAQMIC	SM N° 2510-B
Turbiedad	SAQMIC	SM N° 2130-B
DBO	SAQMIC	SM N° 5210-B
Nitritos	SAQMIC	SM N° 4500-NO2-B
Nitratos	SAQMIC	SM N° 4500-NO3-B
Sulfatos	SAQMIC	SM N° 4500-SO4-B
Coliformes Fecales	SAQMIC	FILTRACIÓN POR MEMBRANA
Coliformes Totales	SAQMIC	FILTRACIÓN POR MEMBRANA
Grasas y Aceites	CESTTA	SM N° 5520-B
Fenoles	CESTTA	SM N° APHA 5530-C
Cobre	CESTTA	EPA 200.7 ICP-AES Rev 4.4 1994
Plomo	CESTTA	EPA 200.7 ICP-AES Rev 4.4 1994
Aluminio	CESTTA	EPA 200.7 ICP-AES Rev 4.4 1994
Cadmio	CESTTA	EPA 200.7 ICP-AES Rev 4.4 1994

FUENTE: Robert. V, 2015.

Los parámetros descritos anteriormente fueron analizados por el laboratorio de aguas y Suelo CESTTA conjuntamente con el laboratorio SAQMIC empleando métodos estandarizados descritos en la norma como son: APHA, AWWA, WPCF 17 Ed y Estándar Methods.

2.6. Método de selección del lugar.

Para la selección del lugar en donde se realizó la construcción de nuestro sistema piloto de tratamiento de aguas residuales (humedales artificiales) se tomó varios aspectos importantes que se describirán a continuación:

- Accesibilidad al lugar.
- Uniformidad del terreno.
- disponibilidad de materiales (Arena, grava).
- Ausencia de cobertura vegetal.

Todos estos factores antes mencionados nos ayudaron a determinar el sitio mismo donde se realizó la construcción de los humedales artificiales a fines a nuestro estudio.

2.7. Métodos de Construcción de los humedales artificiales.

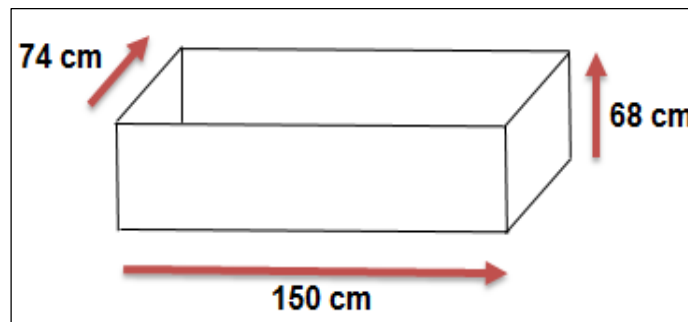
2.7.1. Construcción del dique de Contención.

Después de haber seleccionado el lugar se procedió a la construcción de la estructura que soportará todo los componentes del sistema, el dique se construyó con madera de encofrado con las siguientes medidas:

- Alto 74 cm.
- Ancho 68 cm.
- Largo 150 cm.

Cabe señalar que las medidas del ancho y largo son valores propuestos por criterio del investigador y el alto se basó en un rango de 0.3 a 1m dado por bibliografía consultada según los autores Delgadillo & Camacho, 2010, para el diseño de los dos humedales.

FIGURA 2-3: Medidas del Dique Construido.



FUENTE: Robert. V, 2015.

2.7.2. Permeabilización del dique de Contención.

Luego de haber concluido con la construcción del dique es necesario permeabilizarlo con la finalidad de que los contaminantes presentes en las aguas residuales que se van a tratar no genere contaminación o por alguna fuga se extiendan hacia el manto freático, por el criterio antes mencionado se procedió a impermeabilizar el fondo con geo membrana.

2.7.3. Implementación del sistema de Recolección.

Para la recolección del agua tratada se aprovechó la pendiente de 2 cm de inclinación con la que cuenta el fondo del humedal, el agua es llevada por acción de la gravedad a la parte inferior frontal, donde se implementó una llave de paso la cual regula la salida del agua al exterior del humedal.

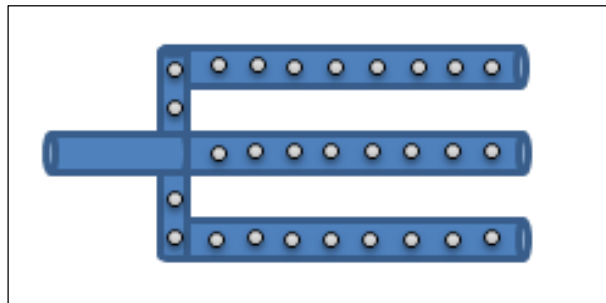
2.7.4. Llenado del arena y grava.

Se recomienda llenar con una primera capa de arena de 5 a 10 cm con la finalidad de proteger la geomembrana de daños producidos al momento de colocar la grava, en la segunda capa se colocó 10 cm de grava seleccionada de un diámetro menor a 30 mm, seguido de una capa de 10 cm de gravilla o ripio con un diámetro entre 3 y 5 mm, seguidamente colocamos una capa de arena de 30 cm de espesor y una capa de tierra de 10 cm en donde se plantó el material vegetal escogido para el tratamiento (pasto alemán), todos estos valores se basó en parámetros de construcción según bibliografía consultada.

2.7.5. Implementación del sistema de Aplicación.

Para la aplicación del agua residual se construyó sistema de tuberías perforadas de PBC que cubriera toda el área del humedal, este sistema se colocó entre la capa de tierra y la de arena, ayudando a que la aplicación del agua sea de forma uniforme.

FIGURA 2-4: Sistema de Tuberías de Aplicación de Agua residual.

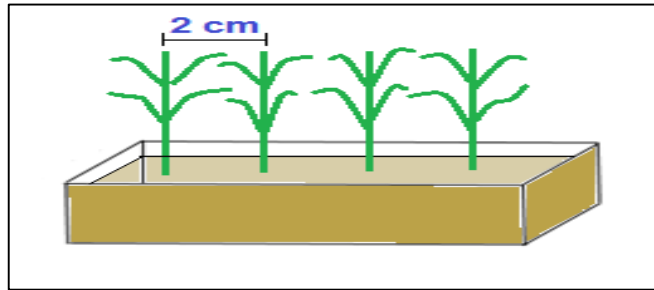


FUENTE: Robert. V, 2015.

2.7.6. Plantación de la Vegetación.

Para la plantación dentro del humedal se buscó una especie que pudiera adaptarse y sobrevivir en suelos saturados de agua y con alto porcentaje de materia orgánica que pudiese utilizar como fuente de nutrición, el pasto alemán es la especie vegetal utilizada en nuestro sistema de tratamiento propuesto, el modo de siembra se lo realizo en hileras a lo largo y ancho del humedal con una separación de 2 cm entre plantas.

FIGURA 2-5: Modelo de Plantación del Pasto Alemán.



FUENTE: Robert. V, 2015.

2.8. Métodos para el Dimensionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

2.8.1. Evaluación Técnica.

La primera fase para el dimensionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales es la evaluación técnica y funcional para conocer el rendimiento actual de la planta, la cantidad de agua residual que genera la empresa extractora por hora, esto nos permite tener un conocimiento previo de lo que se va a realizar.

2.8.2. Procesamiento de Datos.

Luego de tener una idea clara de lo que se va a realizar, es necesario disponer de un área de terreno suficiente y adecuado a las necesidades técnicas de rediseño. Es necesario que el terreno disponible sea sometido a un estudio topográfico con la finalidad de conocer si las condiciones del suelo son adecuadas a la implementación y construcción de la planta de tratamiento.

2.8.3. Dimensionamiento de la Planta de Tratamiento.

Para el dimensionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales propuesta se tomó como punto de partida los datos obtenidos de la caracterización del agua residual, el caudal de agua de ingreso disponible y mediante ecuaciones obtenidas en bibliografía consultada según los autores Delgadillo & Camacho, 2010 se procederá a los cálculos de diseño correspondientes.

2.9. Método para elaboración de Planos.

Una vez obtenido los resultados del Dimensionamiento de la planta de tratamiento propuesta a través de los cálculos correspondientes se procedió a la realización de los planos mediante herramientas informáticas proporcionadas por el programa de AutoCAD para facilitar la comprensión de los mismos.

CAPITULO III

3. CÁLCULOS, ANÁLISIS Y RESULTADOS.

3.1. Determinación del Estado Actual de la Planta.

La Extractora de Aceite de Palma Pexa cuenta con una planta depuradora para el tratamiento de sus aguas, a la cual se realizó un detallado diagnóstico técnico de su funcionamiento, dándonos a conocer que el sistema utilizado para la depuración de sus aguas residuales es a través de seis lagunas de oxidación, este sistema de lagunaje se divide en: 1 laguna de recuperación y enfriamiento, 3 lagunas anaerobias, 1 laguna facultativa y 1 laguna de pulimiento aerobia.

Con la información brindada por la Extractora Pexa la planta actual de tratamiento de aguas residuales está diseñada para tratar un volumen de 37000 m³ al año, y que todas las aguas generadas en los distintos procesos de extracción son descargadas a su sistema para su posterior tratamiento a través de un único punto de descarga con un caudal de 138,46 m³/d.

Se observó que el flujo de agua que se descarga en la planta es de forma intermitente debido a que antes que sea descargado a la laguna de recuperación y enfriamiento son depositadas en tres tanques de almacenamiento con la finalidad de remover presencia de aceites que accidentalmente se escapa del proceso de extracción.

Se constató que el actual sistema de lagunaje no es el adecuado por la generación de olores desagradables y el impacto visual que se presencial en toda las instalaciones de la extractora, no cuenta con un adecuado mantenimiento y limpieza, eso se determinó debido a presencia de cobertura vegetal no deseada y el deterioro del dique de contención en las orillas de las lagunas, estas observaciones obtuvo a través de una visita a las instalaciones de la empresa Pexa donde se encuentra funcionando la planta de tratamiento.

3.2. Descripción de la Planta de Tratamiento.

La Planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa Pexa cuenta con la implementación de lagunas de oxidación como único sistema para el tratamiento de sus efluentes generados por sus distintos procesos de extracción.

3.2.1. Volumen de efluente generado en el proceso de extracción.

Mediante mediciones en planta el volumen del efluente generado se establece en relación al fruto que ingresa al proceso de extracción obteniendo así los siguientes valores:

TABLA 3-1: Volumen de Efluente Generado.

PROCESO	VALOR
Clarificación	0.43 m ³ / ton de fruta
Esterilización	0.12 m ³ / ton de fruta
Hidrociclones	0.05 m ³ / ton de fruta
Agua total	0.60 m ³ / ton de fruta

FUENTE: Pexa, 2012.

FIGURA 3-1: Representación gráfica del efluente generado por proceso.



FUENTE: Robert. V, 2015.

Como se puede observar en la figura 18 el proceso de mayor generación de efluente es la clarificación con un 72%, seguido del proceso de esterilización con un 20% y el proceso que menor cantidad de efluente son los hidrociclones con un valor de 8%.

3.2.2. Caudal del Efluente que va a las Lagunas de Oxidación.

Tomando en cuenta el volumen total del efluente generado en el proceso y la cantidad de fruta procesada por año se realizó la siguiente tabla:

TABLA 3-2: Caudal del efluente Generado por año.

CANTIDAD DE FRUTA	VOLUMEN EFLUENTE	CAUDAL
60000 ton x año	0.60 m ³ / ton de fruta	36000 m ³ /año

FUENTE: Robert. V, 2015.

Para poder determinar el caudal del efluente por día es necesario tomar en consideración los días laborables de la empresa que son 260 días al año sabiendo que la empresa solo labora de lunes a viernes.

TABLA 3-3: Caudal del efluente generado por día.

CANTIDAD DE FRUTA	VOLUMEN EFLUENTE	CAUDAL
230.77 ton x día	0.60 m ³ / ton de fruta	138,46 m ³ /año

FUENTE: Robert. V, 2015.

3.2.3. Características del Sistema de Tratamiento.

Las aguas generadas en los procesos de clarificación y esterilización, no presentan sustancias de interés sanitario por ser un efluente netamente de origen orgánico, producto de la extracción física de aceite rojo de palma africana, todos estos efluentes son enviados a las lagunas de oxidación técnicamente diseñadas para su tratamiento. En Pexa el tratamiento biológico de sus aguas se realiza en seis lagunas, una de recuperación y enfriamiento, tres anaerobias, una facultativa, una de pulimiento aerobio, cuya capacidad por cálculo técnico es de 32000 m³.

3.2.3.1. Área y volumen para el tratamiento del Efluente.

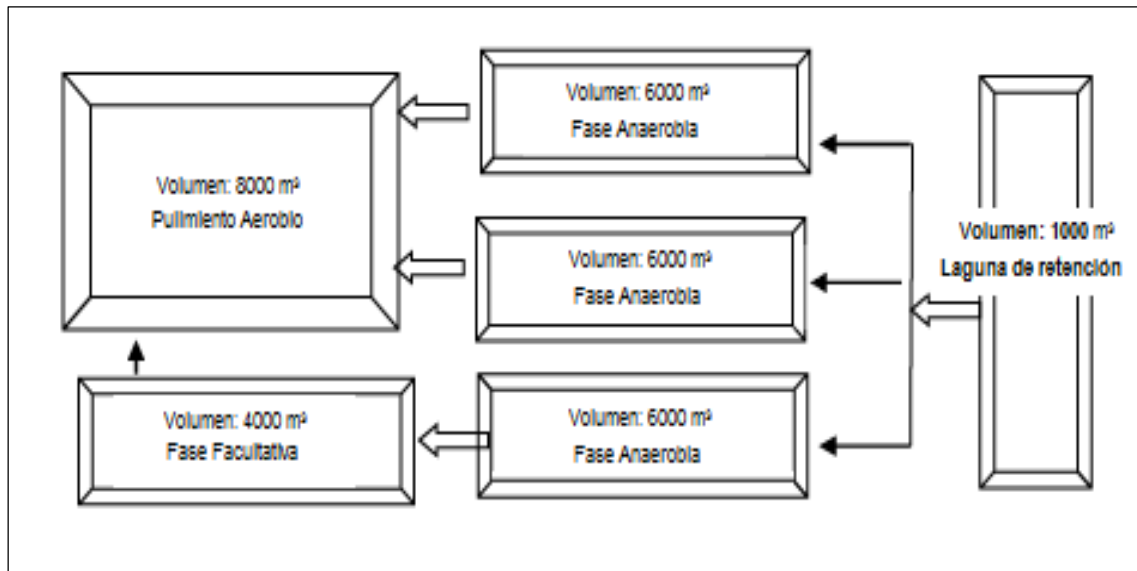
Las distintas lagunas de oxidación disponibles para el tratamiento de las aguas residuales generadas por el proceso de extracción, fueron diseñadas técnicamente para evitar focos de contaminación:

TABLA 3-4: Área y volumen de las lagunas de Oxidación.

N°	LAGUNA	ÁREA	VOLUMEN
1	Retención y enfriamiento	336 m ²	1000 m ³
3	Anaerobia	2000 m ²	6000 m ³
1	Facultativa	2670 m ²	8000 m ³
1	Pulimiento	1350 m ²	4000 m ³

FUENTE: Robert. V, 2015.

FIGURA 3-2: Esquema de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.



FUENTE: Robert. V, 2015.

3.2.3.2. Fases de Tratamiento.

El sistema de tratamiento de las aguas residuales de la extractora Pexa está dividido en tres fases descritas en la siguiente tabla:

TABLA 3-5: Descripción de las fases de tratamiento.

FASES	DESCRIPCIÓN
PRIMERA	En esta primera fase los residuos líquidos resultante del proceso de esterilización y clarificación son llevado a un tratamiento primario compuesto por tres estructuras de concreto construido mediante un diseño apropiado y con un tiempo de retención de tres días con el propósito de remover material contaminante grasoso, eequalización inicial del efluente y atrapar el aceite que accidentalmente se escapa del proceso, pasando luego a una laguna de desaceitado y enfriamiento diseñado para un tiempo de retención del efluente de 4 días con una profundidad de 3 metros y un volumen de 1000 m ³ de capacidad.
SEGUNDA	Después que el efluente sale de la primera fase es dirigida a 3 lagunas para el tratamiento anaerobio metanogénica estas lagunas fueron diseñadas técnicamente con una capacidad 6000 m ³ cada una, pasado luego a una laguna facultativa con una capacidad de 4000 m ³ para potencializar la remoción de los contaminantes, principalmente de aceites y grasas.
TERCERA	En esta última fase son tratados los efluentes en una laguna de pulimento anaerobio diseñada técnicamente con una capacidad de 8000 m ³ y con una profundidad de 4m.

FUENTE: Robert. V, 2015.

3.3. Caracterización Físico, Químico y Microbiológico del Agua.

Las muestras de las aguas residuales recolectadas en planta de tratamiento fueron enviadas al laboratorio Cestta y Saqmic para su respectiva caracterización, resaltando que para este estudio se tomó en mayor consideración los resultados de análisis del agua residual de la primera laguna anaerobia para realizar los cálculos de diseño del nuevo sistema propuesto.

3.3.1. Análisis del Agua Tratada en las lagunas de oxidación.

TABLA 3-6: Resultados del Agua residual tomada en la primera laguna anaerobia.

PARÁMETROS	UNIDADES	MÉTODO	LÍMITES	RESULTADOS
pH	Und.	SM 4500-H-B	5-9	6,76
Conductividad	µSiems/cm	SM 2510-B	-	6200
Turbiedad	UNT	SM 2130-B	-	157
DBO₅	mg/l	SM 5210-B	100	1940
Nitritos	mg/l	SM 4500-NO ₂ -B	10	0,4
Nitratos	mg/l	SM 4500-NO ₃ -B	10	1,2
Sulfatos	mg/l	SM 4500-SO ₄ -B	1000	280
Coliformes Fecales	UFC/100ml	SM 9222-D	200	6x10 ³
Coliformes Totales	UFC/100ml	SM 9222-B	5000	248x10 ³
Aceites y Grasas	mg/l	SM 5520-B	0.3	92,00
Fenoles	mg/l	SM APHA 5530-C	0.2	<0,2
Cobre	mg/l	EPA 200.7 ICP AES Rev 4.4 1994	1,0	1,41
Plomo	mg/l	EPA 200.7 ICP AES Rev 4.4 1994	0,2	0,010
Aluminio	mg/l	EPA 200.7 ICP AES Rev 4.4 1994	0,5	22,82
Cadmio	mg/l	EPA 200.7 ICP AES Rev 4.4 1994	0,002	<0,004

FUENTE: Laboratorio Cestta y Saqmic, 2015.

En el segundo tratamiento anaerobio se observó un notable cambio de color del agua que iba de la mitad de la laguna en adelante por lo cual se procedió a la recolección de muestras en dos puntos, obteniendo los siguientes resultados.

TABLA 3-7: Resultados del agua residual tomada en el punto 1 de la segunda laguna anaerobia.

PARÁMETROS	UNIDADES	MÉTODO	LÍMITES	RESULTADOS
pH	Und.	SM 4500-H-B	5-9	7.66
Conductividad	μSiems/cm	SM 2510-B	-	6700
Turbiedad	UNT	SM 2130-B	-	84.0
DBO₅	mg/l	SM 5210-B	100	960
Nitritos	mg/l	SM 4500-NO ₂ -B	10	0.38
Nitratos	mg/l	SM 4500-NO ₃ -B	10	0.8
Sulfatos	mg/l	SM 4500-SO ₄ -B	1000	260
Coliformes Fecales	UFC/100ml	SM 9222-D	200	1x10 ³
Coliformes Totales	UFC/100ml	SM 9222-B	5000	253x10 ³

FUENTE: Laboratorio Cestta y Saqmic, 2015.

TABLA 3-8: Resultados del agua residual tomada en el punto 2 de la segunda laguna anaerobia.

PARÁMETROS	UNIDADES	MÉTODO	LÍMITES	RESULTADOS
pH	Und.	SM 4500-H-B	5-9	6.92
Conductividad	μSiems/cm	SM 2510-B	-	5980
Turbiedad	UNT	SM 2130-B	-	210
DBO₅	mg/l	SM 5210-B	100	1760
Nitritos	mg/l	SM 4500-NO ₂ -B	10	0.4
Nitratos	mg/l	SM 4500-NO ₃ -B	10	1.0
Sulfatos	mg/l	SM 4500-SO ₄ -B	1000	320
Coliformes Fecales	UFC/100ml	SM 9222-D	200	3x10 ³
Coliformes Totales	UFC/100ml	SM 9222-B	5000	436x10 ³

FUENTE: Laboratorio Cestta y Saqmic, 2015.

TABLA 3-9: Resultados del Agua residual tomada en la tercera laguna anaerobia.

PARÁMETROS	UNIDADES	MÉTODO	LÍMITES	RESULTADOS
pH	Und.	SM 4500-H-B	5-9	7.35
Conductividad	μSiems/cm	SM 2510-B	-	3900
Turbiedad	UNT	SM 2130-B	-	159
DBO₅	mg/l	SM 5210-B	100	1280
Nitritos	mg/l	SM 4500-NO ₂ -B	10	0.44
Nitratos	mg/l	SM 4500-NO ₃ -B	10	0.8
Sulfatos	mg/l	SM 4500-SO ₄ -B	1000	280
Coliformes Fecales	UFC/100ml	SM 9222-D	200	3x10 ³
Coliformes Totales	UFC/100ml	SM 9222-B	5000	472x10 ³

FUENTE: Laboratorio Cestta y Saqmic, 2015.

Los resultados marcados de color amarillo de las tablas 3-6, 3-7, 3-8, 3-9 son parámetros que no cumplen con los límites permisibles especificados en el texto unificado de legislación secundaria del ministerio del ambiente (Tulsma) en libro IV, anexo 1, tabla 12, “Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce”. Y que deben de ser inmediatamente considerados para un previo tratamiento antes de su descarga a un cuerpo receptor.

3.4. Rediseño de la Planta de la Tratamiento.

Para el rediseño de la planta de tratamiento de aguas residuales de la extractora de aceite de palma Pexa del cantón la concordia se basó en el análisis técnico del estado actual de la planta en términos de infraestructura y rendimiento del proceso en la planta, se vio oportuno implementar un nuevo sistema de tratamiento que reemplace al actual con la finalidad de mejorar los aspectos ambientales presentes en las instalaciones.

El ingreso y reposo del agua residual del proceso de extracción al sistema de tratamiento actual por lagunas de oxidación genera olores desagradables y gran impacto visual por lo que se considera oportuno sustituir el tratamiento actual de lagunas de oxidación por la implementación de un sistema de depuración más amigable con el ambiente como son los humedales artificiales.

3.4.1. Adecuación de la laguna de retención y enfriamiento.

Antes de tratamiento propuesto es necesario contar con una laguna de retención y enfriamiento con el propósito de disminuir la temperatura del agua residual que sale del proceso de extracción puesto que al transportar directamente sin un previo enfriamiento provocaría daños al materia vegetal, disminución de la concentración de microorganismos presentes en las raíces y sustrato reduciendo así la efectividad de depuración para lo cual se propone reutilizar la misma laguna de enfriamiento del anterior sistema por motivos de reducción de costes.

La cual tiene las siguientes características:

TABLA 3-10: Características de la laguna de retención y Enfriamiento.

Volumen	1000 m ³
Ancho de la laguna	12 m
Largo de la laguna	28 m
Tiempo de retención	4 días

FUENTE: Robert. V, 2015.

3.4.2. Dimensionamiento de los Humedales Artificiales.

Para los cálculos de diseño de los humedales artificiales subsuperficial de flujo vertical se lo realizará en función del contaminante que se va a reducir en este caso el diseño se realizara con la finalidad de reducir la DBO₅ hasta el valor límite permisible aceptable por la norma del Tulsma que está en vigencia.

3.4.2.1. Caudal de Diseño.

Para disponer de un caudal se implantara un sistema de bombeo que transporte el efluente desde la laguna de retención y enfriamiento hasta los humedales construidos, para esto se recomienda la instalación de una motobomba Evans con las siguientes especificaciones técnicas:

TABLA 3-11: Especificaciones técnicas de la motobomba Evans.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Tipo de Motor	Eléctrico
Marca	Siemens / Weg
Caudal Máximo	825 L x min
Potencia del Motor	7.50 Hp
Diámetro de succión	3.00 pulgadas
Diámetro de Descarga	3.00 pulgadas

FUENTE: Catálogo Evans en línea.

El caudal que se utilizara para los cálculos correspondientes es:

TABLA 3-12: Caudal de Diseño generado por la motobomba.

CAUDAL	UNIDADES
13.75	l/s
0.0138	m ³ /s
1188	m ³ /día

FUENTE: Catálogo Evans.

3.4.2.2. Cálculo de la constante de reacción de primer orden (K_T).

La constante de reacción se calcula con la ecuación 4:

$$K_T = 1.104 * 1.06^{T_2-20}$$

Donde:

- T_2 : 32°C

$$K_T = 1.104 * 1.06^{32-20}$$

$$K_T = 2.22 d^{-1}$$

3.4.2.3. Cálculo del área necesaria.

Para el cálculo del área superficial se lo realizo en función de la DBO₅ y aplicando la ecuación 3:

$$As = \frac{Q * Ln(\frac{C_0}{C})}{K_T * h * p}$$

TABLA 3-13: Valores de porosidades utilizadas para el cálculo del Área Superficial.

Tipo de Material	Tamaño efectivo D10 (mm)	Porosidad, n %
Arena gruesa	2	28-32
Arena gravosa	8	30-35
Grava fina	16	35-38
Grava media	32	36-40
Roca gruesa	128	38-45

FUENTE: Delgadillo & Camacho, 2010.

Dónde:

- **Q:** 1188 m³/día
- **C:** 1940 mg/L valor de la **Tabla 3-6**
- **Co:** 80 mg/L valor asumido dentro del límite permisible **Tabla 12: Tulsma**
- **K_T:** 2.22 d⁻¹.
- **h:** 0.60 m valor usual según **tabla 1-10**
- **p:** porosidad del medio granular (% expresado en fracción).

Para determinar el valor de la porosidad del medio granular se asume un valor dado en la tabla 24 según el diámetro del material utilizado en cada capa del lecho filtrante a continuación se calcular un valor promedio para utilizarlo en la ecuación.

P prom = porosidad de arena + porosidad de gravilla + porosidad de grava

$$P \text{ prom} = (31 + 33 + 38)/3$$

$$P \text{ prom} = 34 = 0.34\%$$

$$A_s = \frac{1188 \frac{m^3}{d} * \ln\left(\frac{1940 \frac{mg}{l}}{80 \frac{mg}{l}}\right)}{2.22d^{-1} * 0.60m * 0.34}$$

$$A_s = 8365.24 \text{ m}^2$$

3.4.2.4. Cálculo del tiempo de retención.

Para el cálculo de tiempo de retención se utiliza la ecuación 5:

Donde:

- THR: tiempo de retención.
- A_s : 8365.24 m².
- h: 0.6m.
- p: 0.34.
- Q: 1188 m³/s.

$$THR = \frac{A_s * h * p}{Q}$$

$$THR = \frac{8365.24 \text{ m}^3 * 0.60m * 0.34}{1188 \frac{m^3}{d}}$$

$$THR = 1.44 \text{ dias}$$

3.4.2.5. Cálculo del ancho del humedal.

Para el cálculo del ancho necesario del humedal se utiliza la ecuación 6 tomando en cuenta que se implementará seis humedales para una mejor remoción de la carga orgánica:

$$W = \frac{1}{h} * \left(\frac{(Q)(A_s)}{(s)(K_s)}\right)^{0.5}$$

TABLA 3-14: Valores de conductividad hidráulica utilizadas para el cálculo del ancho del humedal.

Tipo de Material	Tamaño efectivo D10 (mm)	Conductividad Hidráulica, Ks (m3/m2/d)
Arena gruesa	2	100-1000
Arena gravosa	8	500-5000
Grava fina	16	1000-10000
Grava media	32	10000-50000
Roca gruesa	128	50000-250000

FUENTE: Delgadillo & Camacho, 2010.

Donde:

- W: ancho del humedal.
- Q: 1188 m³/d / 6 (N° de unidades).
- A_s: 8365.24 m² / 6 (N° de unidades).
- h: 0.6m.
- s: 0.5 % valor usual según **tabla 1-10**.
- K_s: Conductividad hidráulica (m/d).

La conductividad hidráulica que se utilizara en el cálculo del ancho del humedal es un valor promedio de las conductividades hidráulicas de cada una de las capas que conforman el lecho filtrante, se calcula de la siguiente manera:

$$K_s = (K_s \text{ arena} + K_s \text{ gravilla} + K_s \text{ grava})/3$$

$$K_s = (100 + 500 + 10000)/3$$

$$K_s = 3533.33 \text{ m}$$

$$W = \frac{1}{0.6m} * \left(\frac{\left(198 \frac{m^3}{d}\right) (1394.2 \text{ m}^2)}{(0.5) \left(3533.33 \frac{m}{d}\right)} \right)^{0.5}$$

$$W = 20.83 \text{ m}$$

3.4.2.6. *Cálculo del largo del humedal.*

Para el cálculo del largo necesario del humedal se utiliza la ecuación 7 de la siguiente manera:

$$L = \frac{A_s}{W}$$

Dónde:

- L: largo del humedal.
- A_s : $8365.24 \text{ m}^2 / 6$ (Nº de unidades).
- W: 20.83 m

$$L = \frac{1394.2 \text{ m}^2}{20.83 \text{ m}}$$

$$L = 66.93 \text{ m}$$

3.4.2.7. *Cálculo de la cantidad del medio filtrante para los humedales.*

Para determinar la cantidad necesaria de arena, gravilla y grava que se va a utilizar en los lechos filtrantes se tomó en consideración los criterios de diseño para humedales subsuperficial de flujo vertical propuestos por Delgadillo & Camacho 2010, de acuerdo a estas consideraciones se realizó una tabla con las nuevas características y espesores del sustrato recomendadas para la construcción de los humedales propuestos.

TABLA 3-15: Características y espesores del sustrato recomendadas para la construcción de los humedales propuestos.

Tipo de material	Diámetro partícula (mm)	Altura del lecho (cm)
Primera Etapa (lijado)		
Arena gruesa	2-10	h> 30
Gravilla	5-10	h 10 a 15
Grava	20-40	h= 10
Segunda Etapa (pulido)		
Arena fina	0.25-0.75	h> 30
Gravilla	2-8	h 10 a 15
Grava	20-40	h= 10

FUENTE: Delgadillo & Camacho 2010 adaptado por Robert. V.

Para el cálculo de la cantidad de sustrato necesario en la construcción de los lechos filtrantes se obtendrá mediante la siguiente ecuación.

$$Vol. = L * W * H$$

Fórmula para el cálculo del volumen del sustrato necesario.

Dónde:

- Vol.: volumen en (m³).
- L: largo en (m).
- W: ancho en (m).
- H: altura del sustrato en (m).

Primera Etapa (Lijado) = 4 Humedales

Datos:

- L: largo del humedal (67m).
- W: ancho del humedal (21m).

Volumen de Arena gruesa ($\theta=3\text{mm}$):

$$Vol. = 67m * 21m * 0.3m$$

$$Vol. = 422.1 m^3$$

Volumen de Gravilla ($\theta=7.5\text{mm}$):

$$Vol. = 67m * 21m * 0.15m$$

$$Vol. = 192,15 m^3$$

Volumen de Gravilla ($\theta=30\text{mm}$):

$$Vol. = 67m * 21m * 0.10m$$

$$Vol. = 140.7 m^3$$

Segunda Etapa (Pulido) = 2 Humedales

Volumen de Arena fina ($\theta < 2.5$ mm):

$$Vol. = 67m * 21m * 0.35m$$

$$Vol. = 492.5 \text{ m}^3$$

Volumen de Gravilla ($\theta = 7.5$ mm):

$$Vol. = 67m * 21m * 0.10m$$

$$Vol. = 140.7 \text{ m}^3$$

Volumen de Grava ($\theta = 30$ mm):

$$Vol. = 67m * 21m * 0.10m$$

$$Vol. = 140.7 \text{ m}^3$$

A continuación se expresara en una tabla demostrativa de los volúmenes de arena, gravilla y grava necesarios en la construcción de los lechos filtrantes.

TABLA 3-16: Especificaciones para la construcción de los lechos filtrantes.

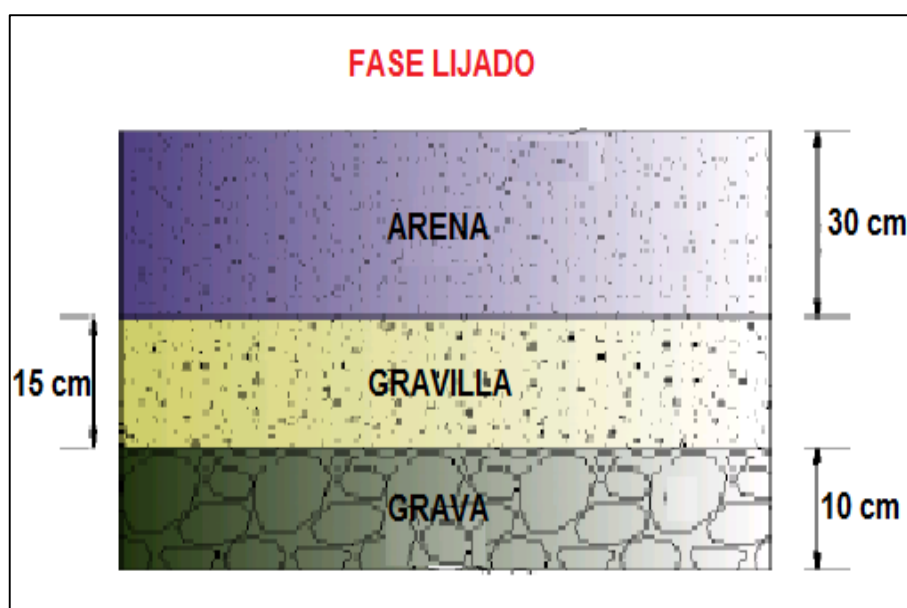
Tipo de material	Diámetro (mm)	Altura del lecho (cm)	Vol. Necesario (m ³)
Primera Etapa (lijado) = 4 Humedales			
Valores para un solo humedal.			
Arena gruesa	3	30	422.1
Gravilla	7.5	15	192.15
Grava	30	10	140.7
Segunda Etapa (pulido) = 2 Humedales			
Valores para un solo humedal			
Arena fina	< 0.25	35	492.5
Gravilla	7.5	10	140.7
Grava	30	10	140.7

FUENTE: Robert. V, 2015.

Para el diseño del sistema de humedales artificiales se consideró la utilización de 4 medios filtrantes como son arena fina, arena gruesa, gravilla y grava cada una con diferente espesor basándose en parámetros de diseño consultados como se muestra en las figuras 3-3, 3-4, se consideró necesarios que el sistema de tratamiento se divida en dos fases (lijado y pulido) con la finalidad de evitar posibles obstrucciones provocadas por la gran cantidad de sólidos presentes en este tipo de agua residual.

La fase de lijado dispondrá de 4 humedales, necesitando cada humedal un volumen 422.1 m^3 de arena gruesa con diámetro de 3mm, 192.15 m^3 de gravilla con diámetro de 7,5mm, y para la capa de drenaje un volumen de 140.7 m^3 de grava con un diámetro de 30mm.

FIGURA 3-3: Estructura del lecho filtrante a utilizarse en la fase de lijado.

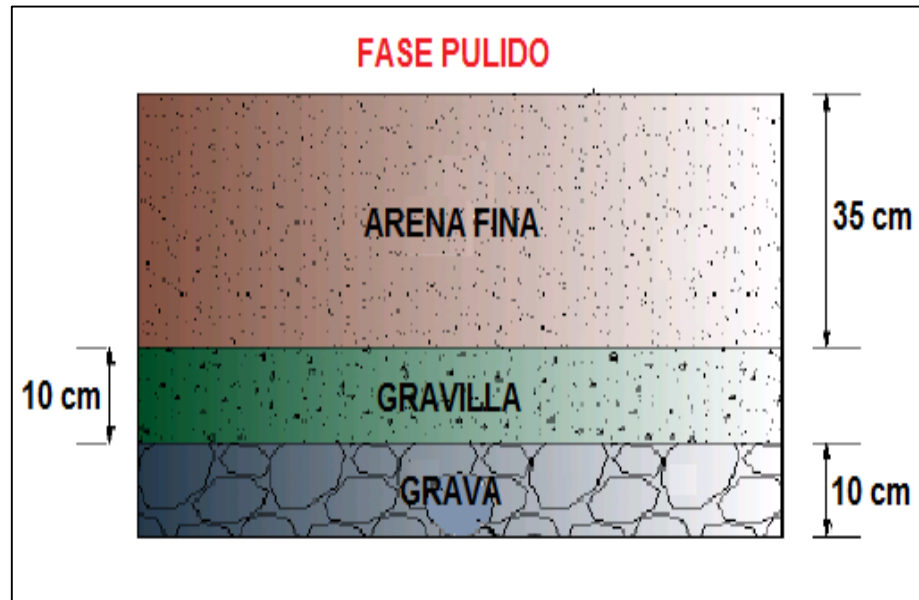


FUENTE: Robert. V, 2015.

Para la fase de pulido se dispondrá de 2 humedales, necesitando cada humedad un volumen de 492.5 m^3 de arena fina con diámetro $<0.25\text{mm}$, 140.7 m^3 de gravilla con diámetro 7.5mm y para el drenaje del agua tratada 140.7 m^3 de grava de diámetro de 30mm.

La utilización de la arena en la fase de pulido nos permitirá retener los sólidos que no se pudieron atrapar en la fase de lijado mejorando así la calidad del efluente tratado.

FIGURA 3-4: Estructura del lecho filtrante a utilizarse en la fase de pulido.



FUENTE: Robert. V, 2015.

3.5. Resultados.

3.5.1. Resultados de los cálculos de diseño de los Humedales artificiales.

Basándose en los cálculos realizados en el dimensionamiento de los humedales de flujo subsuperficial vertical se elaboró la siguiente tabla resumen con las características de construcción propuestas.

TABLA 3-17: Valores de dimensionamiento propuestos para la construcción de los humedales.

PARÁMETROS	VALORES DE CONSTRUCCION
Caudal de entrada	1188 m ³ /día
Numero de Humedales	6 unidades
Área Superficial	8365.25 m ²
Tiempo de Retención	1.44 días
Ancho del Humedal	21 metros
Largo del Humedal	67 metros

FUENTE: Robert. V, 2015.

3.5.2. Resultados Experimentales.

Para la parte experimenta se implementó una planta piloto que consistía en un sistema de depuración de aguas residuales con dos humedales subsuperficial de flujo vertical con la finalidad de demostrar la efectividad en términos de remoción de contaminantes que tiene el tratamiento propuesto en este trabajo de investigación.

El agua residual obtenida de los procesos de extracción fue sometida a una primera caracterización antes de ser transportada hasta los humedales construidos para su posterior tratamiento.

A continuación una tabla de las características de la planta piloto y los tiempos de retención utilizados en cada tratamiento.

TABLA 3-18: Características de la planta piloto.

PARÁMETROS	VALORES EXPERIMENTALES
Caudal de entrada	intermitente
Numero de Humedales	2 unidades
Pendiente	2 %
Sustrato utilizado	Tierra, Arena, gravilla, grava
Ancho del Humedal	0.74 metros
Largo del Humedal	1.5 metros
Profundidad	0.68 metros
Tiempo de retención en el tratamiento 1	1 semana
Tiempo de retención en el tratamiento 2	1 semana

FUENTE: Robert. V, 2015.

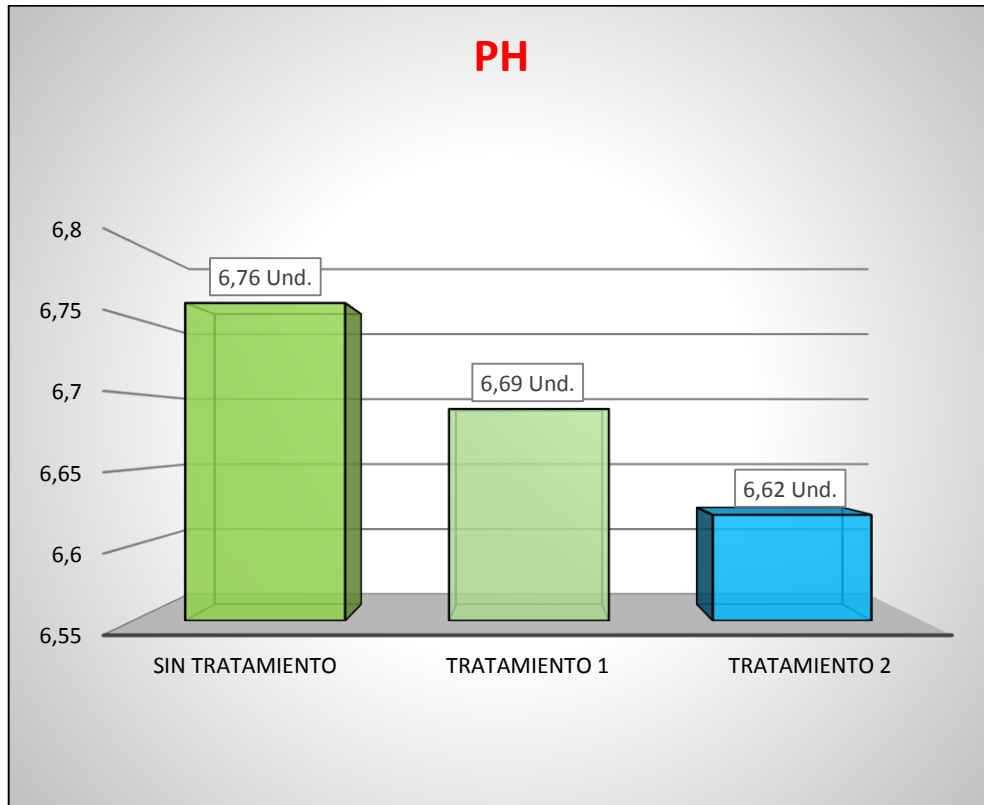
3.5.2.1. Reducción del PH.

TABLA 3-19: Variación del PH en los tratamientos.

PH		
SIN TRATAMIENTO	TRATAMIENTO 1	TRATAMIENTO 2
6,76 Und	6,69 Und	6,62 Und

FUENTE: Laboratorio Aglab, 2015.

FIGURA 3-5: Representación gráfica de la variación del PH en los tratamientos.



FUENTE: Robert. V, 2015.

Como se aprecia en la figura 3-5 el efluente entra en el primer tratamiento con un pH de 6,76 und, saliendo con un pH de 6,69 und, mientras que para el tratamiento 2 el pH sufrió una reducción mínima llegando al valor de 6,62 und.

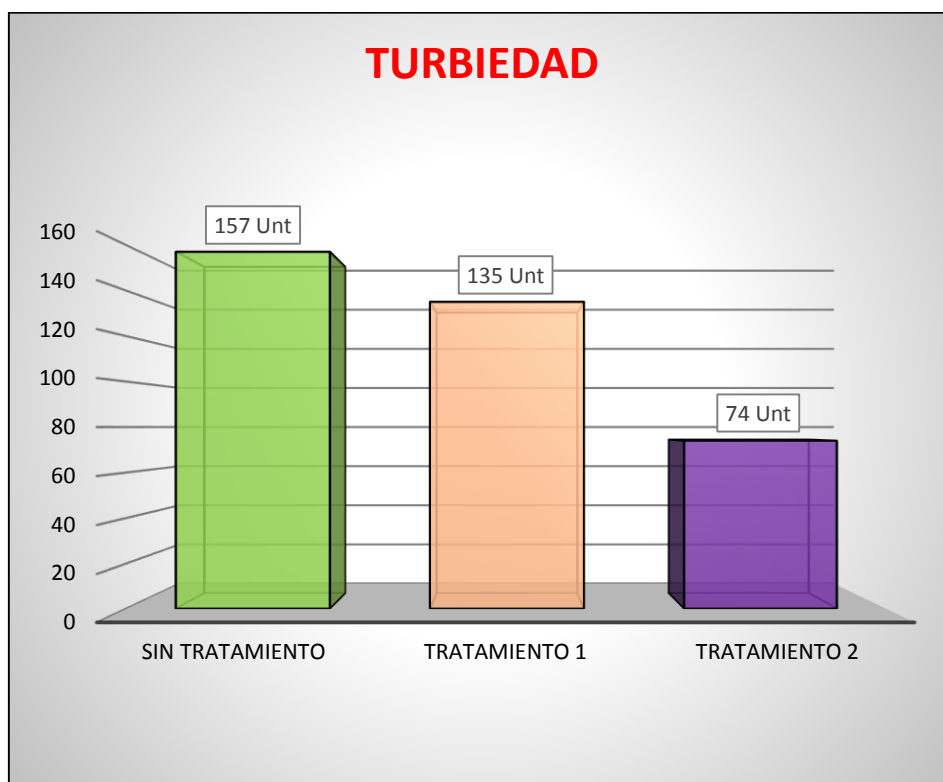
3.5.2.2. Reducción de la Turbidez.

TABLA 3-20: Variación de la Turbiedad en los tratamientos.

TURBIEDAD		
SIN TRATAMIENTO	TRATAMIENTO 1	TRATAMIENTO 2
157 mg/l	135 mg/l	74 mg/l

FUENTE: Laboratorio Aglab, 2015.

FIGURA 3-6: Representación gráfica de la variación de la Turbiedad.



FUENTE: Robert. V, 2015.

Como se puede observar en la figura 3-6 el efluente entra con un valor de turbiedad de 157 unt saliendo del primer tratamiento con un valor de 135 unt y en él según tratamiento hubo una disminución notable de la turbiedad del efluente tratado llegando al valor de 74 unt.

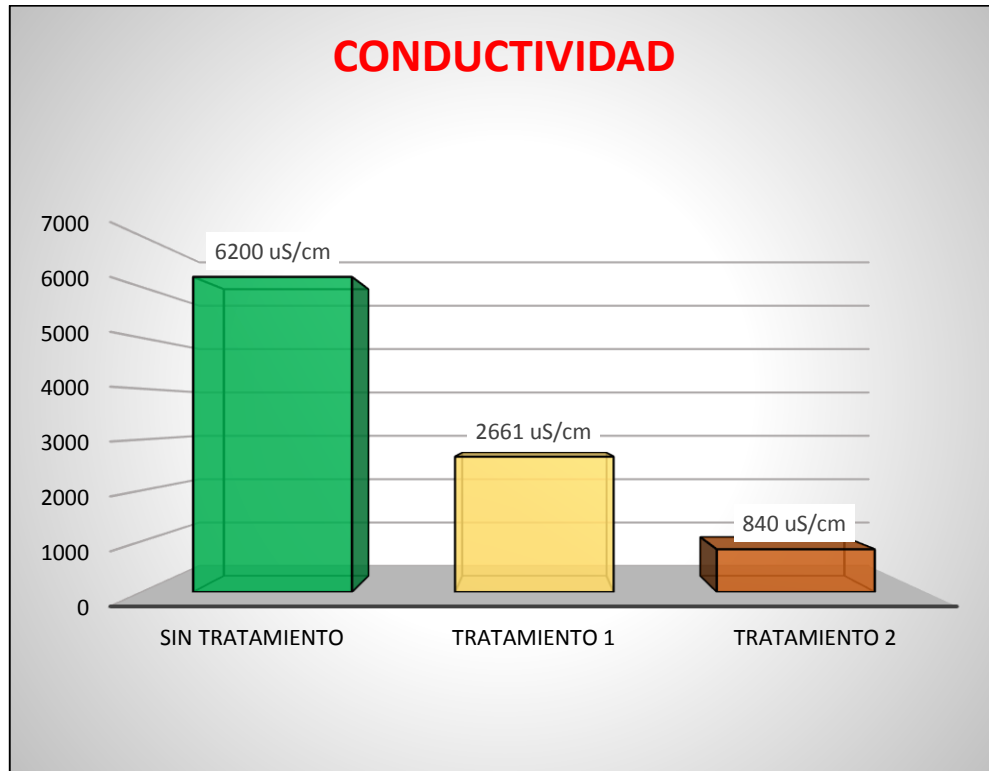
3.5.2.3. *Reducción de la Conductividad.*

TABLA 3-21: Variación de la Conductividad en los tratamientos.

CONDUCTIVIDAD		
SIN TRATAMIENTO	TRATAMIENTO 1	TRATAMIENTO 2
6200 mg/l	2661 mg/l	840 mg/l

FUENTE: Laboratorio Aglab, 2015.

FIGURA 3-7: Representación gráfica de la variación de la Conductividad.



FUENTE: Robert. V, 2015.

Al observando la figura 3-7 se visualiza una disminución de la conductividad que va desde 6200 uS/cm antes de la aplicación de los tratamientos, al pasar por el primer humedal se obtuvo una conductividad de 2661 uS/cm y en el último tratamiento el valor de la conductividad se redujo a 840 uS/cm.

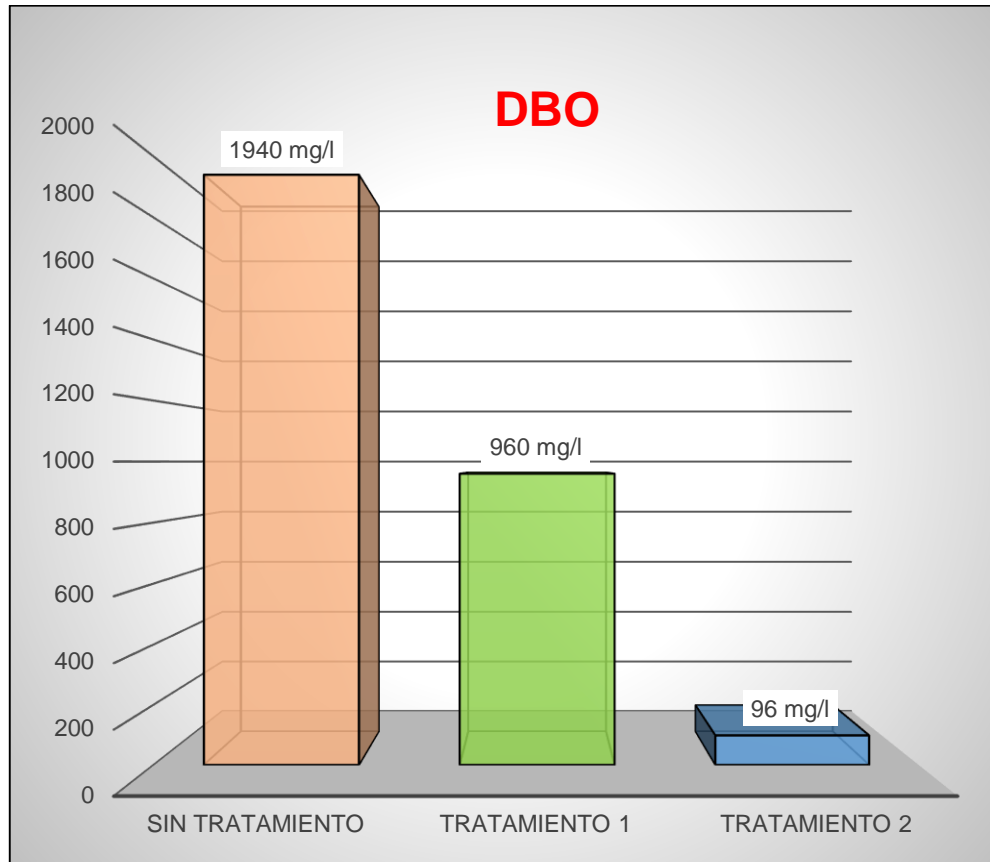
3.5.2.4. *Reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).*

TABLA 3-22: Variación de la DBO en los tratamientos.

DBO		
SIN TRATAMIENTO	TRATAMIENTO 1	TRATAMIENTO 2
1940 mg/l	960 mg/l	96 mg/l

FUENTE: Laboratorio Aglab, 2015.

FIGURA 3-8: Representación gráfica de la variación de la concentración de la DBO.



FUENTE: Robert. V, 2015.

Como se puede observar en la figura 3-8 la concentración de la DBO de entrada presenta una reducción notable después haber sido aplicado el tratamiento 1 y 2, permitiéndonos calcular la eficiencia de remoción de la DBO mediante la siguiente ecuación.

ECUACIÓN 1: Fórmula para el cálculo de la eficiencia de remoción de la DBO.

$$\text{Eficiencia DBO} = \frac{\text{DBO de Entrada} - \text{DBO de Salida}}{\text{DBO de Entrada}} \times 100$$

$$\text{Eficiencia DBO} = \frac{1940 \text{ mg/l} - 96 \text{ mg/l}}{1940 \text{ mg/l}} \times 100$$

$$\text{Eficiencia DBO} = 95.05\%$$

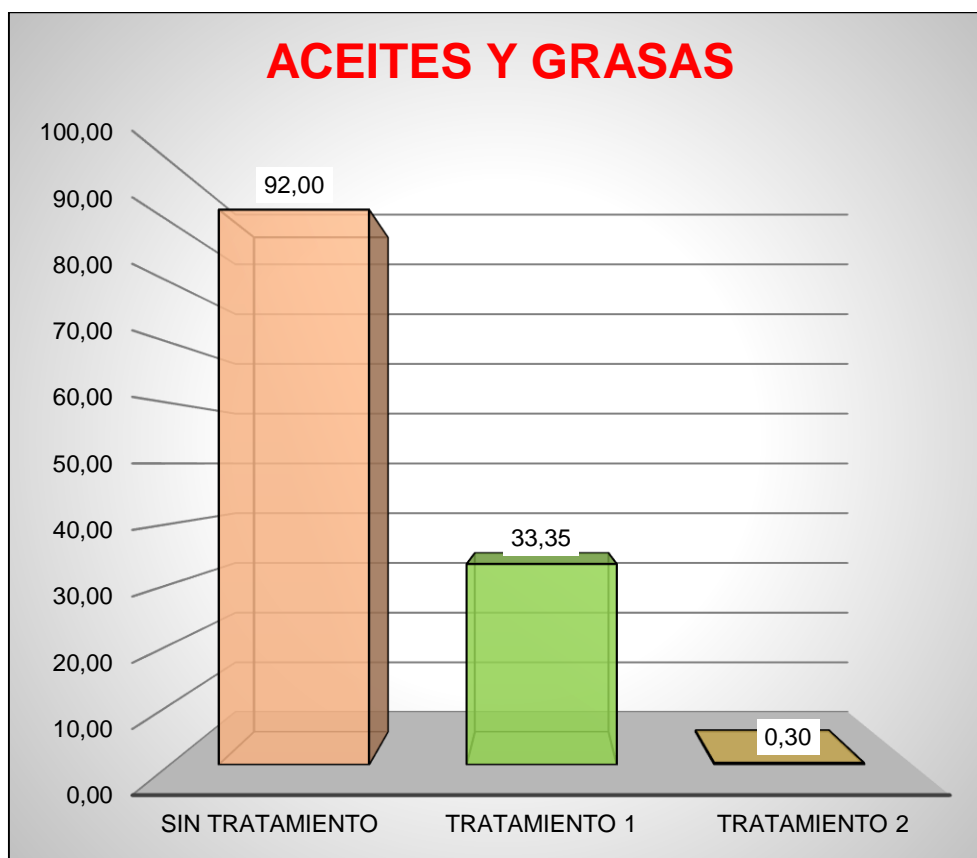
3.5.2.5. Reducción de Aceite y grasas.

TABLA 3-23: Variación de la concentración de Aceites y Grasas en los tratamientos.

ACEITES Y GRASAS		
SIN TRATAMIENTO	TRATAMIENTO 1	TRATAMIENTO 2
92 mg/l	33,35 mg/l	0.30 mg/l

FUENTE: Laboratorio Aglab, 2015.

FIGURA 3-9: Representación gráfica de la variación de la concentración de Aceites y Grasas.



FUENTE: Robert. V, 2015.

Como se puede apreciar en la figura 3-9 el efluente ingresa con una concentración de 92 mg/l en el primer tratamiento se reduce a 53,51 mg/l y en el segundo tratamiento a un 33,35 mg/l notándose una considerable remoción en el tratamiento.

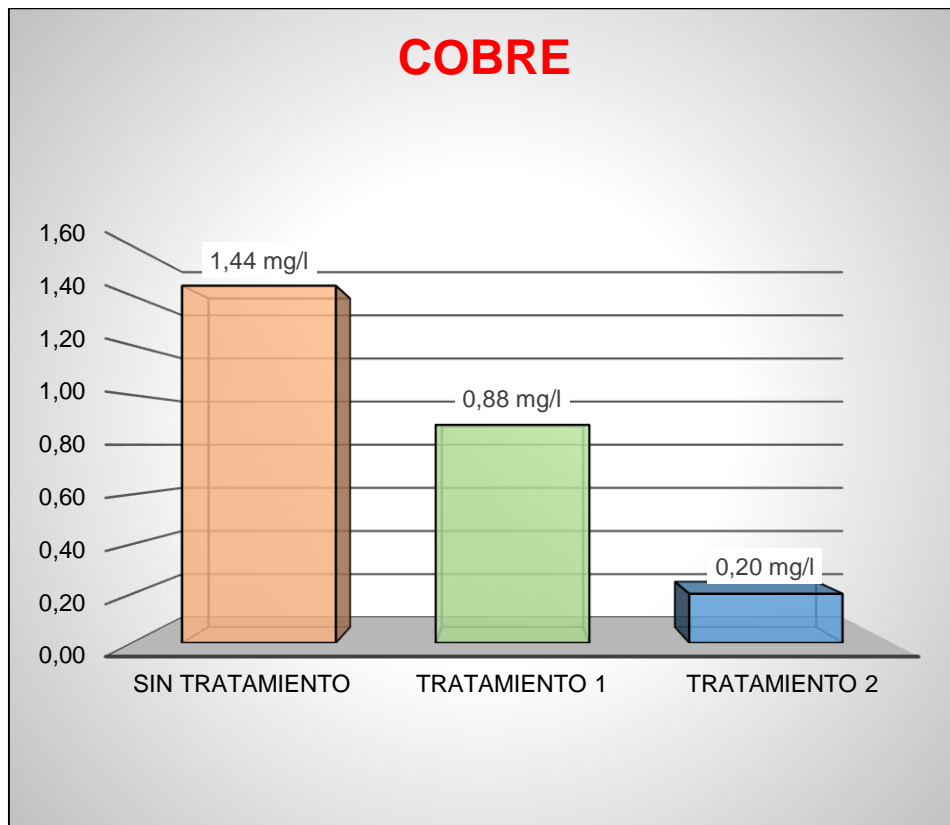
3.5.2.6. Reducción de Cobre.

TABLA 3-24: Variación de la concentración de cobre en los tratamientos.

COBRE		
SIN TRATAMIENTO	TRATAMIENTO 1	TRATAMIENTO 2
1,44 mg/l	0,88 mg/l	0,20 mg/l

FUENTE: Laboratorio Aglab, 2015.

FIGURA 3-10: Representación gráfica de la variación de la concentración de Cobre.



FUENTE: Robert. V, 2015.

Como se muestra en la figura 3-10 el efluente sin tratamiento tiene una concentración de cobre de 1,44 mg/l al aplicarse el primer tratamiento se tiene una concentración de 0,88 mg/l y en la aplicación del segundo tratamiento su concentración se reduce a 0,20 mg/l, indicando que el tratamiento con humedales es efectivo para remover concentraciones de cobre presentes en aguas residuales.

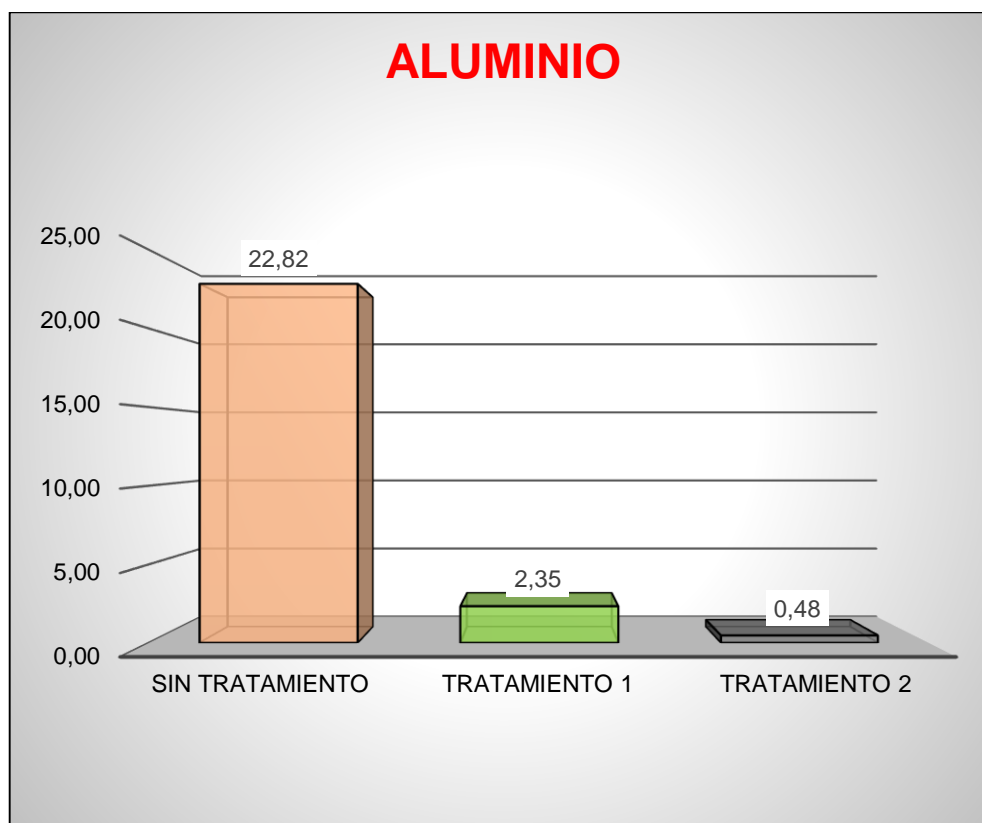
3.5.2.7. Reducción de Aluminio.

TABLA 3-25: Variación de la concentración de Plomo en los tratamientos.

ALUMINIO		
SIN TRATAMIENTO	TRATAMIENTO 1	TRATAMIENTO 2
22.82 mg/l	2.35 mg/l	0,48 mg/l

FUENTE: Laboratorio Aglab, 2015.

FIGURA 3-11: Representación gráfica de la variación de la concentración de Aluminio.



FUENTE: Robert. V, 2015.

Como se observa en la figura 3-11, la concentración de aluminio presente en el efluente antes del tratamiento es de 22.82 mg/l, luego de la aplicación del primer tratamiento la concentración de aluminio disminuyó a 2.35 mg/l, y en la aplicación del segundo tratamiento la concentración del plomo se redujo a 0,48 mg/l, esto indica que el tratamiento con humedales artificiales aplicado funciona correctamente para reducir presencia de aluminio presente en las aguas residuales.

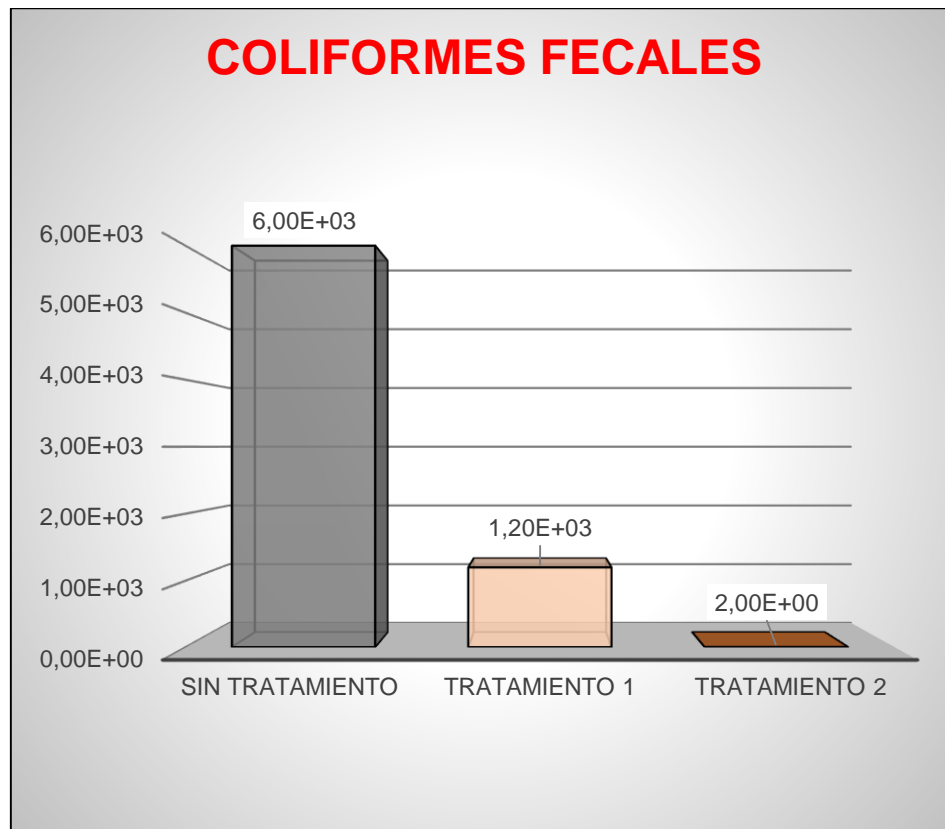
3.5.2.8. Reducción de los Coliformes fecales.

TABLA 3-26: Variación de la concentración de Coliformes Fecales en los tratamientos.

COLIFORMES FECALES		
SIN TRATAMIENTO	TRATAMIENTO 1	TRATAMIENTO 2
6x10 ³ UFC	1.2x10 ³ UFC mg/l	2.0x10 ⁰ UFC

FUENTE: Laboratorio Aglab, 2015.

FIGURA 3-12: Representación gráfica de la variación de la concentración de Coliformes fecales.



FUENTE: Robert. V, 2015.

En la figura 3-12 se puede visualizar que la cantidad de coliformes fecales presente en el efluente de entrada es de 6×10^3 UFC, en el tratamiento 1 se obtuvo un valor de 1.2×10^3 UFC mientras que el segundo tratamiento se disminuyó casi en su totalidad hasta un valor de 2×10^0 apreciándose una disminución significativa en la cantidad de coliformes fecales presentes en el agua residual tratada.

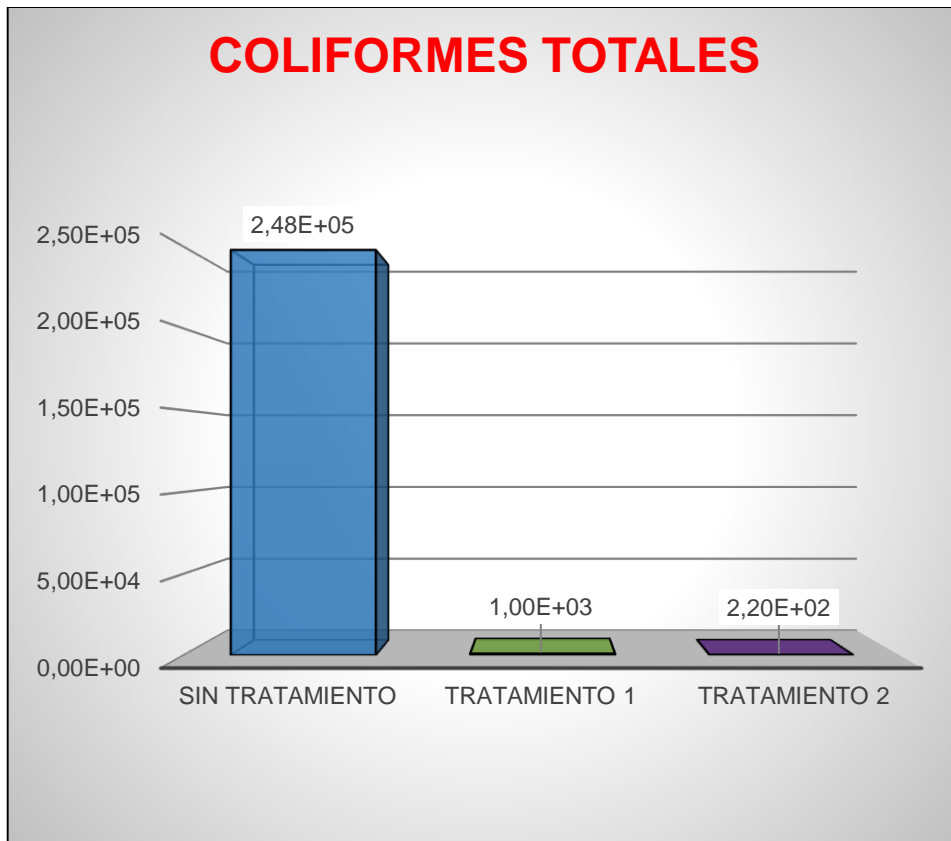
3.5.2.9. Reducción de los Coliformes totales.

TABLA 3-27: Variación de la concentración de Coliformes Totales en los tratamientos.

COLIFORMES TOTALES		
SIN TRATAMIENTO	TRATAMIENTO 1	TRATAMIENTO 2
2.48x10 ⁵ UFC	1x10 ³ UFC	2.2x10 ² UFC

FUENTE: Laboratorio Aglab, 2015.

FIGURA 3-13: Representación gráfica de la variación de la concentración de Coliformes totales.



FUENTE: Robert. V, 2015.

En la figura 3-13 se observa que la presencia de coliformes fecales en el efluente de entrada es de 2.48×10^5 UFC al pasar por el primer tratamiento el efluente obtuvo un valor de 1×10^3 UFC y en el último tratamiento su disminución alcanzó un valor de 2.2×10^2 indicando que el tratamiento a través de humedales artificiales es efectivo en la remoción de microorganismos presentes en el agua residual.

3.6. Análisis y discusión de resultados.

El tratamiento actual por lagunas de oxidación con la que cuenta la extractora de aceite Pexa para el tratamiento de sus aguas residuales no satisface en los requerimientos que exige la norma del texto unificado de legislación ambiental secundaria del ministerio del ambiente (TULSMA) en el libro VI, anexo 1, tabla 12 “Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce” para que dicha agua pueda ser descargada a una red hídrica.

Mediante la caracterización físico- química y microbiológica del agua residual procedente del proceso de extracción se comprobó que los parámetros como la DBO= 1940 mg/L, aceites y grasas= 92.00 mg/l, cobre= 1.41 mg/l, aluminio= 22.82 mg/l, coliformes fecales= 6×10^3 UFC, coliformes totales= 248×10^3 no cumple con los límites permisibles exigidos por la normativa ambiental vigente.

A lapso de un mes de tratamiento experimental a través de un sistema de dos humedales con pasto alemán como material vegetal se obtuvieron los siguientes resultados DBO= 96 mg/l, aceites y grasas= 0.3 mg/l, cobre= 0.2 mg/l, aluminio= 0.48 mg/l, coliformes fecales= 2.0×10^0 UFC, coliformes totales= 2.2×10^2 UFC cumpliendo con los parámetros establecidos por el TULSMA.

Con los resultados obtenidos en la caracterización físico- química y microbiológico inicial de las aguas residuales se seleccionó un sistema de tratamiento que esté constituido por una trama de grasa, una laguna de retención y enfriamiento, 4 humedales en la fase de lijado y 2 humedales en la fase de pulido.

De acuerdo a los análisis del agua residual tratada se puede determinar que los resultados son los esperados ya que el verdadero propósito de este trabajo de investigación es rediseñar un nuevo sistema que ayude a recuperar las características iniciales que tuvo el agua antes de su utilización para ser descargado dentro de los límites ambientales exigidos para un cuerpo de agua dulce.

CONCLUSIONES

- Mediante la evaluación técnica realizada se determinó que la planta de tratamiento encargada de la depuración de las aguas residuales de la extractora de aceite de palma Pexa se encuentra funcionando en condiciones no favorables ya que las lagunas de oxidación encargadas del tratamiento tiene un rendimiento del 65.67% de remoción de la carga contaminante además se encuentran saturadas y sin un adecuado mantenimiento afectando así a la efectividad de remoción de los contaminantes y a la eficiencia del tratamiento para la cual fue diseñada.
- Con los análisis físico- química y microbiológica realizados al agua residual se verifico que los parámetros como la DBO: 1940 mg/l, aceites y grasas: 92 mg/l, cobre: 1.41 mg/l, aluminio: 22.82 mg/l, coliformes fecales: 6×10^3 UFC, coliformes totales: 248×10^3 están incumpliendo con la normativa vigente, después de un mes de tratamiento con los humedales artificiales se obtuvo una reducción de la DBO en un 95.05%, aceites y grasas en un 99.67%, cobre en un 85.8 %, aluminio en un 97.89%, coliformes fecales en un 99.97%, coliformes totales en un 99.91% permitiendo cumplir con los parámetros establecidos por el texto unificado de legislación ambiental secundaria del ministerio del ambiente (TULSMA) en el libro VI, anexo 1, tabla 12 “Limites de descarga a un cuerpo de agua dulce” .
- Luego de realizar los cálculos de rediseño correspondientes se obtuvo un área superficial de 8365,25 m², la cual se distribuyó en seis humedales con las siguientes dimensiones: ancho de 21 metros, largo de 67 metros y un tiempo de retención de 1.44 días.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda al momento de poner en ejecución el sistema de tratamiento propuesto en este trabajo de investigación buscar la asesoría del autor de las doctrinas descritas en este trabajo de titulación con la finalidad de ejecutar de la mejor manera los parámetros de construcción de los humedales como del sustrato necesario que conforman el nuevo sistema.
- Una vez implementado el nuevo sistema de tratamiento se recomienda la planificación de cronogramas de limpieza y mantenimiento para evitar posible presencia de vegetación no deseada, taponamiento de los sistemas de riego y de drenaje prolongando así el tiempo de funcionamiento de la planta de tratamiento.
- Para la implementación del sistema de mantenimiento y el sistema de drenaje se sugiere que el sistema de tuberías se lo construya con materiales plásticos que soporten el deterioro del pasar del tiempo.
- Realizar análisis físico- químico y microbiológico al efluente de descarga en periodos semestrales con la finalidad de verificar si la planta de tratamiento está operando correctamente.

GLOSARIO

DBO₅:	Demanda Bioquímica de oxígeno (5 días).
PH:	Potencial de Hidrógeno.
Al:	Aluminio.
Cd:	Cadmio.
Cu:	Cobre.
Pb:	Plomo.
°C:	Grados centígrados.
---	limite permisible pendiente.
HSFV:	Humedal Subsuperficial de Flujo Vertical.
HSFH:	Humedal Subsuperficial de Flujo Horizontal.
TULSMA:	Texto unificado de legislación secundaria del ministerio del Ambiente.
As:	Área Superficial.
THR:	Tiempo de retención Hidráulica.
L:	Largo del Humedal.
W:	Ancho del Humedal.
K_T:	Constante de reacción de primer orden.
K_S:	Conductividad Hidráulica.
Q:	Caudal.
h:	Altura.

C_o:	Concentración del Efluente.
C:	Concentración del Afluente.
p:	Porosidad.
T:	Temperatura.
S:	Pendiente del lecho.
m:	Metros.
cm:	Centímetros.
mm:	Milímetros.
Pulg:	Pulgadas.

BIBLIOGRAFÍA

BENAYAS, J. *El Agua, Guía Para La Educación Ambiental*. Bogotá-Colombia: McGraw-Hill, 1989. p. 5.

CRITES, R y TCHOBANOGLIOUS, G., *Tratamientos de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones.*, Bogotá - Colombia., McGraw Hill., 2000 pp 33, 42-44, 46 – 48, 168

DELGADILLO, O y CAMACHO A., *Depuración de aguas Residuales por medio de Humedales artificiales*, Universidad de Barcelona [en línea]. Cochabamba – Bolivia, 2010 pp. 7-20, 31-52. [Consulta: 2015-01-12]. Disponible en: http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf

EDWIN, G. *Guía ilustrada de yerbas comunes en Puerto Rico* [en línea]. Universidad de Puerto Rico. Mayagüez-Puerto Rico, 2006 pp. 30, 60, 111. [Consulta: 2015-01-12]. Disponible en: <http://www.uprm.edu/agricultura/sea/publicaciones/manual-pastos.pdf>

LARA, L. *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales artificiales*, Universidad Politécnica de Cataluña [en línea]. Barcelona-España, 1999 pp. 8, 45-57. [Consulta: 2015-01-17]. Disponible en: http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com_content&view=article&id=17047:depuracion-de-aguas-residuales-municipales-con-humedales-artificiales&catid=1282:tratamiento-de-aguas-residuales&Itemid=100150

METCALF y EDDY, Inc. *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización*. 3a.ed. Madrid – España. McGraw-Hill., 1995 pp. 41 – 43

MENDOCA, S. *Sistemas de Lagunas de Estabilización, cómo utilizar aguas residuales en sistemas de regadío*. México: McGraw-Hill Interamericana, 2000 pp. 132 – 155

MONZÓN, I., Y OTROS., *Introducción a la Ingeniería Sanitaria y Ambiental.*, V.4., 1a. ed., Madrid-España., Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos., 2001 pp. 365-367, 387, 388, 405, 515, 517-519, 536.

GARCÍA, E y PÉREZ, A. *Aguas Residuales., Composición., Aspectos sanitarios del estudio de las aguas.* Universidad de Granada [en línea]: Servicio de Publicaciones. Granada, 1985 pp. 54-60.
[Consulta: 2015-01-15]. Disponible en:
<http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/composicion.pdf>

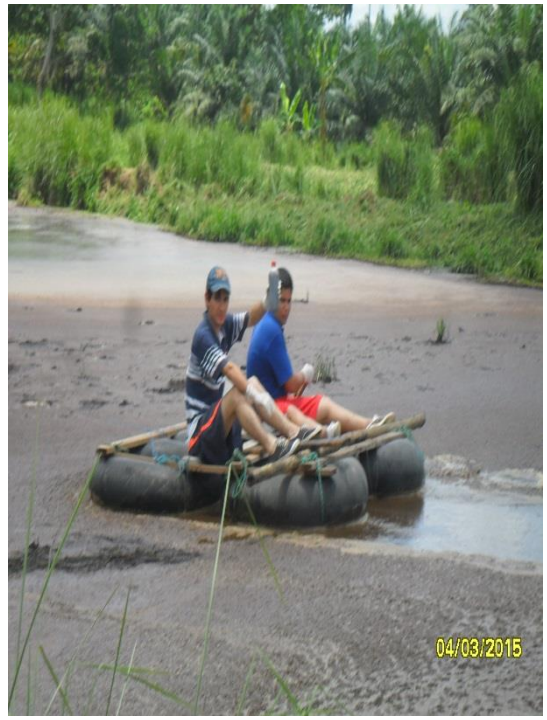
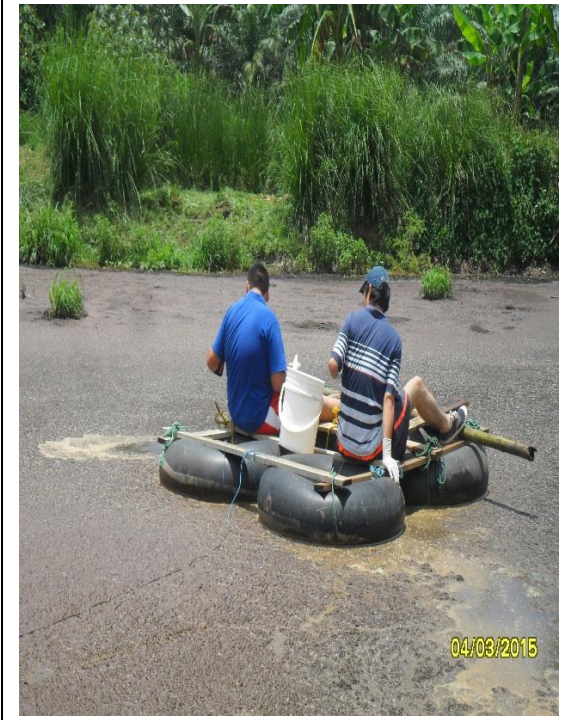
SEOÁNEZ, M. *Tratado de Gestión del Medio Ambiente Urbano.* Madrid-España: Mundi-Prensa., 2000 p. 66

ANEXOS

A: Lagunas de Oxidación deterioradas.



B: Muestreo de las lagunas de Oxidación.



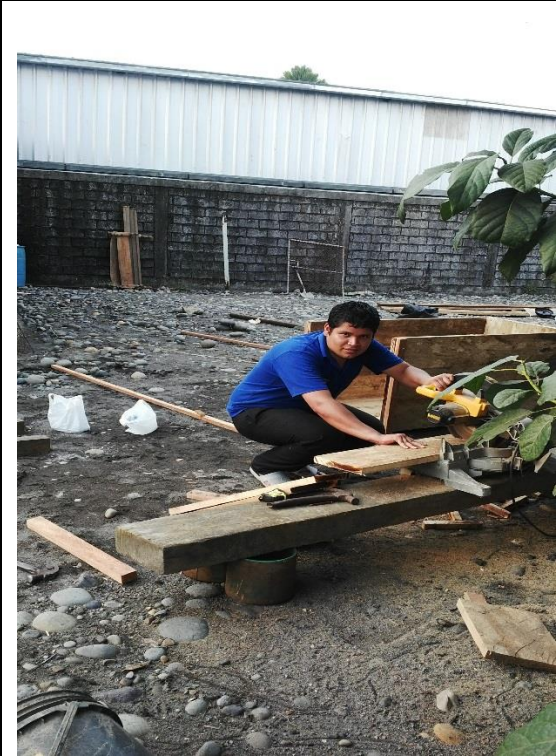
C: Envasado, transporte y reservación de la muestra.



D: Materiales para la construcción de los humedales.



E: Construcción de los humedales.





F: Permeabilización y ubicación de los humedales



G: Llenado de los humedales.



H: Implementación del sistema de riego.



I: sembrado del pasto alemán en los humedales.

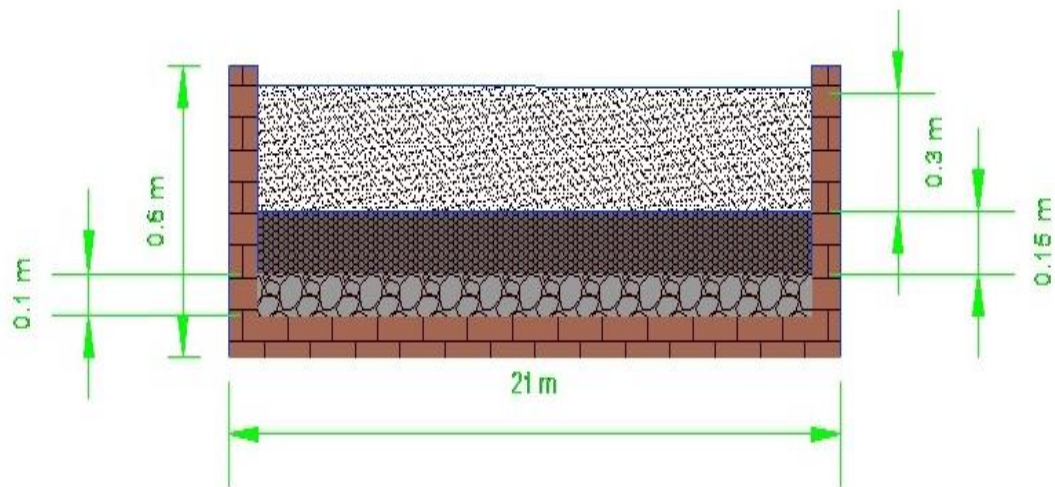


J: Aplicación del agua residual en los tratamientos.

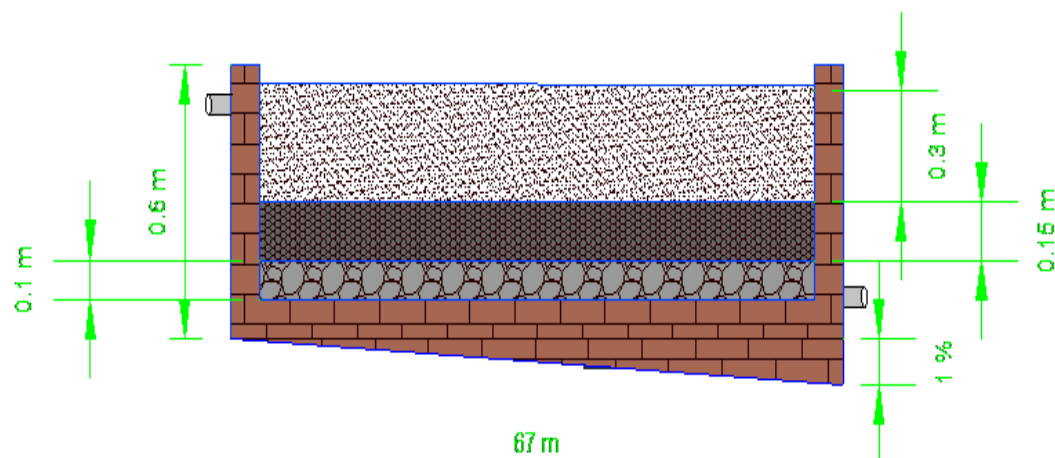


K: Planos del corte Transversal y longitudinal de los humedales de la fase de Lijado.

Corte A-A' Ancho de un Humedal de la fase de Lijado

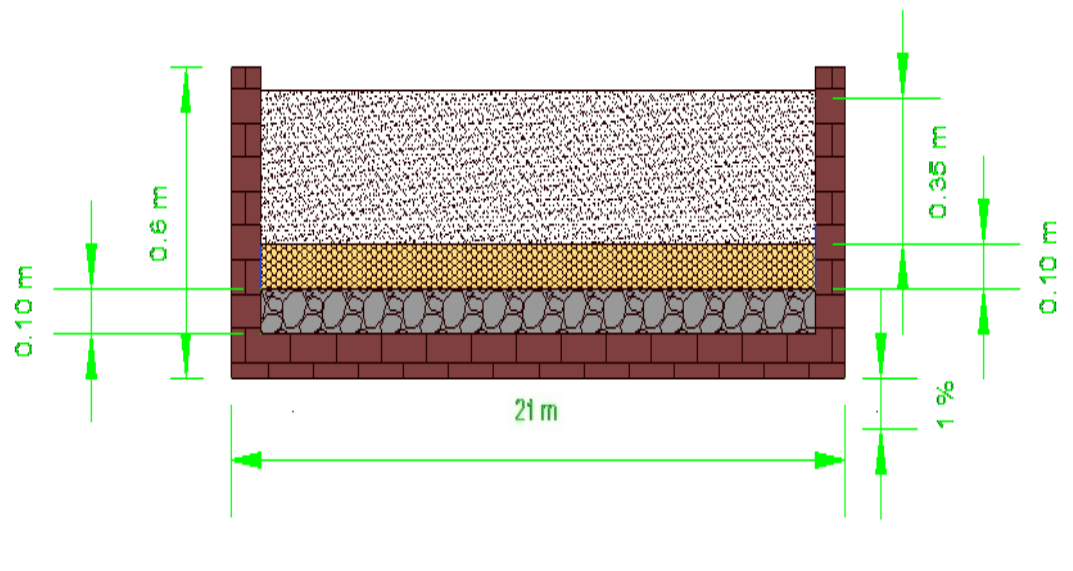


Corte B-B' largo de un Humedal de la fase de Lijado

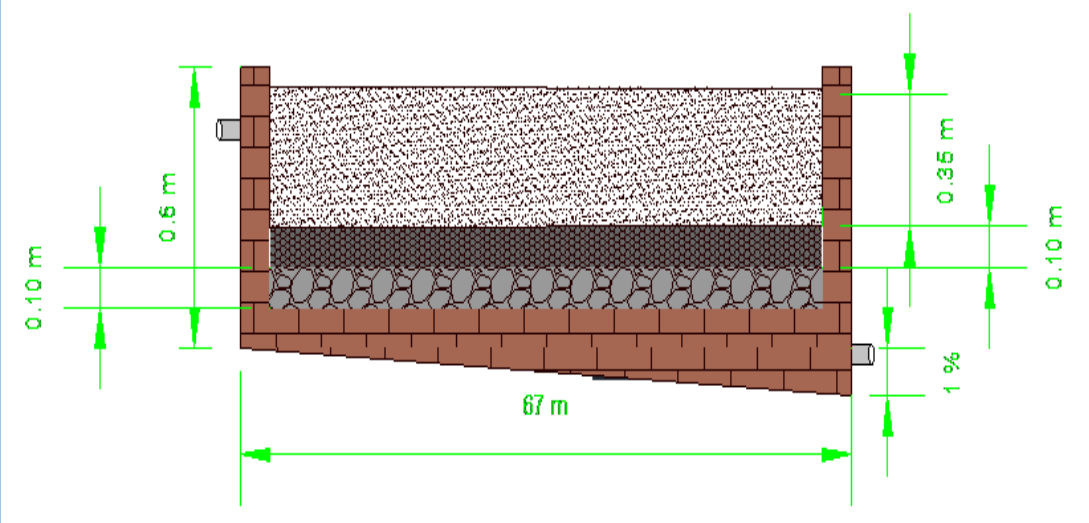


L: Planos del corte Transversal y longitudinal de los humedales de la fase de Pulido.

Corte A-A' Ancho de un Humedal de la fase de Pulido



Corte B-B' largo de un Humedal de la fase de Pulido



M: Plano de la planta de tratamiento Propuesta.

