

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

"Tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un sistema de filtros verdes en la comuna Manglaralto"

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

Leslie Aracelly Marcatoma Brito

GUAYAQUIL – ECUADOR

2018

## DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todas aquellas personas que, codo a codo, emprendieron este camino conmigo.

Gracias por toda su paciencia, amor y entrega.

Leslie Marcatoma B.

## AGRADECIMIENTOS

En este espacio me gustaría agradecer a todos los docentes y colegas que han contribuido en el proceso de investigación y elaboración de este trabajo.

En primer lugar, quisiera agradecer a toda mi familia por el apoyo incondicional, a mi tutor, doctor Fernando Morante, por su orientación y consejos.

De igual manera, deseo expresar mi gratitud a los miembros de CIPAT-ESPOL, en especial a su director, el doctor Paúl Carrión; a los miembros del Laboratorio de aguas de ESPOL, Rebeca, Andrea y muy encarecidamente a su director el doctor Luis Domínguez.

A los trabajadores de la JAAPMAN, por todo el apoyo brindado para que este proyecto se desarrolle de la mejor manera. Al señor Jonny Limón, director de la JAAPMAN, por toda su ayuda y buena voluntad.

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Leslie Aracelly Marcatoma Brito y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

Leslie Marcatoma

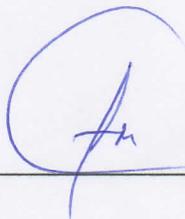
Leslie Aracelly Marcatoma Brito

## EVALUADORES



Miriam Checa A. M.Sc

Profesora de la materia



Fernando Morante C. Ph.D

Profesor tutor

## RESUMEN

En el presente trabajo se realiza el diseño de un sistema piloto de filtros verdes, para tratar la descarga generada por las lagunas de oxidación ubicadas en Montañita, parroquia Manglaralto, provincia de Santa Elena. Actualmente ésta descarga no cumple con los parámetros establecidos en la normativa ecuatoriana y contamina el río Grande que desemboca en la playa de Montañita.

El diseño de la planta piloto de filtros verdes se basa principalmente en la selección y evaluación del emplazamiento, el cálculo de la carga hidráulica de diseño y la superficie necesaria para el sistema. Para tomar muestras a distintas profundidades se construyó un lisímetro que permitió tomar muestras a 30, 60 y 90 cm de profundidad. Las variables que se midieron en el agua tratada fueron: coliformes totales y DBO<sub>5</sub>. Estas variables se relacionaron con los valores calculados para la descarga de las lagunas de oxidación y se calculó el porcentaje de remoción para cada muestra tomada.

Como resultado se obtuvieron elevados porcentajes de remoción a 90 cm de profundidad con respecto al nivel de aplicación del agua residual. Se llegaron a obtener porcentajes de hasta 79% para coliformes totales y 80% para DBO<sub>5</sub>. Estos resultados son acordes a la bibliografía consultada y se encuentran por debajo de los límites establecidos en la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua del TULAS.

Finalmente, se pudo concluir que el suelo de la zona donde se desarrolló la planta piloto de filtros verdes es apto para realizar una remoción eficiente de los contaminantes presentes en el efluente generado por las lagunas de oxidación. Es decir, que este sistema contribuye a la reducción de la contaminación generada; además, ayuda a la reforestación de esta zona árida.

Palabras clave: aguas residuales, tratamiento, filtros verdes, coliformes totales, Demanda Bioquímica de Oxígeno.

## ABSTRACT

In the present study the design of a pilot system of green filters is made, to treat the discharge generated by the oxidation ponds located in Montañita, province of Santa Elena. Currently this discharge doesn't comply with the parameters established in the Ecuadorian regulations and contaminates the Rio Grande that ends at the Montañita beach.

The design of the green filters pilot plant is mainly based on the selection and evaluation of the site, the calculation of the design hydraulic load and the area needed for the system. To take samples at different depths, a lysimeter was constructed that allowed taking samples at 30, 60 and 90 cm depth. The variables that were measured in the treated water were: total coliforms and BOD<sub>5</sub>. These variables were related to the values calculated for the discharge of the oxidation ponds and the percentage of removal for each sample taken was calculated.

As a result, high removal percentages were obtained at 90 cm depth with respect to the level of application of the residual water. Percentages of up to 79% for total coliforms and 80% for BOD<sub>5</sub> were gotten. These products are consistent with the bibliography consulted and are below the limits established in the Environmental Quality and Effluent Discharge Standard: TULAS Water Resource.

Finally, it could be concluded that the soil in the area where the green filter pilot plant was developed is suitable for efficient removal of the contaminants present in the discharge of oxidation ponds. That is to say, that this system contributes to the reduction of the pollution generated; In addition, it helps reforestation of this arid zone.

Keywords: wastewater, treatment, green filters, total coliforms, Biochemical Oxygen Demand.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	VI
ABSTRACT .....	VII
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ABREVIATURAS .....	XI
SIMBOLOGÍA.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XV
CAPÍTULO 1 .....	1
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema .....	2
1.2 Justificación.....	5
1.3 Objetivos.....	8
1.3.1 Objetivo General.....	8
1.3.2 Objetivos Específicos .....	8
1.4 Marco teórico.....	8
1.4.1 Aprovechamiento del agua residual.....	8
1.4.2 Aguas residuales .....	9
1.4.3 Lagunas de oxidación.....	9
1.4.4 Tratamientos no convencionales de aguas residuales .....	10
1.4.4.1 Filtros verdes .....	10
1.4.5 Parámetros de calidad del agua tratada.....	12
1.4.5.1 Coliformes totales.....	14
1.4.5.2 Contaminación por materia orgánica.....	14
1.4.5.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).....	14
1.4.6 Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.....	15

CAPÍTULO 2 .....	18
2 METODOLOGÍA.....	18
2.1 Principales aspectos para tener en cuenta en el diseño de una planta piloto de filtros verdes .....	18
2.1.1 Evaluación y selección del emplazamiento .....	18
2.1.2 Selección del cultivo .....	19
2.1.3 Necesidades de pretratamiento .....	20
2.1.4 Método de distribución .....	20
2.2 Carga hidráulica de diseño.....	21
2.2.1 Carga hidráulica basada en los requerimientos de agua de cultivo .....	21
2.2.2 Carga hidráulica basada en la capacidad de asimilación hidráulica del sistema suelo-planta .....	22
2.2.3 Carga hidráulica basada en la capacidad asimilativa de constituyentes..	23
2.2.4 Carga hidráulica de diseño Lw .....	24
2.3 Superficie necesaria .....	24
2.4 Necesidades de almacenamiento .....	25
2.5 Toma de muestras .....	25
2.6 Análisis de muestras .....	25
2.6.1 Determinación de coliformes totales por medio de filtración a través de membranas.....	26
2.6.1.1 Aparatos y técnicas de filtración .....	27
2.6.1.2 Volumen de agua analizada .....	27
2.6.1.3 Reactivos, materiales y equipos .....	28
2.6.1.4 Medio de cultivo .....	29
2.6.1.5 Limitaciones e interferencias .....	29
2.6.2 Determinación de DBO <sub>5</sub> .....	29
2.6.2.1 Reactivos, materiales y métodos.....	30

2.6.2.2	Preparación de botellas de DBO .....	31
2.6.2.3	Agua de dilución .....	31
2.6.2.4	Solución de semilla .....	32
2.6.2.5	Método de análisis .....	32
2.6.2.6	Análisis de la muestra .....	33
CAPÍTULO 3 .....		34
3	RESULTADOS .....	34
3.1	Selección del emplazamiento .....	34
3.1.1	Características del Suelo .....	34
3.2	Determinación de la carga hidráulica de diseño Lw .....	35
3.3	Superficie necesaria .....	40
3.4	Análisis de muestras .....	41
3.4.1	Coliformes totales .....	41
3.4.2	DBO <sub>5</sub> .....	48
3.5	Estudio organoléptico de las plantas de caña .....	51
CAPÍTULO 4 .....		52
4	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	52
4.1	CONCLUSIONES .....	52
4.2	RECOMENDACIONES .....	53
BIBLIOGRAFÍA .....		54
ANEXOS .....		57

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
CIPAT	Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra
JAAPMAN	Junta Administradora de Agua Potable Manglaralto
TULAS	Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria
GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
COA	Código Orgánico Ambiental
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
FECD	Fondo Ecuatoriano de Cooperación para el desarrollo
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
OD	Oxígeno Disuelto
SENPLADES	Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
NMP	Número Más Probable
UFC	Unidades Formadoras de Colonias

## SIMBOLOGÍA

mg	Miligramo
pH	Potencial de Hidrógeno
μm	Micrometro
cm	Centímetro
m	Metro
km	Kilometro
ha	Hectárea
mL	Mililitro
L	Litro
°C	Grados Centígrados
mΩ	Miliohmios
ln	Logaritmo natural
min	Minutos
N	Norte

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Situación Geográfica del área de estudio. Provincia de Santa Elena y las lagunas de oxidación.....	2
Figura 1.2. Base parroquia rural Manglaralto (GAD Santa Elena, 2015) .....	3
Figura 1.3: Lagunas de Oxidación ubicadas en la comuna de Montañita. ....	4
Figura 1.4: Ubicación de las lagunas de oxidación, el río Grande y la comuna de Montañita. Imagen tomada de Google Earth .....	5
Figura 1.5 Factores climáticos, físicos y químicos que afectan a las lagunas de oxidación (Pérez, 2009) .....	10
Figura 1.6 Esquema de funcionamiento de un filtro verde. (iAGUA, 2016) Modificado por el autor .....	11
Figura 2.1: Ubicación de la planta piloto con respecto a las lagunas de oxidación. Imagen tomada de Google Earth .....	19
Figura 2.2: Esquema de un lisímetro .....	25
Figura 2.3: Colony Counter (BOECO) para el conteo de unidades formadoras de colonia. Laboratorio de Aguas de la FCNM-ESPOL .....	26
Figura 2.4 Ampolletas de caldo m-Colibblue24 (HACH, 2018).....	29
Figura 2.5: Material utilizado en la determinación de DBO <sub>5</sub> . 1) Botellas Winkler de 300 mL. 2) Garrafa Carboy DBO. 3) Multiparámetro HACH. Laboratorio de Aguas de la FCNM-ESPOL .....	31
Figura 3.1: Ubicación de la planta piloto. Imagen tomada de Google Earth .....	34
Figura 3.2: Esquema de la planta piloto de filtros verdes .....	40
Figura 3.3: Blancos realizados para el control de interferencias .....	42
Figura 3.4: Caja Petri con M60, dilución 10 <sup>-1</sup> .....	43
Figura 3.5: De izquierda a derecha diluciones 10 <sup>-2</sup> de M30, M60 y M90 .....	44
Figura 3.6: Coliformes totales a distintas profundidades en las 3 semanas de estudio	45
Figura 3.7: Porcentaje de remoción de coliformes totales para cada punto de estudio en el transcurso de tres semanas .....	47

Figura 3.8: DBO <sub>5</sub> a distintas profundidades durante las 3 semanas de estudio .....	49
Figura 3.9 Porcentaje de remoción de DBO <sub>5</sub> para cada punto de estudio en el transcurso de tres semanas .....	50

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Criterios de calidad admisibles para aguas de uso agrícola (Ministerio del Ambiente, 2014).....	12
Tabla 1.2: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce (Ministerio del Ambiente, 2012) .....	15
Tabla 2.1: Tabla de reactivos para el análisis de coliformes totales.....	28
Tabla 2.2: Tabla de materiales para el análisis de coliformes totales .....	28
Tabla 2.3: Tabla de equipos para el análisis de coliformes totales .....	28
Tabla 2.4: Tabla de reactivos para el análisis de coliformes totales.....	30
Tabla 2.5: Tabla de materiales para el análisis de coliformes totales .....	30
Tabla 2.6: Tabla de equipos para el análisis de coliformes totales .....	30
Tabla 3.1: Precipitaciones registradas en la estación meteorológica de la Libertad (INOCAR, 2017).....	35
Tabla 3.2: Evapotranspiración potencial calculada mediante la fórmula de Thornthwaite, para la estación meteorológica de Salinas (SENPLADES, 2011) .....	36
Tabla 3.3: Requerimiento hídrico del cultivo.....	37
Tabla 3.4: Capacidad de asimilación mensual del sistema .....	38
Tabla 3.5: Cargas hidráulicas calculadas .....	39
Tabla 3.6: Tabla resumen de los valores calculados .....	41
Tabla 3.7: Tablas de diluciones.....	42
Tabla 3.8: Valores de coliformes totales registrados en la semana 1 .....	43
Tabla 3.9: Valores de coliformes totales registrados en la semana 2 .....	44
Tabla 3.10: Valores de coliformes totales registrados en la semana 3 .....	44
Tabla 3.11: Concentración de coliformes totales realizadas en el laboratorio de aguas y en PROTAL.....	45
Tabla 3.12: Coeficientes para modelo de regresión que permite convertir concentraciones de UFC a NMP (Cho et al., 2010). Modificado por el autor.....	46

Tabla 3.13: Porcentaje de remoción de coliformes totales calculados con las muestras M30, M60 y M90 en las tres semanas de estudio .....	47
Tabla 3.14: Valores de DBO <sub>5</sub> registrados la primera semana .....	48
Tabla 3.15: Valores de DBO <sub>5</sub> registrados la segunda semana.....	48
Tabla 3.16: Valores de DBO <sub>5</sub> registrados la tercera semana .....	49
Tabla 3.17: Porcentaje de remoción de DBO <sub>5</sub> calculados con las muestras M30, M60 y M90 en las tres semanas de estudio .....	50

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUCCIÓN

El primer sistema de tratamiento de aguas residuales en el mundo fue desarrollado por los Romanos en el año 100 d.C. En la Grecia antigua, donde surgió por primera vez la aplicación de las aguas residuales para la fertilización agrícola. (We are water, 2017)

Se estima que, en Latinoamérica y el Caribe únicamente el 5% de las viviendas están conectadas a un sistema de tratamiento de aguas residuales. La mayoría de estos tratamientos se basan solo en la eliminación de sólidos suspendidos. (Reynolds, 2002)

El tratamiento de aguas residuales en el Ecuador es uno de los sectores donde menos se invierte en la actualidad. Únicamente un 10% de la totalidad de las aguas residuales generadas tienen algún tratamiento antes de ser descargadas en: ríos, lagos y lagunas.

La parroquia Manglaralto, ubicada en la provincia de Santa Elena tiene un sistema de tratamiento de aguas residuales urbanas con lagunas de oxidación, estas lagunas están ubicadas en la comuna de Montañita (Figura 1.1). El agua tratada mediante este sistema es descargada en el estero Cucaracha que posteriormente se convierte en el río Grande, el cual desemboca en el mar.

Debido a problemas en el momento de diseñar las lagunas, la descarga que genera presenta grandes concentraciones de contaminantes. Conociendo este problema el Gobierno Autónomo Descentralizado de Santa Elena delegó el manejo de las lagunas de oxidación en la Junta Administradora de Agua Potable Manglaralto (JAAPMAN), quienes recurrieron a CIPAT-ESPOL en busca de asesoramiento.

Como parte del asesoramiento se plantea la idea de la implementación de un sistema de filtros verdes, en el cual el agua de las lagunas de oxidación se utilizaría como agua de riego. En este sistema el suelo y las raíces de las plantas adsorben los contaminantes presentes en el agua. Este tipo de sistema de tratamiento de aguas residuales, no convencional, no ha sido probado anteriormente en Ecuador, por ello es de interés científico y tecnológico para este proyecto.



**Figura 1.1. Situación Geográfica del área de estudio. Provincia de Santa Elena y las lagunas de oxidación**

Como valor agregado se busca encontrar una forma de contribuir a la reforestación de Manglaralto. A manera de revertir el daño generado en la provincia de Santa Elena, puesto que en los años 90 fue la principal abastecedora de madera del país, la tala indiscriminada no solo puso en peligro el bosque tropical seco, sino que la falta de arboleda también limitó y redujo el número de precipitaciones, volviendo aún más difícil el acceso al agua dulce en esta área.

### 1.1 Descripción del problema

En la tesis doctoral “*Estudio de las aguas y sedimentos del río Daule, en la provincia del Guayas, desde el punto de vista físico químico, orgánico bacteriológico y toxicológico*” (Huayamave, 2013), se muestran datos que permiten llegar a la conclusión de que la actividad agrícola, los desechos sólidos, las descargas de aguas residuales y el desarrollo urbanístico contaminan el agua y los sedimentos del río Daule. Esto conlleva a una problemática a considerar para el uso correcto y el mantenimiento de las aguas (Huayamave, 2013).

Al igual que el río Daule, muchos ríos del Ecuador son contaminados de la misma manera, en este caso, la descarga de las lagunas de oxidación ubicadas en Montañita contamina el estero Cucaracha, que posteriormente se convierte en el río Grande. Este río se conecta directamente con el mar, de este modo la contaminación se expande y genera molestias en los habitantes y turistas de esta zona tan concurrida en temporada de playa.

En el “*Estudio de Impacto Ambiental expost del proyecto complementario del sistema de alcantarillado sanitario para la comuna Montañita, cantón Santa Elena, Provincia de Santa Elena*” (GAD Santa Elena, 2013), se contempla esta descarga, pero se asegura que la misma, cumplirá con los parámetros ambientales, en conformidad con el Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente (TULAS), en el apartado de Descarga de aguas residuales tratada a un cuerpo de agua dulce (GAD Santa Elena, 2013).

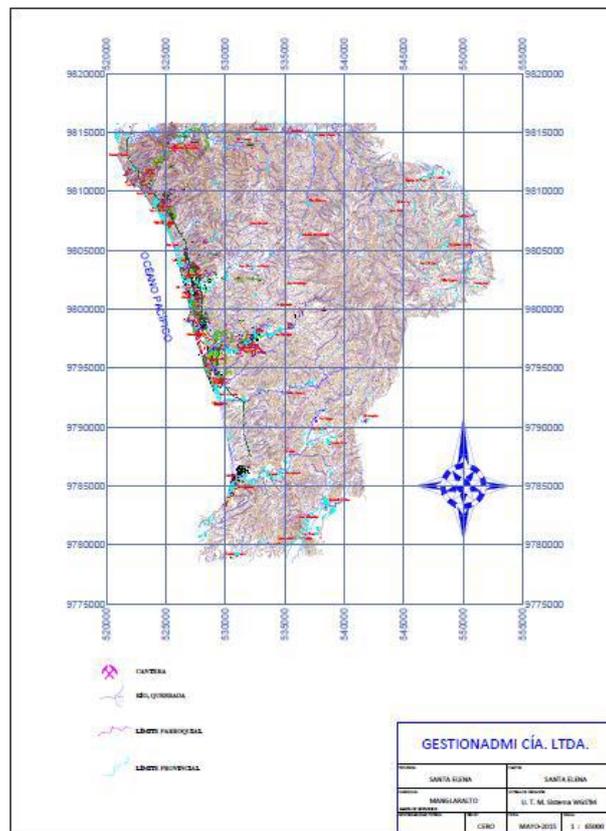


Figura 1.2. Base parroquia rural Manglaralto (GAD Santa Elena, 2015)

La parroquia de Manglaralto se encuentra en la provincia de Santa Elena, Ecuador. Cuenta con una extensión de 426 km<sup>2</sup> y una población de 33 633 habitantes (INEC, 2010). Limita al norte y este con la provincia de Manabí, al sur con la parroquia de Colonche y al oeste con el Océano Pacífico (Figura 1.2.).

El 74% del área de la Península de Santa Elena es árida, aunque su suelo es apto para la agricultura, pero esta actividad se ve limitada por la falta de precipitaciones. Partiendo de esta idea, es necesario realizar acciones que permitan aprovechar toda el agua dulce de la zona (Borbor & Vera, 2014).

La Junta Administradora de Agua Potable Manglaralto (JAAPMAN) se encuentra encargada de 12 pozos, perforados a un promedio de 25 metros cada uno, que actualmente están siendo explotados para proveer de agua a 19 000 habitantes. La JAAPMAN también administra un sistema ineficiente de lagunas de oxidación (GAD Santa Elena, 2015).



**Figura 1.3: Lagunas de Oxidación ubicadas en la comuna de Montañita.**

El tratamiento deficiente de las lagunas de oxidación (Figura 1.3) se puede deber a problemas en el diseño, es decir, pudieron ser diseñadas para tratar un caudal menor al que realmente reciben. Esto afecta directamente el tiempo de retención del agua en las lagunas, conociendo que, si el tiempo no es el necesario no se realiza una correcta depuración del agua residual.

En la Figura 1.4 se puede apreciar la ubicación de las lagunas de oxidación, el río Grande y como se conecta directamente con la playa de Montañita.



**Figura 1.4: Ubicación de las lagunas de oxidación, el río Grande y la comuna de Montañita. Imagen tomada de Google Earth**

Con este proyecto piloto se busca promover una solución para mejorar el tratamiento de las aguas residuales de la parroquia Manglaralto, y de igual manera contribuir a la reforestación de la zona. Por tanto, se plantean las siguientes hipótesis:

- El tratamiento de aguas residuales con filtros verdes eliminará el 90% de la DBO<sub>5</sub> de la corriente de agua proveniente de las lagunas de oxidación de la comuna de Montañita.
- Por medio de filtros verdes se conseguirá reducir la concentración de coliformes totales a 1000NMP/100ml lo cual que permite su uso para agricultura y riego.

## **1.2 Justificación**

En la Constitución de la República del Ecuador se reconoce que “el derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable, constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida”.

En el artículo 196 del Código Orgánico Ambiental (COA) se especifica que, son los Gobiernos Autónomos Descentralizados los encargados de contar con

la infraestructura necesaria para el tratamiento de aguas residuales urbanas y rurales (Ministerio del Ambiente, 2017).

El Gobierno Autónomo Descentralizado de Santa Elena expide la “*Ordenanza de prevención, control y manejo ambiental sobre la contaminación por aguas residuales, desechos industriales, actividades turísticas y demás al recurso agua en el cantón Santa Elena*”, donde establece regulaciones ambientales para el vertido, tratamiento y control de la disposición final de las aguas residuales, de manera que garanticen la salud humana, protección del ambiente y la conservación de los recursos naturales.

En el “*Estudio de Impacto Ambiental expost del proyecto complementario del sistema de alcantarillado sanitario para la comuna Montañita, cantón Santa Elena, Provincia de Santa Elena*” (GAD Santa Elena, 2013), se expone la idea de realizar estudios que permitan aprovechar la descarga de las aguas tratadas para su uso como agua de riego (GAD Santa Elena, 2013).

La idea de desarrollar filtros verdes en esta zona surge gracias a la premisa basada en que son recomendables para núcleos pequeños de población, siempre y cuando el agua a depurar sea urbana. La implementación de estos sistemas es recomendable en zonas mediterráneas o con climas semiáridos o áridos, donde es posible transformar el agua residual en un recurso, como es el caso de la comuna de Montañita (iAGUA, 2016).

En el Proyecto “*Derechos colectivos en la gestión del agua en Ecuador*”, se comenta que en el siglo pasado, alrededor de los años veinte, se inicia la explotación petrolera y paralelamente, la devastación de los recursos forestales de toda la Península, en un porcentaje que se calcula en un 80%. En las décadas de 1950 y 1960, se vivió una gran sequía en la zona que obligó al abandono de las actividades agrícolas y ganaderas, impulsando a la población a acentuar la tala de bosques. También se comenta que el agua que llega hasta la provincia de Santa Elena deriva del trasvase Daule-Peripa, que permite atender múltiples usos como el agua para riego, el agua potable del área urbana y control de inundaciones (Rivadeneria & Peralta, 2009).

En la tesis “*Comparación del efecto de riego con aguas residuales provenientes de las lagunas de oxidación de Santa Elena, sobre 4 especies*

*forestales en etapa vivero*” se comenta que la península de Santa Elena fue la principal abastecedora de madera para el Ecuador durante la construcción de las vías férreas. Es por ello que la vegetación tropical seca de la zona se encuentra amenazada y en peligro de extinción (Noboa, 2010).

Además, en este territorio, el recurso hídrico es sumamente limitado. Esto se genera por la escasez de lluvias y la falta de bosques que capten el agua y contribuyan a que el ciclo de éste pueda desarrollarse normalmente. Se afirma que la reforestación es uno de los puntos más importantes para la reversión del daño que se ha ocasionado en esta provincia; sin embargo, debido a las grandes necesidades de agua que esta actividad requiere, no se ha realizado con éxito (Noboa, 2010).

Según Noboa (2010), la especie arbórea Cascol tuvo un 99,78% de supervivencia, mientras que el Guayacán tuvo un 95% de supervivencia al riego con aguas residuales. Por lo tanto, se considera factible el aprovechamiento de aguas de lagunas de oxidación para el riego de especies forestales, contribuyendo así al reciclaje y a un mejor uso del agua limpia, que puede ser utilizada para otro propósito y que es tan escasa en esta provincia (Noboa, 2010).

La sostenibilidad del acuífero Manglaralto, del cual se abastece la población de la zona, se ve amenazada en temporada alta de turistas. Por lo tanto, es necesario realizar acciones para el sostenimiento este acuífero.

Mediante análisis previos a la descarga de las lagunas de oxidación se encontró que no cumple con los parámetros de descarga que se expusieron en el *“Estudio de Impacto Ambiental expost del proyecto complementario del sistema de alcantarillado sanitario para la comuna Montañita, cantón Santa Elena, Provincia de Santa Elena”* (GAD Santa Elena, 2013), por ello, se plantea la necesidad de realizar un tratamiento alternativo para disminuir la contaminación generada por la descarga. Se desea implementar un sistema piloto de filtros verdes, que permita conocer la capacidad asimilativa del suelo para la eliminación de los contaminantes presentes en el agua, de ser así este sistema se podría aplicar a otras regiones que sufran del mismo problema.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

- Reducir la contaminación generada por las aguas efluentes de las lagunas de oxidación de la parroquia Manglaralto, mediante el diseño e implementación de un sistema piloto de filtros verdes.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar el sitio de emplazamiento para la planta piloto de filtros verdes.
- Calcular la carga hidráulica de diseño y la superficie necesaria para el emplazamiento.
- Analizar el agua filtrada y calcular el porcentaje de remoción.
- Usar el agua tratada para la reforestación de la planta piloto, ubicada en la zona árida de la comuna de Montañita.

### **1.4 Marco teórico**

#### **1.4.1 Aprovechamiento del agua residual**

El uso de aguas residuales para el riego probablemente sea tan antiguo como el cultivo de la tierra. Su aprovechamiento controlado a gran escala se remonta al siglo pasado, cuando en algunas partes de Europa, Australia, India y USA se crearon los denominados “campos de aplicación”. Estos tenían la finalidad de eliminar las aguas negras y evitar la contaminación de los ríos. En El-Gabal El-Asfar, situado a 30 km de El Cairo, en 1911 se creó una plantación, de inicialmente 200 hectáreas, de árboles para eliminar aguas negras de la ciudad (Braatz & Kandiah, 2004).

En algunos lugares, las plantas de tratamiento se han diseñado y ubicado de tal manera que parte del efluente tratado pueda ser evacuado aplicándose al terreno, reutilizándose para diversos fines, como pueden ser el riego de campos de golf. Se supone que esta tendencia aumentará en el futuro, especialmente en aquellas localidades y zonas áridas o semiáridas en las que exista escasez de agua (Metcalf, & Eddy, 1995).

El aprovechamiento del agua residual para el riego se ha generalizado mundialmente, por ejemplo: en China se han regado más de 1,33 millones

de hectáreas de tierra de cultivo. En países como Israel se busca aprovechar cualquier tipo de agua en todos sus niveles de consumo y se benefician de las aguas residuales para los regadíos, en especial de aquellas que, por sus altos niveles de nitrógeno, son más complicadas de tratar. Hacen uso de ellas para cultivos de forrajes de animales. En Perú también se hace uso del agua residual para ampliar la frontera agrícola de la costa, consiguieron regar 18 000 hectáreas utilizando 20 metros cúbicos de agua de desagüe (Noboa, 2010).

#### **1.4.2 Aguas residuales**

Se pueden describir las aguas residuales como basura líquida; proveniente de baños, duchas, cocinas, aguas negras generadas por industrias o comercios, entre otras. Estas son desechadas por medio de las alcantarillas (Noboa, 2010).

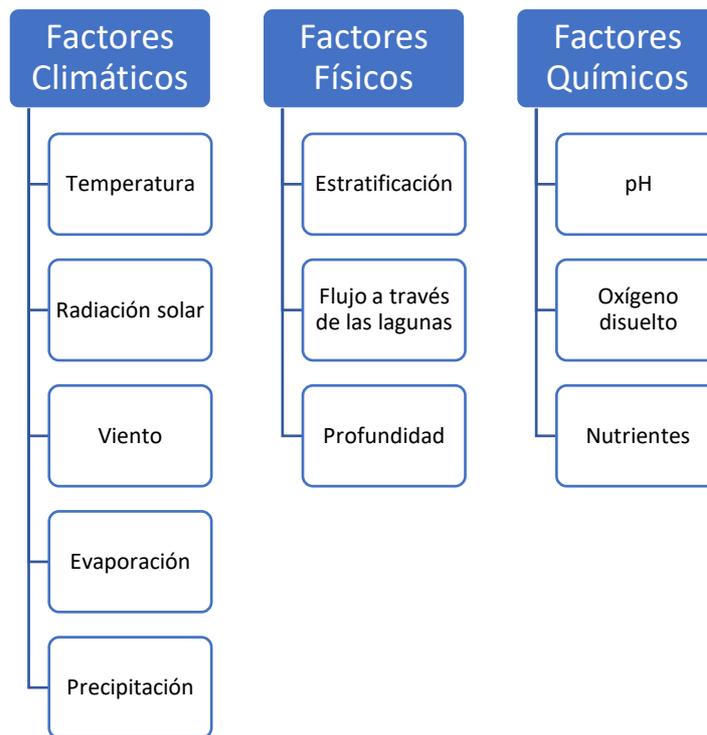
Braatz se refiere a las aguas residuales como los desechos líquidos de los hogares, los locales comerciales y las plantas industriales que se descargan en los sistemas de eliminación individuales o en los tubos de las cloacas municipales (Braatz & Kandiah, 2004).

#### **1.4.3 Lagunas de oxidación**

Las lagunas de oxidación son el método más simple de tratamiento de aguas residuales existente. Principalmente están constituidas por excavaciones de forma cuadrada o rectangular, de poca profundidad, cercadas con taludes de tierra (Pérez, 2009).

Tienen como objetivo remover la materia orgánica que genera contaminación, eliminar microorganismos patógenos y generar un efluente que se pueda reutilizar con otras actividades; por ejemplo, en la agricultura (Pérez, 2009).

En la Figura 1.5 se pueden apreciar algunos factores que afectan el funcionamiento de las lagunas de oxidación.



**Figura 1.5 Factores climáticos, físicos y químicos que afectan a las lagunas de oxidación (Pérez, 2009)**

#### **1.4.4 Tratamientos no convencionales de aguas residuales**

Los tratamientos blandos o no convencionales buscan asemejarse a los procesos de autodepuración natural, pudiendo llegar a ser procesos más lentos y flexibles. De igual manera generan menos costos de operación y necesidades de mantenimiento inferiores a las tecnologías convencionales. Estas tecnologías son aplicables para poblaciones con un número reducido de habitantes y en condiciones climáticas cálidas (Barquilla et al., 2016).

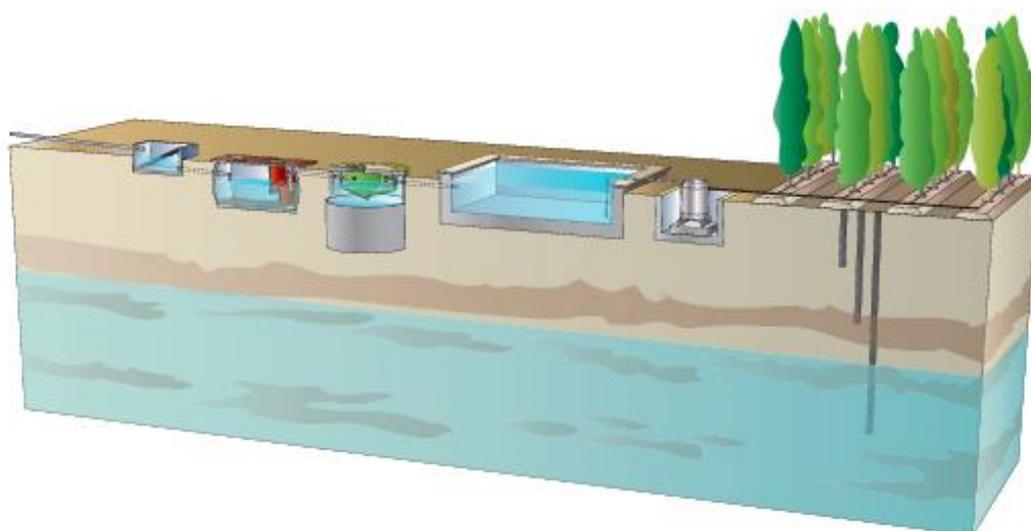
##### **1.4.4.1 Filtros verdes**

Los filtros verdes son sistemas no convencionales de tratamiento de aguas residuales, mediante la aplicación superficial del agua al suelo. En este sistema el suelo cumple con dos funciones principales. En primer lugar es el medio receptor de las aguas residuales; en segundo lugar, es un agente activo, puesto que tanto en su superficie, como en su interior se genera el proceso de remoción de nutrientes, materia orgánica y microorganismos presentes en el agua (CONAGUA, 2015).

Este sistema está constituido por un área de terreno sobre la cuál se establecen una o varias especies vegetales, a las cuales se les riega periódicamente el agua residual a tratar mediante algún sistema de riego (Álvarez, 2002).

Estos sistemas se pueden establecer en cultivos agrícolas, forrajeros y forestales. Los cultivos forestales presentan las mayores ventajas, tanto como sistema de depuración o con relación al aprovechamiento de los nutrientes, con otros cultivos (Álvarez, 2002).

En la Figura 1.6 se puede apreciar el funcionamiento de un sistema de filtros verdes.



**Figura 1.6 Esquema de funcionamiento de un filtro verde. (iAGUA, 2016)  
Modificado por el autor**

El tratamiento del agua residual en un filtro verde se consigue mediante procesos físicos, químicos y biológicos naturales que se desarrollan en el ecosistema suelo-agua-cultivo; siendo capaces de eliminar hasta cierto punto casi todos los contaminantes del agua residual tales como: sólidos suspendidos, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, elementos traza y microorganismos, alcanzando rendimientos de depuración de hasta un 98% en los primeros centímetros de suelo (Álvarez, 2002).

Los filtros verdes son considerados un tipo de tecnología fiable, sólida y muy competitiva para tratar aguas residuales de pequeñas comunidades, con numerosas ventajas (iAGUA, 2016):

- Bajo costo de instalación y mantenimiento, comparado con los sistemas convencionales.
- Sencillo mantenimiento: semejante a labores agrícolas, no requiere personal especializado.
- Alta efectividad: rendimientos de hasta 98% en la reducción de la carga contaminante en los pocos centímetros del suelo.
- Reutilización del agua residual para la producción de madera o biomasa, o para la recarga de acuíferos.
- Mejora paisajística.

#### 1.4.5 Parámetros de calidad del agua tratada

Mediante este sistema piloto se buscará que el agua tratada cumpla con los criterios de calidad para aguas de uso agrícola o de riego según la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de efluentes: Recurso Agua.

Se percibe como agua de uso agrícola, a aquella que se emplea para irrigar cultivos y realizar otras actividades complementarias realizadas por los organismos competentes (Ministerio del Ambiente, 2014).

**Tabla 1.1: Criterios de calidad admisibles para aguas de uso agrícola (Ministerio del Ambiente, 2014)**

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aluminio	Al	mg/L	5,0
Arsénico (total)	As	mg/L	0,1
Bario	Ba	mg/L	1,0
Berilio	Be	mg/L	0,1
Boro (total)	B	mg/L	1,0
Cadmio	Cd	mg/L	0,01
Carbamatos totales	Concentración total de carbamatos	mg/L	0,2
Cianuro (total)	CN <sup>-</sup>	mg/L	0,2

Cobalto	Co	mg/L	0,5
Cobre	Cu	mg/L	2,0
Cromo hexavalente	Cr <sup>+6</sup>	mg/L	0,1
Flúor	F	mg/L	1,0
Hierro	Fe	mg/L	5,0
Litio	Li	mg/L	2,5
Materia flotante	Visible		Ausencia
Manganeso	Mn	mg/L	0,2
Molibdeno	Mo	mg/L	0,01
Mercurio (total)	Hg	mg/L	0,001
Níquel	Ni	mg/L	0,2
Organofosforados	Concentración total	mg/L	0,1
Organoclorados	Concentración total	mg/L	0,2
Plata	Ag	mg/L	0,05
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Plomo	Pb	mg/L	0,05
Selenio	Se	mg/L	0,02
Sólidos totales disueltos		mg/L	3 000,0
Transparencia de las aguas medidas con el disco secchi			Mínimo 2,0 m
Vanadio	V	mg/L	0,1
Aceites y grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/L	0,3
Coliformes totales	NMP/100ml		1000

Totales huevos de parásitos		Huevos por litro	0
Zinc	Zn	mg/L	2,0

En este trabajo se evaluará como indicador el valor de coliformes totales y se harán mediciones de DBO<sub>5</sub>.

#### **1.4.5.1 Coliformes totales**

Los coliformes totales son bacterias de tipo enterobacteriaceae lactosa-positivas, se caracterizan por su capacidad de fermentar la lactosa mediante la producción de ácido y gas, en un periodo de 48 horas a alrededor de 30-37 °C. Se encuentran en el intestino del hombre y los animales, pudiendo estar en otros ambientes como: agua, suelo, plantas, entre otros (Universidad de Salamanca, 2015).

Dentro del grupo de coliformes totales existe un subgrupo denominado coliformes fecales, su origen es principalmente fecal y por ello se lo considera un índice para la contaminación por heces fecales (Universidad de Salamanca, 2015).

#### **1.4.5.2 Contaminación por materia orgánica**

La contaminación generada por materia orgánica suele ser la que produce el efecto más significativo sobre un sistema acuático. La fuerte demanda de oxígeno disuelto para la oxidación de materia orgánica o inorgánica, en la columna de agua y en los sedimentos. La cantidad de oxígeno disuelto es una variable fundamental por medir, para determinar el nivel de contaminación por materia orgánica biodegradable de un cuerpo hídrico (Ramos, 2016).

#### **1.4.5.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)**

Este parámetro mide la cantidad de oxígeno necesaria para degradar bioquímicamente la materia orgánica presente en una muestra de agua. Para esto, la muestra es colocada en una botella especialmente diseñada para este análisis. El análisis se basa en la comparación del

oxígeno disuelto inicial en un la muestra y el oxígeno remanente después de haber sido incubados por 5 días a 20 °C (Montoya & Rosado, 2015).

#### 1.4.6 Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce

Dentro de la Normativa Ecuatoriana, en la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua, se determinan los límites de descarga para distintos cuerpos hídricos, en este caso la descarga se realiza a un riachuelo, por lo tanto, en la tabla 1.2 se muestran los valores permitidos.

**Tabla 1.2: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce (Ministerio del Ambiente, 2012)**

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y grasas	Sust. Solubles en hexano	mg/L	30,0
Alkil mercurio		mg/L	No detectable
Aluminio	Al	mg/L	5,0
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 <sup>-</sup>	mg/L	0,1
Cinc	Zn	mg/L	5,0
Cloro activo	Cl	mg/L	0,5
Cloroformo	Ext. Carbón cloroformo ECC	mg/L	0,1
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	mg/L	1000
Cobre	Cu	mg/L	1,0
Cobalto	Co	mg/L	0,5
Coliformes fecales	NMP	NMP/100 mL	10000

Color real	Color real	Unidades de color	Inapreciable en dilución 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/L	0,2
Cromo hexavalente	Cr <sup>+6</sup>	mg/L	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO <sub>5</sub>	Mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/L	200
Estaño	Sn	mg/L	5,0
Fluoruros	F	mg/L	5,0
Fósforo total	P	mg/L	10,0
Hierro total	Fe	mg/L	10,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/L	20,0
Manganeso total	Mn	mg/L	2,0
Materia flotante	Visible		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/L	0,005
Níquel	Ni	mg/L	2,0
Nitrógeno amoniacal	N	mg/L	30,0
Nitrógeno total Kjeldahl	N	mg/L	50,0
Compuestos organoclorados	Organoclorados totales	mg/L	0,05
Compuestos organofosforados	Organofosforados totales	mg/L	0,1
Plata	Ag	mg/L	0,1
Plomo	Pb	mg/L	0,2

Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Selenio	Se	mg/L	0,1
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/L	130
Sólidos totales	ST	mg/L	1600
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	mg/L	1000
Sulfuros	S <sup>-2</sup>	mg/L	0,5
Temperatura	°C		Condición natural ±3
Tensoactivos	Activas al azul de metileno	mg/L	0,5
Tetracloruro de carbono	Tetrocloruro de carbono	mg/L	1,0

# CAPÍTULO 2

## 2 METODOLOGÍA

Para realizar la metodología de este proyecto se seguirán las pautas propuestas por Álvarez en la publicación “Filtros verdes. Un sistema de depuración ecológico” (Álvarez, 2002).

### 2.1 Principales aspectos para tener en cuenta en el diseño de una planta piloto de filtros verdes

Un sistema piloto de filtros verdes consta de dos etapas:

1. Diseño preliminar
2. Proyecto constructivo

Dentro del diseño, los aspectos tener en cuenta están:

#### 2.1.1 Evaluación y selección del emplazamiento

Ésta es una de las características más importantes a tomar en cuenta. Los factores limitantes son la permeabilidad del suelo y la profundidad de las aguas subterráneas. Se puede decir que el suelo presenta condiciones óptimas cuando (Álvarez, 2002):

- El pH está entre 5,5 y 8,4,
- La conductividad eléctrica es menor de 4 mΩ/cm,
- La permeabilidad está entre 5 y 50 mm/h,
- Las aguas subterráneas se encuentran a profundidades entre 0,6 y 1,5 m,
- Pendientes entre el 2 y 15 % en terrenos cultivados, en terrenos no cultivados pueden ser superiores.

En este proyecto el emplazamiento fue determinado por parte de la JAAPMAN (Junta Administradora de Agua Potable Manglaralto), se busca determinar si el suelo que se encuentra junto a las lagunas de oxidación de aguas residuales en Montañita es apto para realizar este tipo de tratamiento no convencional. En la figura 2.1 se puede apreciar las lagunas de oxidación y la ubicación de la planta piloto con respecto a las mismas.



**Figura 2.1: Ubicación de la planta piloto con respecto a las lagunas de oxidación. Imagen tomada de Google Earth**

### **2.1.2 Selección del cultivo**

Muchas de las decisiones asociadas con el proyecto dependerán del tipo de cultivo que se utilizará; los más adecuados son los que presentan mayor capacidad de asimilación de nutrientes, alto consumo de agua, elevada tolerancia a la humedad del suelo, baja sensibilidad a los componentes del agua residual y pocas necesidades de control. Con estas características tenemos los cultivos de especies forrajeras perennes, turbas, ciertas especies de árboles o cultivos agrícolas. Los cultivos forestales y forrajeros tienen una gran capacidad para asimilar nutrientes y presentan menor consumo de agua, comparados con los que puede demandar un cultivo agrícola (Álvarez, 2002).

La fundación NOVAVIDA donó cierto número de plantas de caña guadua, una planta autóctona de la zona. Esta especie presenta múltiples beneficios para el medio ambiente (FECD, 2009):

- Brinda protección a los suelos gracias a las grandes raíces que posee, con estas se agarran a la tierra y evitan la erosión de suelo.

- Tienen la capacidad de almacenar agua, en la época de invierno pueden llegar a almacenar hasta 25 litros de agua. Esta agua la usan en el verano, cuando la tierra esta seca por la escasez de lluvia.
- La caña puede captar entre 100 a 120 toneladas de CO<sub>2</sub> por hectárea.

Además, la caña guadua presenta múltiples beneficios económicos, la comunidad podría percibir ingresos monetarios si se realiza una correcta comercialización. También se genera una cadena productiva que va desde la siembra hasta la venta de caña preservada, muebles o artesanías (FECD, 2009).

### **2.1.3 Necesidades de pretratamiento**

Es necesario realizarlo por cuestiones de salud pública, control de efectos desfavorables, limitaciones de los sistemas de distribución, o con el terreno y el cultivo. El nivel de pretratamiento puede variar desde un tratamiento primario, hasta otro avanzado, en dependencia del objetivo final del sistema (Álvarez, 2002).

En las áreas forestales los niveles de pretratamiento se pueden reducir al mínimo considerando que las cosechas no serán consumidas por humanos y que el grado de contacto con el agua residual es el mínimo. Cabe recalcar que existen áreas forestales que se han regado con agua residual cruda, como se señala en el apartado 1.4.1. (Álvarez, 2002).

En este caso, el agua que se usará para la planta piloto será tomada de las lagunas de oxidación. El agua que llega hasta las lagunas ya tuvo un tratamiento primario previo, que consiste en filtros, rejillas de desbaste, desarenadores y desengrasante que se encargan de separar los sólidos de mayor tamaño del agua y la preparar el agua para su tratamiento en las lagunas de oxidación.

### **2.1.4 Método de distribución**

El método de distribución del agua residual se selecciona en las primeras etapas del diseño preliminar, puesto que la eficiencia de aplicación del sistema de distribución constituye un parámetro muy importante en las

necesidades totales de agua de riego. Los métodos de aplicación pueden ser (CONAGUA, 2015):

- Aspersión
- Riego superficial
- Goteo
- Pulsos

Utilizar uno u otro depende de que las condiciones de uso sean adecuadas o de la eficiencia de la aplicación (Álvarez, 2002).

Para este proyecto el riego se realizará por pulsos, este método permite una mejor absorción de nitrógeno por el cultivo (El Mercurio, 2013).

El agua se regará por ciclos desde el lugar de mayor pendiente hacia el de menor, de manera que el agua percole tanto lateralmente, como en profundidad a lo largo de los surcos.

## **2.2 Carga hidráulica de diseño**

La carga hidráulica de diseño es el volumen de agua residual aplicada por unidad de área de terreno y por un tiempo determinado. Es un parámetro básico en el diseño (CONAGUA, 2015).

### **2.2.1 Carga hidráulica basada en los requerimientos de agua de cultivo**

Para conocer la cantidad de agua requerida por un cultivo se realiza una estimación para reemplazar el agua consumida por la evapotranspiración, más el agua necesaria para el lavado del suelo. Esto se define en la siguiente expresión:

$$R = (ET - P_r) \times (1 + LR) \quad (2,1)$$

Donde:

R: agua neta requerida por la vegetación (mm/mes)

ET: Evapotranspiración (mm/mes)

P<sub>r</sub>: Precipitación respectivamente (mm/mes)

LR: Agua requerida para el lavado

El agua requerida para el lavado, normalmente, suele variar entre el 10 y 25 % del agua total aplicada (Álvarez, 2002).

Conociendo que los sistemas de distribución pierden una parte del agua durante el riego, puesto que no aplican el agua de manera uniforme sobre el área en la que se está trabajando. Considerando esto, la carga hidráulica a aplicar se define como:

$$Lw(I) = \frac{R}{Ea} \quad (2,2)$$

$$Lw(I) = \frac{(ET - P_r) \times (1 + LR)}{Ea} \quad (2,3)$$

Donde:

$Lw(I)$ : Carga hidráulica basada en los requerimientos de agua de la vegetación (mm/mes)

$Ea$ : Eficiencia de aplicación del sistema (Álvarez, 2002).

Para un sistema de riego por pulsos la eficiencia registrada en la literatura es de 85% (Colegio de Ingenieros Agrónomos de Chile, 2013).

### **2.2.2 Carga hidráulica basada en la capacidad de asimilación hidráulica del sistema suelo-planta**

Para determinar esta carga hidráulica se realiza un balance general de agua:

$$Lw(P) = ET - P_r + P_w \quad (2,4)$$

Donde:

$Lw(P)$ : Carga hidráulica basada en la capacidad de asimilación hidráulica suelo-planta (mm/mes)

$P_w$ : Velocidad de percolación (mm/mes)

La velocidad de percolación está basada en el valor mínimo de permeabilidad en condiciones de saturación en los primeros 2,5 metros de columna estratigráfica. En diseños preliminares se puede tomar un valor variable entre el 2 y 6 % de la permeabilidad mínima de los suelos presentes (Álvarez, 2002).

### 2.2.3 Carga hidráulica basada en la capacidad asimilativa de constituyentes

Cada constituyente del agua residual puede convertirse en un factor limitante de la carga hidráulica dependiendo de su concentración en el agua residual, de la capacidad de asimilación del sistema y de si existen o no restricciones medio ambientales. Para la capacidad asimilativa de nitrógeno se usa la siguiente ecuación:

$$Lw(n) = \frac{Cp(P_r - ET) + U \times 100}{(1 - f)Cn - Cp} \quad (2,5)$$

Donde:

Lw(n): Carga hidráulica admisible basada en la carga anual de nitrógeno (mm/año)

Cp: Concentración total de nitrógeno en el agua percolada (mg/L)

Cn: Concentración total de nitrógeno en el agua residual aplicada(mg/L)

f: Fracción de nitrógeno total aplicado, eliminado por la desnitrificación

U: Asimilación de nitrógeno del cultivo (kg/ha año)

Los valores de U y f se pueden encontrar tabulados (Álvarez, 2002).

Otros autores, como Ou plantea obtener la hidráulica basada en la capacidad asimilativa de los constituyentes, mediante:

$$Lw(c) = (M \times 10)C \quad (2,6)$$

Donde:

Lw(c): Carga hidráulica basada en la capacidad asimilativa de constituyente (cm/año)

M: Capacidad asimilativa del constituyente (kg/ha año)

C: Concentración del constituyente en el agua residual

Los valores de M se pueden encontrar en literatura. Se conoce que los cultivos forestales tienen una mayor capacidad de asimilación de nitrógeno, alcanzando valores mayores 400 kg/ha año (Álvarez, 2002).

#### 2.2.4 Carga hidráulica de diseño $L_w$

Con todos los valores de las cargas calculados, se tomará el menor de estos para el diseño. En caso de que el valor menor corresponda a la capacidad asimilativa de los constituyentes, por seguridad se deberá realizar una comprobación de los valores mensuales correspondientes adoptando siempre el menor de estos para el diseño (Álvarez, 2002).

### 2.3 Superficie necesaria

Para el cálculo de la superficie necesaria, se tomará en cuenta la superficie cultivada, la requerida para las instalaciones de pretratamiento, zonas de amortiguación, accesos y depósitos de almacenamiento. Con la carga hidráulica se puede calcular la superficie de campo requerida:

$$A = \frac{Q \times 365 \times \Delta v_s}{10 \times L_w} \quad (2,7)$$

Donde:

A: Superficie del campo (ha)

Q: Caudal medio de agua residual ( $m^3/d$ )

$L_w$ : Carga hidráulica de diseño

$\Delta v_s$ : Ganancias o pérdidas netas de agua almacenadas debidas a las precipitaciones, evaporación y fugas en el depósito de almacenamiento ( $m^3/año$ )

Otra forma de calcular la superficie requerida es:

$$A_w = \frac{Q \times C}{12000 \text{ g/ha}} \quad (2,8)$$

Donde:

Q: Caudal medio diario de tratamiento ( $m^3$ )

C: Concentración de  $DBO_5$  promedio en el agua residual (mg/L)

El factor 12000 corresponde a la cantidad en gramos de  $DBO_5$  por habitantes asimilados en una hectárea de terreno (g/ha). (Álvarez, 2002)

## 2.4 Necesidades de almacenamiento

Si la cantidad de agua residual excede a la carga hidráulica de diseño, será necesario diseñar instalaciones de almacenamiento del agua residual, la cual puede generar 2 problemas (Álvarez, 2002):

1. Que se produzcan fermentaciones anaerobias, con sus consecuentes malos olores.
2. Generación de lodos al decantarse los productos en suspensión de las aguas residuales.

Puesto que el agua que se usará en la planta piloto proviene de lagunas de oxidación, no se existen necesidades de almacenamiento extras. Esto evitaría la generación de los problemas antes mencionados.

## 2.5 Toma de muestras

Para el análisis del agua tratada se construirán lisímetros a profundidades de 30, 60 y 90 centímetros al final de los surcos donde se regará el agua residual. Estos lisímetros permitirán recolectar muestras de aguas a dichas profundidades. En la figura 1.6 se puede observar el esquema de un lisímetro.

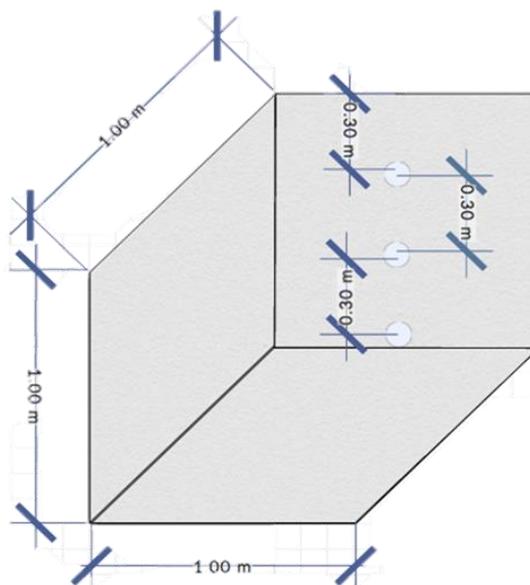


Figura 2.2: Esquema de un lisímetro

## 2.6 Análisis de muestras

A cada muestra tomada se le realizará análisis de coliformes totales y  $DBO_5$  en el Laboratorio de Aguas de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Tanto la toma de muestras como los análisis se realizarán semanalmente durante tres semanas.

### 2.6.1 Determinación de coliformes totales por medio de filtración a través de membranas

Para el análisis de coliformes totales se utilizará el método por filtración a través de membrana. Por este método, el número de coliformes totales presentes en el agua se determina mediante la filtración de volúmenes específicos de la muestra a través de filtros de membrana, normalmente estos filtros están compuestos de ésteres de celulosa, con poros de 0,45 mm de diámetro que retienen coliformes totales (Universidad de Salamanca, 2015).

La principal ventaja de este método es la rapidez con la que se pueden obtener los resultados. Esta técnica puede aplicarse en el análisis de casi todos los tipos de agua, también se utiliza en el análisis de leche y otros alimentos líquidos (Universidad de Salamanca, 2015).

En la figura 2.3 se puede apreciar el Colony Counter que facilita el contar las colonias en caja Petri.



**Figura 2.3: Colony Counter (BOECO) para el conteo de unidades formadoras de colonia. Laboratorio de Aguas de la FCNM-ESPOL**

### 2.6.1.1 Aparatos y técnicas de filtración

La filtración es la principal herramienta para este análisis, a continuación se describen las actividades necesarias para este proceso (Universidad de Salamanca, 2015):

- El aparato de filtración consiste de un disco incrustado (portafiltros) sostenido por soporte de goma o caucho, que se ajusta a una base donde puede fijarse un embudo graduado o una rampa múltiple de filtración.
- El disco incrustado o perforado (portafiltros) sostiene el filtro de membrana.
- El portafiltros se coloca encima de un soporte de filtración bien sea único o colector múltiple (rampas de filtración para varias muestras a la vez) conectado a un sistema de vacío.

### 2.6.1.2 Volumen de agua analizada

Generalmente el volumen de agua a analizar es 100 mL. En aguas superficiales, o aguas sin tratar, el número de bacterias en 100 mL pueden variar de pocas decenas a cientos de miles. Por ello es necesario realizar diluciones de manera que el número de bacterias por placa sea contable (Universidad de Salamanca, 2015).

- Para realizar una dilución 1/10 ( $10^{-1}$ ), se pipetea asépticamente 1 mL de muestra en un tubo con 9 mL de agua destilada estéril y se agita.

$$\begin{array}{ccc} \text{Muestra} & \text{Agua} & \text{Dilución} \\ 1 \text{ mL} & + \ 9 \text{ mL} & = \ 1/10 \ (10^{-1}) \end{array}$$

- Para realizar una dilución 1/100 ( $10^{-2}$ ), se pipetea 1 mL de la dilución 1/10 en otro tubo con 9 mL de agua destilada estéril y se agita.

$$\begin{array}{ccc} \text{Dilución} & \text{Agua} & \text{Dilución} \\ 1 \text{ mL} & + \ 9 \text{ mL} & = \ 1/10 \ (10^{-2}) \end{array}$$

### 2.6.1.3 Reactivos, materiales y equipos

**Tabla 2.1: Tabla de reactivos para el análisis de coliformes totales**

<b>Reactivos</b>	
1	Alcohol potable
2	Agua estéril
3	Medio de cultivo m-Colibblue, HACH

**Tabla 2.2: Tabla de materiales para el análisis de coliformes totales**

<b>Materiales</b>	
1	Vasos de precipitación de 10 mL
2	Tubos de ensayo con tapa
3	Pinzas
4	Mechero de alcohol
5	Membranas millipore en esteres de celulosa de 0,45 micras de poro
6	Cajas petri de poliestireno con pads
7	Puntas de 5 mL

**Tabla 2.3: Tabla de equipos para el análisis de coliformes totales**

<b>Equipos</b>	
1	Incubadora, Memmert, Modell 100-800
2	Micropipeta
3	Sistema de vacío
4	Colony Counter, BOECO, CC-1
5	Soporte de filtros con embudos
6	Autoclave

#### 2.6.1.4 Medio de cultivo

Se usaron ampollitas de caldo m-Colibblue24 HACH (Figura 2.4), son medios preparados para detección simultánea de E. Coli y total de coliformes en filtro en 24 horas (HACH, 2018).

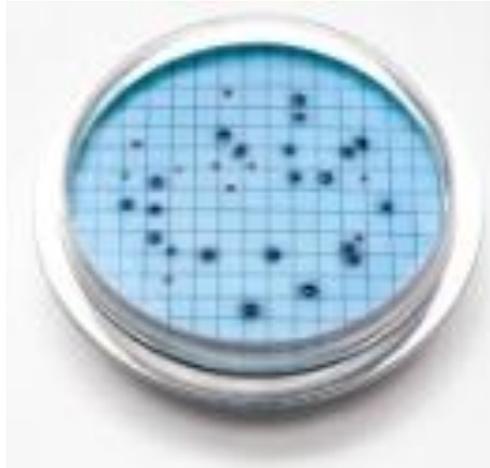


Figura 2.4 Ampollitas de caldo m-Colibblue24 (HACH, 2018)

#### 2.6.1.5 Limitaciones e interferencias

Para realizar este procedimiento es importante tomar en cuenta los siguientes aspectos antes de realizar el procedimiento (Las Ceibas, 2017):

- Una muestra no se puede procesar pasada 24 horas de su recolección, aunque se haya refrigerado.
- El procedimiento incluye desinfección antes y después de realizar el trabajo.
- El material por utilizar debe ser esterilizado.
- Las muestras y las diluciones se deben agitar antes de realizar el cultivo.

#### 2.6.2 Determinación de DBO<sub>5</sub>

Previo al análisis se debe realizar la calibración de los equipos de medición de oxígeno disuelto, contar con hojas de registro de los ensayos y verificar el funcionamiento de la incubadora para DBO<sub>5</sub>. Se debe preparar solución de HCl al 10%, la cantidad necesaria variará dependiendo del número de la cantidad de botellas que se van a utilizar (Montoya & Rosado, 2015).

### 2.6.2.1 Reactivos, materiales y métodos

**Tabla 2.4: Tabla de reactivos para el análisis de coliformes totales**

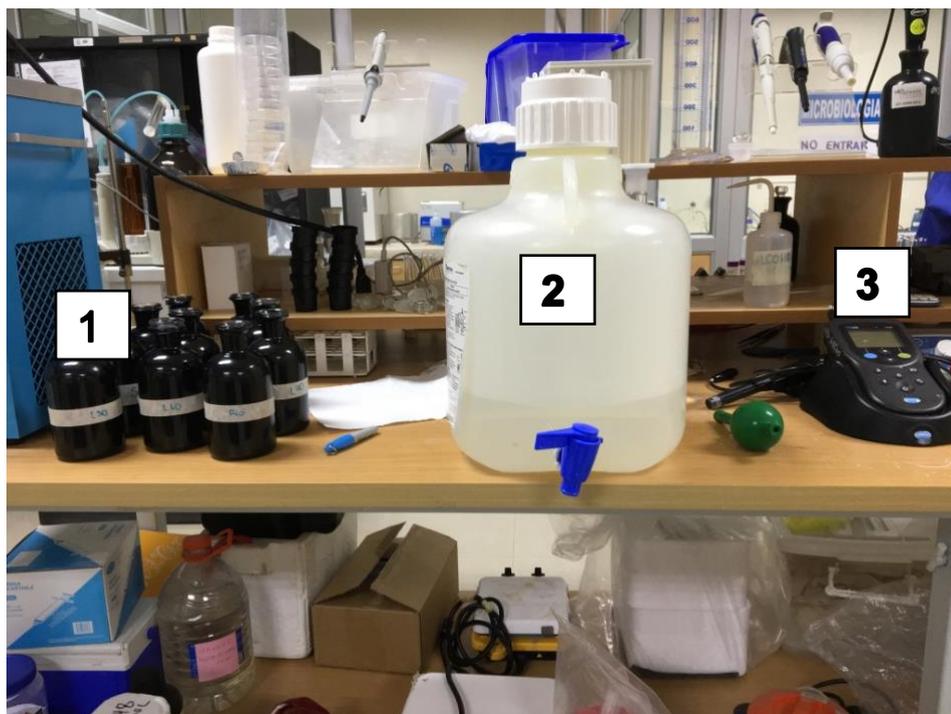
<b>Reactivos</b>	
1	Alcohol potable
2	Agua tipo 1
3	Inoculo de cultivo para DBO PolySeed, HACH
4	Nutrientes de solución buffer, HACH
5	HCl al 10%

**Tabla 2.5: Tabla de materiales para el análisis de coliformes totales**

<b>Materiales</b>	
1	Botellas winkler
2	Garrafa Carboy DBO
3	Probeta de 1000 mL
4	Agitador magnético
5	Pipetas de 5 mL, 10 mL y 25 mL
6	Vaso de precipitación de 1000 mL
7	Matraz volumétrico de 1000 mL
8	Pera de succión

**Tabla 2.6: Tabla de equipos para el análisis de coliformes totales**

<b>Equipos</b>	
1	Plancha de agitación
2	Incubadora ST 4 BASIC_X, Pol-eko
3	Multiparamétrico HACH, HQ40d
4	Autoclave



**Figura 2.5: Material utilizado en la determinación de DBO<sub>5</sub>. 1) Botellas Winkler de 300 mL. 2) Garrafa Carboy DBO. 3) Multiparámetro HACH. Laboratorio de Aguas de la FCNM-ESPOL**

### **2.6.2.2 Preparación de botellas de DBO**

Para evitar interferencias, las botellas de DBO deben pasar por un proceso de limpieza y desinfección riguroso, primer se realiza un lavado con agua potable, cepillo de botellas y detergente libre de fosfatos. Después de retirar todos los residuos de jabón, se procederá a enjuagar las botellas con agua desionizada. Luego con ayuda de una probeta se colocarán 10 mL de ácido clorhídrico al 10% en cada botella y se las enrasará con agua tipo 1, esto se debe dejar actuar durante 24 horas. (Montoya & Rosado, 2015). En la figura 2.5 se muestran las botellas.

### **2.6.2.3 Agua de dilución**

Para realizar el agua de dilución, rica en nutrientes, se usa agua tipo 1. La garrafa “Carboy DBO” (Figura 2.5) debe estar completamente limpia para evitar cualquier tipo de contaminación, por ello se lava y autoclava la botella. Para que el agua de dilución contenga la cantidad apropiada de nutrientes, minerales y buffer se hace uso de cápsulas Nutrient Buffer Pillow provistas por HACH Company. Cada cápsula contiene la

concentración necesaria de nutrientes y buffer para 300 mL de agua tipo 1. Se sigue el siguiente procedimiento (Montoya & Rosado, 2015):

- Adicionar el volumen deseado de agua tipo 1 en la garrafa
- Abrir las cápsulas y adicionar su contenido al recipiente con agua, realizando enjuagues para comprobar que se retire todo el producto.
- Agitar manualmente la garrafa hasta homogenizar la solución preparada durante 1 minuto.

El agua de dilución debe tener al menos 8 mg/L de concentración de oxígeno disuelto.

#### **2.6.2.4 Solución de semilla**

Esta solución permite comprobar que el sistema cuenta con la cantidad necesaria de microorganismos capaces de oxidar la materia orgánica biodegradable. Para la preparación del inoculo se debe (Montoya & Rosado, 2015):

- Colocar la totalidad de una semilla en un vaso de precipitación de 1000 mL limpio, que contenga 500 mL de agua de dilución.
- Con ayuda de un agitador magnético se homogeniza la solución durante 1 hora a velocidad de 6.
- Detener la agitación y dejar reposar durante 15 minutos.
- Verter el sobrenadante en un beaker de 500 mL evitando el paso del sedimentado.
- Mantener la solución en agitación suave durante el resto del ensayo.

#### **2.6.2.5 Método de análisis**

Es necesario realizar distintos controles para corroborar que no existan interferencias en el análisis (Montoya & Rosado, 2015):

- Control del agua de dilución: Se requiere que cada lote de análisis tenga dos botellas winkler que serán incubadas con esta solución (blanco de agua de dilución)

- Control del inóculo: Se elaboran 3 diluciones en 3 botellas. Con ayuda de una pipeta se agregan 15, 25 y 30 mL de solución PolySeed en cada botella y se lo enrasa hasta 300 mL.
- Control de Estándar Glucosa- ácido glutámico: Se usan de 1 a 4 mL de una solución Standard de una concentración de 3,0 mg/L de la solución. Se agregan 4 mL de solución PolySeed y se enrasa la botella con agua de dilución.

#### **2.6.2.6 Análisis de la muestra**

Para realizar el análisis de las muestras se procede con los siguientes pasos, de preferencia se deberían realizar varias diluciones por muestra (Montoya & Rosado, 2015):

- Con ayuda de una pipeta se agrega la cantidad deseada de muestra a la botella winkler, 4 mL de semilla PolySeed y se enrasa la botella con agua de dilución.
- Se inserta la sonda para la determinación de OD en la botella, evitando tocar las paredes (Figura 2.5).
- Se tapan herméticamente las botellas y se las deja incubar por 5 días a  $20 \pm 1$  °C en ausencia de luz.
- Pasado estos días se procede a tomar una nueva medición del OD de la botella.
- Se calcula el valor de  $DBO_5$  como la diferencia del OD entre el valor inicial y el valor al transcurrir 5 días.

# CAPÍTULO 3

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Selección del emplazamiento

El lugar donde se ubicó la planta piloto fue definido por la JAAPMAN dentro del terreno de las lagunas de oxidación, de esta manera se redujeron los costos de bombeo y se pudo determinar la calidad del suelo de la zona, para conocer si es apto o no para este tipo de sistemas.



**Figura 3.1: Ubicación de la planta piloto. Imagen tomada de Google Earth**

#### 3.1.1 Características del Suelo

Tanto en la Evaluación de Impacto Ambiental expost de las lagunas de oxidación, como en distintas publicaciones se encontró que los niveles edafológicos presentes en el área de Manglaralto consisten en suelos tipo vertisoles, es decir, terrenos poco desarrollados cuyos minerales predominantes son las arcillas esmectíticas (Calvache, 2015).

Presentan colores oscuros, junto con importantes procesos de contracción-expansión (Garrido & Murillo, 2016).

Las fases minerales que pertenecen al grupo de las esmectitas son, por ejemplo, la montmorillonita, hectorita, rectorita, entre otras (WEB MINERAL, 2018).

Mediante un análisis granulométrico se determinó que el suelo en esta zona es arcilloso, con un tamaño de grano de  $400\mu\text{m}$ . Con un equipo de campo

se registró un valor de pH de 6,75 y la conductividad tomó un valor de 3,65 mΩ/cm.

Según los parámetros mencionados en el “*Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*” (CONAGUA, 2015), este terreno presenta condiciones óptimas para la implementación de filtros verdes.

Además, según este mismo manual, los suelos arcillosos presentan una filtración lenta y efectiva para estos sistemas (CONAGUA, 2015).

### 3.2 Determinación de la carga hidráulica de diseño Lw

Como se describió en el capítulo anterior, la carga hidráulica de diseño se elige como el menor valor calculado entre la carga hidráulica basada en el requerimiento de agua de cultivo, en la asimilación hidráulica del sistema-planta y en la capacidad asimilativa de los constituyentes.

Con el fin de realizar un estudio mensual de las precipitaciones en la zona, se tomaron datos de la estación meteorológica de ubicada en La Libertad, provincia de Santa Elena, puesto que es la más cercana a la zona de estudio.

**Tabla 3.1: Precipitaciones registradas en la estación meteorológica de la Libertad (INOCAR, 2017)**

<b>Mes</b>	<b>Precipitaciones (mm/mes)</b>
Enero	65,6
Febrero	344,9
Marzo	211,5
Abril	23,7
Mayo	3,6
Junio	1,6
Julio	1,5
Agosto	0,6

Septiembre	0,2
Octubre	2,4
Noviembre	0,3
Diciembre	0
Anual	655,9

Los datos de evapotranspiración potencial se tomaron del proyecto “Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1:25.000”. (SENPLADES, 2011), realizado por SENPLADES. Se tomó como referencia la estación meteorológica de Salinas, por ser la más cercana a la zona de trabajo.

**Tabla 3.2: Evapotranspiración potencial calculada mediante la fórmula de Thornthwaite, para la estación meteorológica de Salinas (SENPLADES, 2011)**

<b>Mes</b>	<b>Evapotranspiración (mm/mes)</b>
Enero	120,73
Febrero	119,46
Marzo	134,45
Abril	120
Mayo	105,39
Junio	89,19
Julio	78,53
Agosto	71,87
Septiembre	71,3

Octubre	81,11
Noviembre	85,74
Diciembre	104,18
Anual	1181,95

Con estos datos de las tablas 3.1 y 3.2 se puede calcular la carga hidráulica para el requerimiento de agua de cultivo. En la tabla 3.3 se recogen los valores de Evapotranspiración (ET), precipitaciones (Pr) y R (agua neta requerida por la vegetación).

**Tabla 3.3: Requerimiento hídrico del cultivo**

<b>Mes</b>	<b>ET (mm/mes)</b>	<b>Pr (mm/mes)</b>	<b>R= (ET-Pr) (1+0,25) (mm/mes)</b>	<b>Lw (l)=R/Ea (mm/mes)</b>
Enero	120,73	65,6	68,91	81,073
Febrero	119,46	344,9	-281,8	-331,52
Marzo	134,45	211,5	-96,31	-113,30
Abril	120,00	23,7	120,37	141,61
Mayo	105,39	3,6	127,23	149,69
Junio	89,19	1,6	109,48	128,80
Julio	78,53	1,5	96,28	113,27
Agosto	71,87	0,6	89,08	104,80
Septiembre	71,30	0,2	88,87	104,55
Octubre	81,11	2,4	98,38	115,75

Noviembre	85,74	0,3	106,80	125,64
Diciembre	104,18	0	130,22	153,20
Anual				773,60

La carga hidráulica anual basada en el requerimiento del cultivo es de 773,60 mm/año.

Para la asimilación hidráulica del sistema suelo planta se requiere el valor de la permeabilidad del suelo ( $P_w$ ). En este caso se trata de un suelo arcillosos que tiene una permeabilidad de 0,05 cm/h o 360 mm/mes (FAO, 2006).

La permeabilidad del suelo óptima para estos sistemas se encuentra entre 5 y 50 mm/h (CONAGUA, 2015). Como se puede observar, el valor correspondiente para este suelo es menor al recomendado.

**Tabla 3.4: Capacidad de asimilación mensual del sistema**

Mes	ET (mm/mes)	Pr (mm/mes)	$P_w$ (mm/mes)	$L_w(P)= ET-Pr+P_w$ (mm/mes)
Enero	120,73	65,6	360	415,13
Febrero	119,46	344,9	360	134,56
Marzo	134,45	211,5	360	282,95
Abril	120,00	23,7	360	456,30
Mayo	105,39	3,60	360	461,79
Junio	89,19	1,60	360	447,59
Julio	78,53	1,50	360	437,03
Agosto	71,87	0,60	360	431,27
Septiembre	71,30	0,20	360	431,10

Octubre	81,11	2,4	360	438,71
Noviembre	85,74	0,3	360	445,44
Diciembre	104,18	0	360	464,18
Anual				4846,05

La carga hidráulica basada en la capacidad de asimilación del sistema tiene un valor de 4846,05 mm/año.

La capacidad asimilativa de los constituyentes se puede definir como la concentración admisible de agua percolada, esta puede tomar valores de 8 mg/L, con una asimilación de nitrógeno de 375 kg/ha año para obtener una concentración total de nitrógeno de 20 mg/L (CONAGUA, 2015).

$$Lw(n) = \frac{8 \frac{mg}{L} \left( 655,9 \frac{mm}{año} - 1181,95 \frac{mm}{año} \right) + 375 \frac{kg}{ha año} \left( 100 \frac{ha mg m^3 mm}{kg m^2 L m} \right)}{(1 - 0,25) 20 \frac{mg}{L} - 8 \frac{mg}{L}}$$

$$Lw(n) = \frac{8 \frac{mg}{L} \left( -526,95 \frac{mm}{año} \right) + 37500 \frac{mg mm}{L año}}{7 \frac{mg}{L}} = \frac{33284,4 \frac{mg mm}{L año}}{7 \frac{mg}{L}}$$

$$Lw(n) = 4754,91 \frac{mm}{año}$$

En la tabla 3,5 se resumen los valores de las cargas hidráulicas calculadas anteriormente.

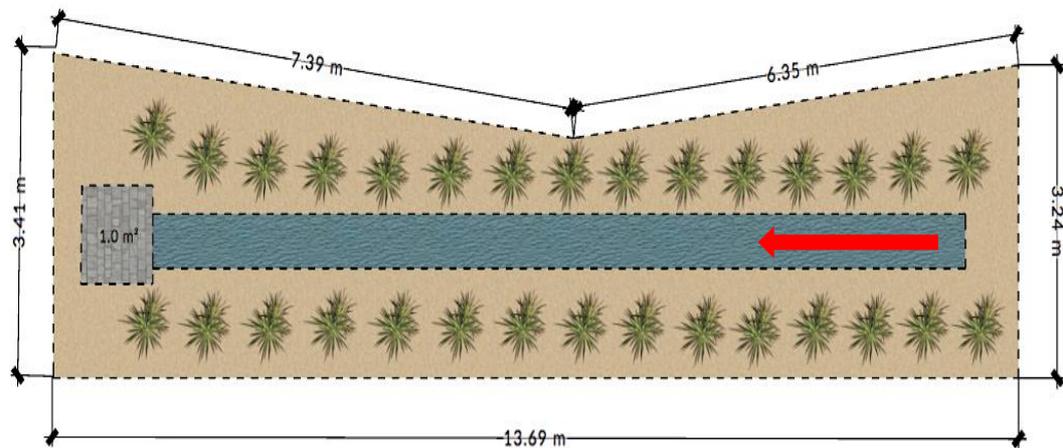
**Tabla 3.5: Cargas hidráulicas calculadas**

<b>Lw(I)</b>	773,60 mm/año
<b>Lw(P)</b>	4846,05 mm/año
<b>Lw(n)</b>	4745,91 mm/año

En este caso el valor menor corresponde a la carga hidráulica basada en requerimiento de agua del cultivo, con un valor de 773,60 mm/año.

### 3.3 Superficie necesaria

Como se explicó anteriormente, el lugar donde se realizó la construcción de la planta piloto fue asignado por la JAAPMAN. Con el área concedida y según el espacio que requiere la caña guadua para su crecimiento se determinó que la mejor configuración es la presentada en la figura 3.2. La flecha roja representa el recorrido del agua de residual, donde al final del surco se construyó un lisímetro para la toma de muestras.



**Figura 3.2: Esquema de la planta piloto de filtros verdes**

El área que se representa en la figura 3.2 corresponde a 39,88 m<sup>2</sup> o 0,3988 ha. Con esa área se puede calcular el caudal medio diario que la planta piloto podría tratar, mediante la ecuación (2,8):

$$Aw = \frac{Q \times C}{12000 \text{ g/ha}}$$

Para el uso de esta ecuación se requirió de una concentración media de DBO<sub>5</sub> del agua residual, la cual tomó un valor de 109,51 mg/L.

$$0,3988 \text{ ha} = \frac{Q \times 109,51 \text{ mg/L}}{12000 \text{ g/ha}}$$

$$Q = 4,39 \text{ m}^3/\text{día}$$

Conociendo que el caudal de aforo de las lagunas de oxidación es de 453,6 m<sup>3</sup>/día (GAD Santa Elena, 2013), se determinó que el área necesaria para tratar el caudal diario que ingresa a las lagunas de oxidación es de 41,39 ha.

**Tabla 3.6: Tabla resumen de los valores calculados**

<b>Carga hidráulica de diseño</b>	773,60 mm/año
<b>Superficie necesaria</b>	39,88 m <sup>2</sup>
<b>Caudal medio tratado</b>	4,39 m <sup>3</sup> /día

### **3.4 Análisis de muestras**

Gracias a colocación del lisímetro al final del surco, se tomaron muestras periódicas del agua filtrada a 30, 60 y 90 centímetros de profundidad.

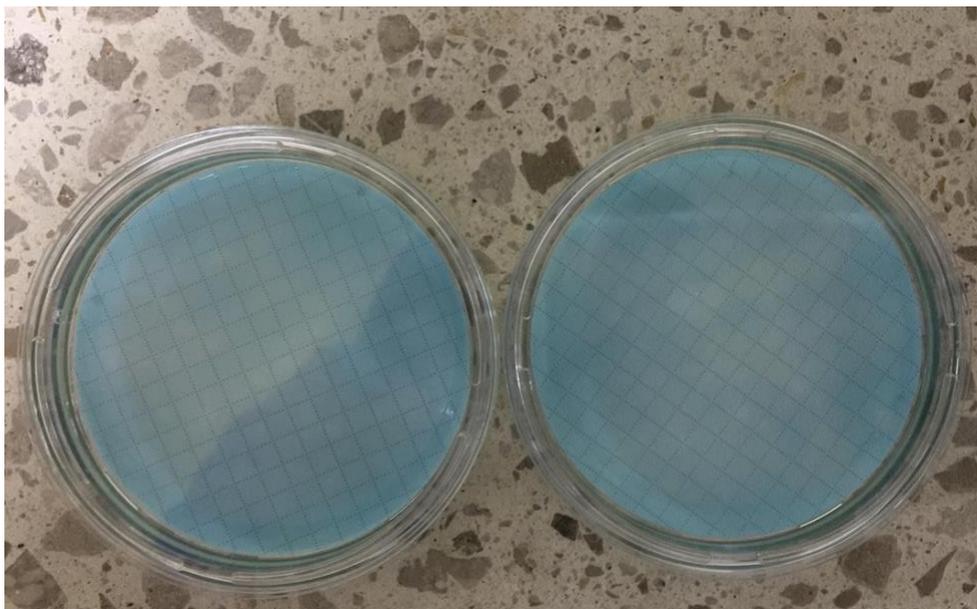
Para el análisis de coliformes totales se tomaron 120 mL de agua filtrada en recipientes estériles, mientras que para el análisis de DBO<sub>5</sub> se tomaron alrededor de 500 mL por muestra en botellas ámbar.

Como lo indica el “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” las muestras se transportaron en hieleras a una temperatura de 4°C hasta el Laboratorio de Aguas de la Escuela Superior Politécnica del Litoral donde se analizaron las mismas.

#### **3.4.1 Coliformes totales**

Para evitar el aumento o la disminución del número de microorganismos en la muestra, el análisis de coliformes totales se realizó el mismo día que se tomaron las muestras.

Para comprobar que no existen interferencias en el medio, se realizaron dos blancos con agua estéril, en cada prueba.



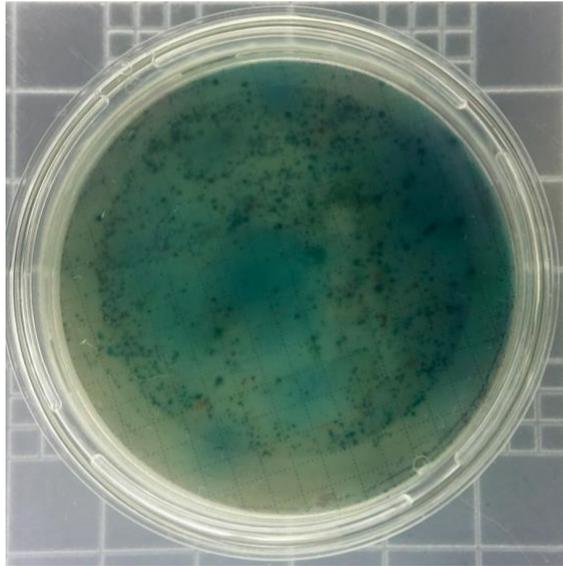
**Figura 3.3: Blancos realizados para el control de interferencias**

Debido a las altas concentraciones de coliformes en las muestras fue necesario realizar diluciones hasta  $10^{-2}$  de manera que el número de unidades formadoras de colonias sea menor a 300; por lo tanto, se pueden contar visualmente con la ayuda del Colony Counter. En la tabla 3.7 se presentan las diluciones utilizadas.

**Tabla 3.7: Tablas de diluciones.**

<b>Diluciones para microbiología</b>		
Cantidad de muestra	Cantidad de agua	Dilución
1 mL	9 mL	$10^{-1}$
1 mL $10^{-1}$	9 mL	$10^{-2}$

En la figura 3.4 se pueden apreciar el gran número de colonias presentes en una dilución  $10^{-1}$ .



**Figura 3.4: Caja Petri con M60, dilución  $10^{-1}$**

El efluente de las lagunas de oxidación tienen un número de 2890 ufc/100ml.

La nomenclatura utilizada para las muestras se detalla a continuación:

- M30 representa la muestra tomada con la tubería del lisímetro ubicada a 30 cm de profundidad.
- M60 representa la muestra tomada con la tubería del lisímetro ubicada a 60 cm de profundidad.
- M90 representa la muestra tomada con la tubería del lisímetro ubicada a 90 cm de profundidad.

Los datos registrados en las diluciones  $10^{-2}$  se presentan en las siguientes tablas:

**Tabla 3.8: Valores de coliformes totales registrados en la semana 1**

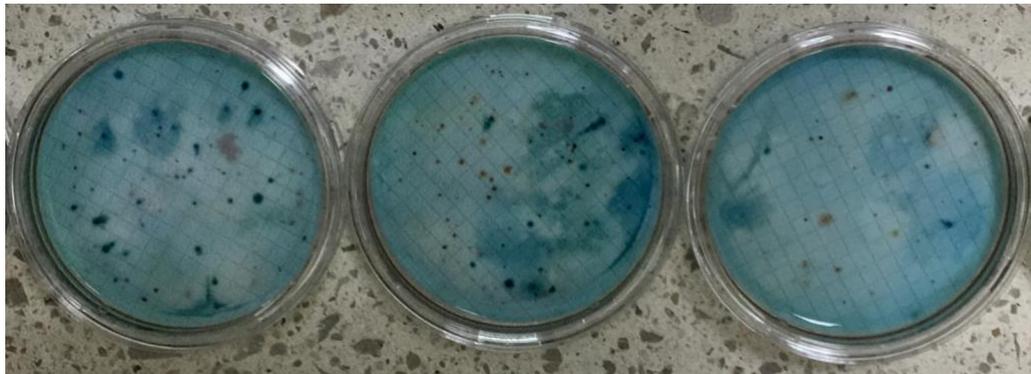
<b>Semana 1</b>		
<b>Muestra</b>	<b>Dilución</b>	<b>Coliformes (UFC/100 mL)</b>
M30	$10^{-2}$	2350
M60	$10^{-2}$	1960
M90	$10^{-2}$	850

**Tabla 3.9: Valores de coliformes totales registrados en la semana 2**

<b>Semana 2</b>		
<b>Muestra</b>	<b>Dilución</b>	<b>Coliformes (UFC/100 mL)</b>
M30	$10^{-2}$	2100
M60	$10^{-2}$	1780
M90	$10^{-2}$	630

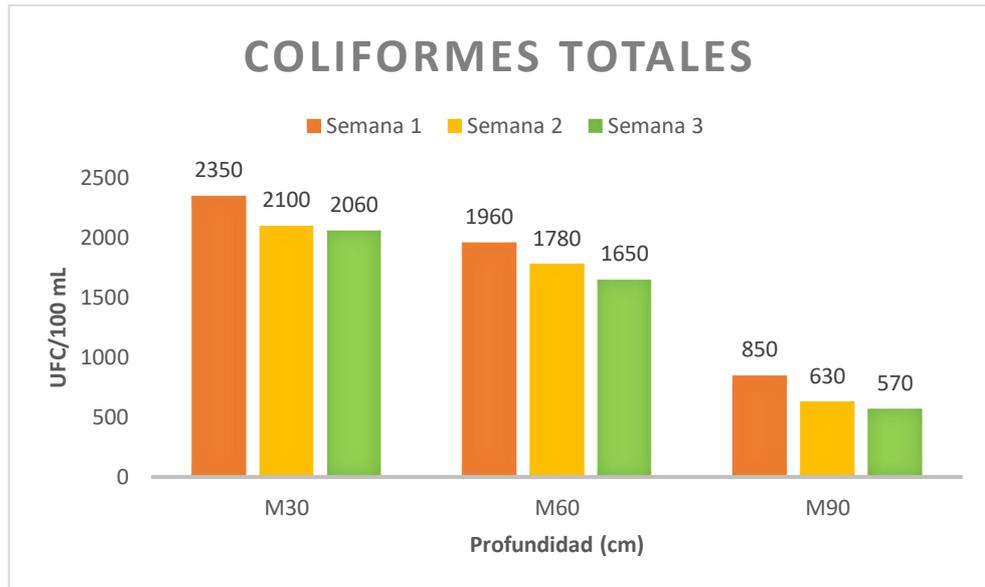
**Tabla 3.10: Valores de coliformes totales registrados en la semana 3**

<b>Semana 3</b>		
<b>Muestra</b>	<b>Dilución</b>	<b>Coliformes (UFC/100 mL)</b>
M30	$10^{-2}$	2060
M60	$10^{-2}$	1650
M90	$10^{-2}$	570



**Figura 3.5: De izquierda a derecha diluciones  $10^{-2}$  de M30, M60 y M90**

Para una mejor visualización de los datos, se realizaron las siguientes gráficas:



**Figura 3.6: Coliformes totales a distintas profundidades en las 3 semanas de estudio**

En la figura 3.6 se puede observar como el número de unidades formadoras de colonias disminuye con el tiempo y con la profundidad, siendo los datos de la tercera semana los de menor valor registrado para todas las profundidades.

Para realizar una gráfica del porcentaje de remoción, se realizó un ensayo para determinar las unidades formadoras de colonia del agua de las lagunas, a su vez se envió una muestra al Laboratorio PROTAL para comparar los valores. El informe reportado por PROTAL se incluye en los anexos.

**Tabla 3.11: Concentración de coliformes totales realizadas en el laboratorio de aguas y en PROTAL.**

Lagunas de Oxidación	
Ensayo realizado por el autor	2890 UFC/100 mL
Ensayo realizado en PROTAL	2400 NMP/100 mL

De acuerdo con el “*Estudio de Impacto Ambiental expost del proyecto complementario del sistema de alcantarillado sanitario para la comuna Montañita, cantón Santa Elena, Provincia de Santa Elena*” (GAD Santa

Elena, 2013). se expone que el efluente de las lagunas de oxidación debería tener una concentración de 270 NMP/100 mL de coliformes (GAD Santa Elena, 2013). Existe una diferencia del 88,75% entre el valor calculado en el informe del GAD y el valor calculado en este trabajo. Por tanto, se comprueba que la descarga de las lagunas de oxidación no cumple a cabalidad con la disminución de los patógenos del agua residual, generando de esta manera una grave contaminación al río Grande. (GAD Santa Elena, 2013)

Para poder relacionar los valores de la tabla 3.10 es necesario mantener las mismas unidades, para ello se tomarán los modelos de regresión estudiados por Cho et. al en 2010. (3,1)

$$\ln NMP_{estimado} = \ln a + b \times \ln UFC_{estimado}$$

Las constantes a y b se encuentran en la tabla 3.12:

**Tabla 3.12: Coeficientes para modelo de regresión que permite convertir concentraciones de UFC a NMP (Cho et al., 2010). Modificado por el autor**

		Primavera	Verano	Otoño	Invierno
<b>Coliformes</b>	ln a	1,27	-0,51	-1,23	2,09
	(std. error)	0,18	0,33	0,47	0,31
	b	0,80	1,04	1,36	0,36
	(std. error)	0,04	0,05	0,09	0,07

En este caso se tomaron los coeficientes propuestos para verano, debido a que las temperaturas se asemejan más a las de nuestra zona de trabajo.

Convirtiendo el valor obtenido en el laboratorio de aguas a NMP:

$$\ln NMP_{estimado} = -0,51 + 1.04 \times \ln 2890 = 7,777$$

$$NMP_{estimado} = 2386,95$$

El error relativo entre el valor reportado por PROTAL y la estimación realizada para convertir CFU/100 mL en NMP/100 mL es de 0,054% por lo

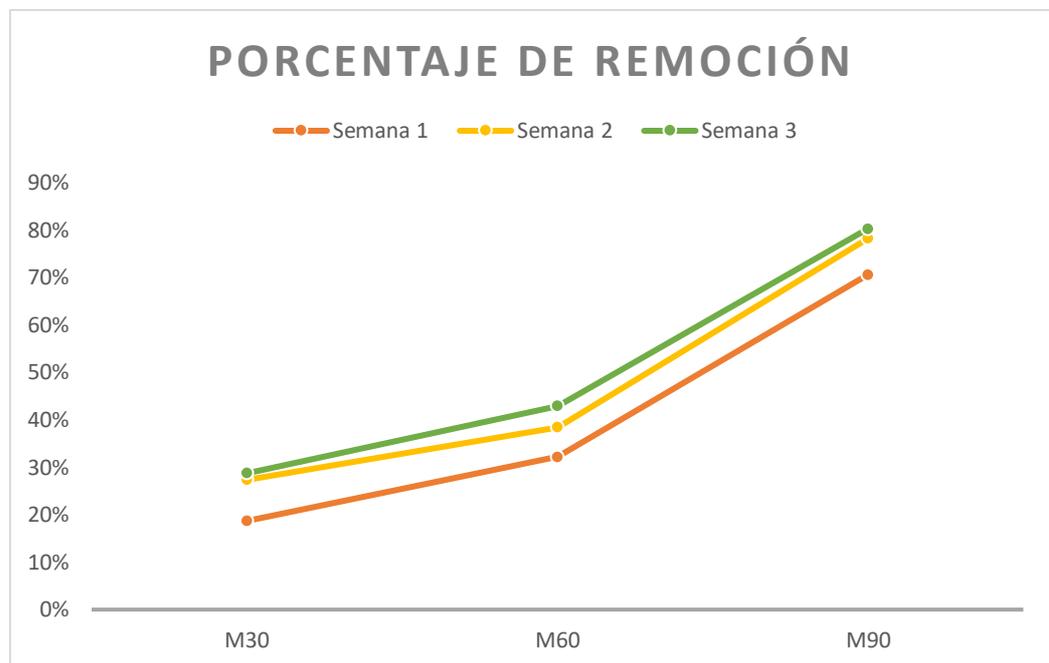
tanto se considera válido el uso de la regresión de Cho et al. para este caso de estudio.

El porcentaje de remoción por profundidad y por semana se representa en la tabla 3.12, calculados en base al valor de 2890 UFC/100 mL.

**Tabla 3.13: Porcentaje de remoción de coliformes totales calculados con las muestras M30, M60 y M90 en las tres semanas de estudio**

	Semana 1	Semana 2	Semana 3
M30	19%	27%	29%
M60	32%	38%	43%
M90	71%	78%	80%

Para mejor comprensión de la tabla 3.13 se realizó el siguiente gráfico:



**Figura 3.7: Porcentaje de remoción de coliformes totales para cada punto de estudio en el transcurso de tres semanas**

En la figura 3.7 se puede apreciar como el porcentaje aumenta de la semana 1 a la semana 3, además a mayor profundidad mayor es el

porcentaje de remoción. Teniendo un mayor porcentaje de remoción a los 90 cm de la tercera semana, correspondiente al 80%.

### 3.4.2 DBO<sub>5</sub>

Este análisis se realizó al siguiente día de la toma de muestras, cuidando siempre que no se superen las 24 horas, tal como se especifica en el “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”.

Corroborando que todos los controles cumplan con los estándares, se obtuvieron los siguientes valores:

**Tabla 3.14: Valores de DBO<sub>5</sub> registrados la primera semana**

<b>Semana 1</b>	
<b>Muestra</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/L)</b>
M30	106,91
M60	101,51
M90	96,41

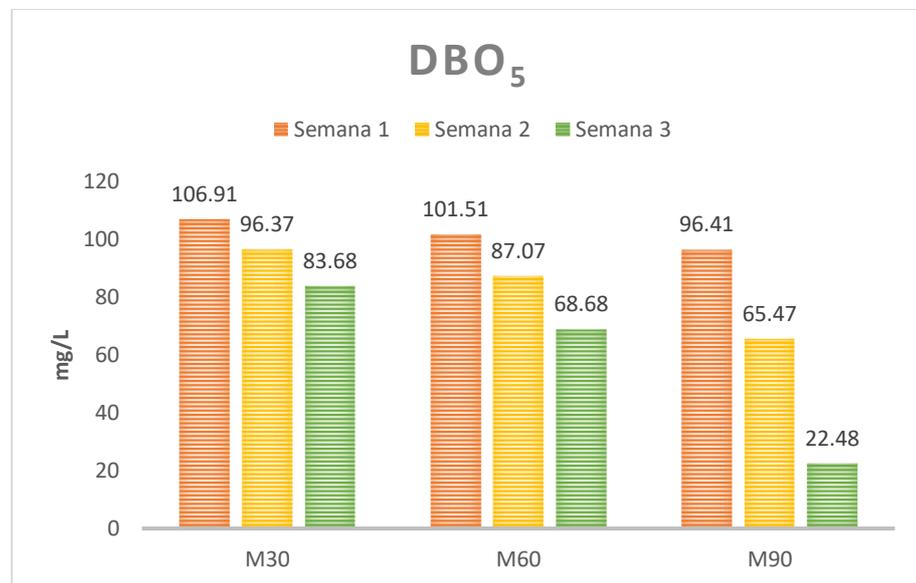
**Tabla 3.15: Valores de DBO<sub>5</sub> registrados la segunda semana**

<b>Semana 2</b>	
<b>Muestra</b>	<b>DBO<sub>5</sub> (mg/L)</b>
M30	96,37
M60	87,07
M90	65,47

**Tabla 3.16: Valores de DBO<sub>5</sub> registrados la tercera semana**

Semana 3	
Muestra	DBO <sub>5</sub> (mg/L)
M30	83,68
M60	68,68
M90	22,48

Para visualizar mejor los datos se realizó la siguiente gráfica:



**Figura 3.8: DBO<sub>5</sub> a distintas profundidades durante las 3 semanas de estudio**

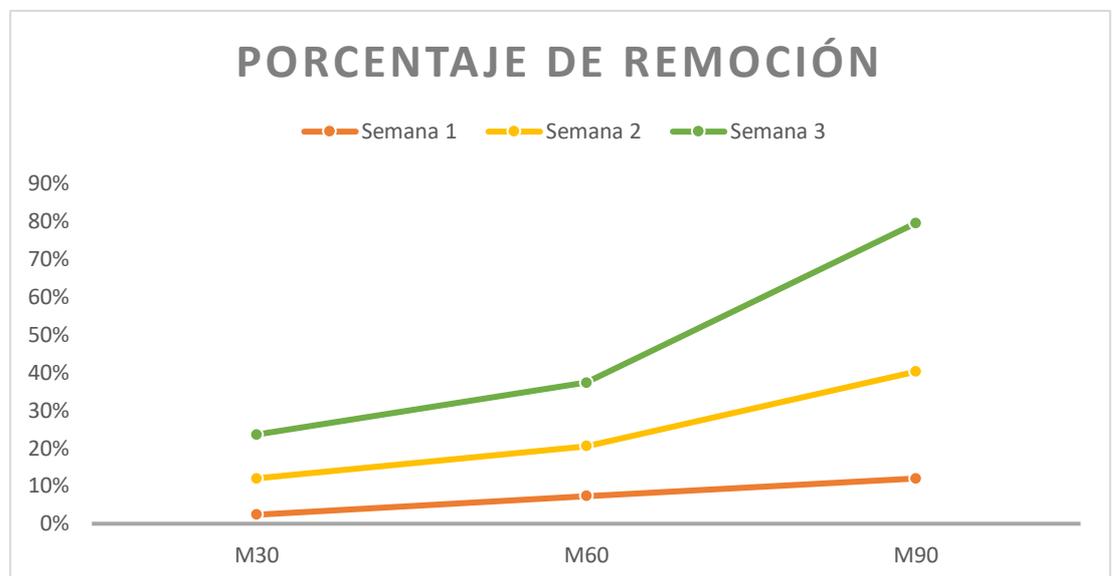
La disminución de DBO<sub>5</sub> sigue la misma tendencia que para coliformes totales. Se aprecia la disminución de contaminantes entre la primera y la tercera semana, de igual manera con respecto a la profundidad, a mayor profundidad menor es el valor de DBO<sub>5</sub>, siendo el más bajo 22,48 mg/L para la muestra tomada a 90 cm de profundidad la tercera semana.

Para determinar el porcentaje de remoción se usará el valor antes calculado de DBO<sub>5</sub> para el agua de las lagunas de oxidación, que se utilizó en el calculo de la superficie necesaria, el cual corresponde a 109,51 mg/L. Los valores de detallan en la tabla 3.16.

**Tabla 3.17: Porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> calculados con las muestras M30, M60 y M90 en las tres semanas de estudio**

	Semana 1	Semana 2	Semana 3
M30	2%	12%	24%
M60	7%	20%	37%
M90	12%	40%	79%

De igual manera se realizó la grafica de la figura 3.9 que permite interpretar mejor los datos:



**Figura 3.9 Porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> para cada punto de estudio en el transcurso de tres semanas**

Se puede apreciar que el porcentaje de remoción es significativo, llegando hasta valores de 79% a 90 cm de profundidad en la tercera semana. También se puede apreciar que existe un aumento en la remoción desde la primera semana hasta la tercera semana.

En los dos análisis se obtuvieron porcentajes de remoción altos, un 80% en coliformes totales y 79% en DBO<sub>5</sub>, estos valores se encuentran dentro de los encontrados en la bibliografía. En la publicación “*Filtros verdes. Un sistema de depuración ecológico*” se expone que estos sistemas pueden alcanzar rendimientos de depuración de hasta el 98% (Álvarez, 2002); en el “*Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*” se comenta que los filtros

verdes pueden remover hasta el 85% de la materia orgánica presente en el agua residual (CONAGUA, 2015).

Con respecto a la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua, el límite permitido de coliformes totales para la calidad de aguas para uso agrícola en riego es de 1000 NMP/100 mL (Ministerio del Ambiente, 2014) y el límite permisible para descarga en un cuerpo de agua dulce es 10000 NMP/100mL de coliformes fecales. Con un porcentaje de remoción del 80% la planta piloto de filtros verdes logró disminuir la cantidad de coliformes totales hasta 441,18 NMP/100 mL, valor calculado con la regresión de Cho et al.

En esta misma Norma, dentro de los límites de descargar a un cuerpo de agua dulce se definen límites de 100 mg/L de DBO<sub>5</sub> (Ministerio del Ambiente, 2014), con un 79% de remoción el sistema estudiado disminuyó la cantidad de DBO<sub>5</sub> hasta 22,48 mg/L.

El agua residual tratada con esta planta piloto de filtros verdes cumple con la Normativa.

### **3.5 Estudio organoléptico de las plantas de caña**

Después de tres semanas del trasplante, las plantas de caña han generado brotes nuevos. Las hojas presentan buen color y la textura no de los brotes no muestra alteraciones. La altura de estas ha aumentado alrededor de 10 cm.

# CAPÍTULO 4

## 4 Discusión y Conclusiones

### 4.1 Conclusiones

A partir de los anteriormente expuesto, se concluye lo siguiente:

- Es factible la reducción de contaminantes, tales como coliformes totales y materia orgánica del efluente de las lagunas de oxidación de Montañita, mediante la metodología de depuración por filtros verdes.
- Con este sistema de filtros verdes se contribuyó a la reutilización del agua residual, de manera que podría ser utilizada para la reforestación de esta zona árida, con escaso acceso al agua dulce.
- El suelo arcilloso, donde se construyó la planta piloto de filtros verdes, cuenta con las características necesarias que permiten una filtración lenta y efectiva para la remoción de contaminantes.
- Los valores registrados para coliformes totales, a los 90 cm de profundidad, en la tercera semana representaron un porcentaje de remoción del 80%, aunque no se llegó a la meta planteada en la hipótesis, el valor registrado cumple con los límites de la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de efluentes: Recurso Agua, tanto para su uso en riego, como para la descarga en cuerpos de agua dulce.
- El porcentaje de remoción de materia orgánica, estudiado a través del  $DBO_5$ , presentó valores de hasta 79%, los cuales concuerdan con la bibliografía consultada y cumple con el límite de la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de efluentes: Recurso Agua, para la descarga en cuerpos de agua dulce.

- Mediante cálculos se determinó que, para tratar la totalidad del caudal diario que ingresa a las lagunas de oxidación se requieren 41,39 hectáreas de suelo para la construcción de un sistema de filtros verdes.
- La caña guadua es una especie endémica del país que, hasta el momento, ha presentado una buena respuesta al riego mediante filtros verdes, aumentando su tamaño y generando nuevos brotes. Es decir, que este sistema contribuiría a la reforestación de la zona donde se está aplicando.

## **4.2 Recomendaciones**

- Se recomienda, implementar este proyecto a escala regional, de manera que se pueda depurar toda el agua que actualmente ingresa a las lagunas de oxidación y contribuir a la reforestación de esta zona.
- Se recomienda, hacer más estudios en el mismo sector y en zonas aledañas, que permitan determinar si el agua residual tratada mediante el sistema de filtros verdes tendría la calidad necesaria para recargar acuíferos.
- Se recomienda realizar análisis periódicamente a los suelos, para determinar la concentración de organismos patógenos que puedan generarse tanto lateralmente como en profundidad, de manera que se pueda determinar la eficiencia temporal del sistema de filtros verdes.
- Se recomienda, valorar la cantidad de nitrógeno presente en las aguas residuales que se usan para el sistema de filtros verdes y determinar el impacto que podría tener su aplicación en el suelo.

# BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, F. (2002). Filtros verdes . Un sistema de depuración ecológico. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXIII(1), 25–29.
- Barquilla, P. M., Olivares, J., & Moreno, L. (2016). Tratamiento no convencional de las aguas residuales urbanas de Tucaní, Venezuela.
- Borbor, A., & Vera, J. (2014). *Estudio para la optimización de la distribución de agua para consumo humano, por parte de la Junta Regional de Manglaralto, Santa Elena, Ecuador.*
- Braatz, S., & Kandiah, A. (2004). Utilización de aguas residuales urbanas para el riego de árboles y bosques. *Unasyuva*, 1(185), 11–22.
- Calvache, A. (2015). Los suelos del Ecuador, (Agosto).
- Cho, K. H., Han, D., Park, Y., Lee, S. W., Cha, S. M., Kang, J. H., & Kim, J. H. (2010). Evaluation of the relationship between two different methods for enumeration fecal indicator bacteria: Colony-forming unit and most probable number. *Journal of Environmental Sciences*, 22(6), 846–850. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60187-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60187-X)
- Colegio de Ingenieros Agrónomos de Chile. (2013). Riego por Pulsos Aumenta la Eficiencia del Riego hasta un 85 por ciento. Retrieved July 27, 2018, from <http://www.ingenierosagronomos.cl/archivos/2928>
- CONAGUA. (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Lagunas Aireadas.* Retrieved from <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>
- El Mercurio. (2013). Riego por pulsos, una alternativa para aumentar los rendimientos del maíz. Retrieved July 27, 2018, from <http://www.elmercurio.com/Campo/Noticias/Noticias/2013/06/11/Riego-por-pulsos-una-alternativa-para-aumentar-los-rendimientos-del-maiz.aspx>
- FAO. (2006). 9. PERMEABILIDAD DEL SUELO. Retrieved July 27, 2018, from [http://www.fao.org/fishery/static/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s09.htm](http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm)

- FECD. (2009). La gente de la caña guadua.
- GAD Santa Elena. (2013). *Estudio De Impacto Ambiental Expost Del Proyecto Comuna Montañita Cantón Santa Elena , Provincia De Santa Elena.*
- GAD Santa Elena. (2015). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la parroquia rural Manglaralto, 2014 - 2019.*
- Garrido, E., & Murillo, B. (2016). *Análisis de la prefactibilidad de una presa como solución para el abastecimiento de agua en la parroquia Manglaralto.*
- HACH. (2018). Ampollas de caldo m-Colibblue24. Retrieved from <https://es.hach.com/product.detail-print.version.jsa?id=24761066892>
- Huayamave, J. (2013). *Estudio de las aguas y sedimento del Río Daule, en la Provincia del Guayas, desde el punto de vista físico químico, orgánico, bacteriológico y toxicológico.*
- iAGUA. (2016). El poco éxito de los filtros verdes en España está motivado por su mala gestión. Retrieved May 30, 2018, from <https://www.iagua.es/noticias/espana/instituto-imdea-agua/16/05/25/poco-exito-filtros-verdes-espana-esta-motivado-mala>
- INEC. (2010). Censo 2010. *Inec.*
- INOCAR. (2017). Instituto Oceanográfico de la Armada - Precipitación por estación. Retrieved July 27, 2018, from <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/precipitacion-por-estacion>
- Las Ceibas. (2017). *DETERMINACIONES DE METODOS MICROBIOLÓGICOS.* Retrieved from [http://www.lasceibas.gov.co/sites/default/files/documentacion/lb-pr-08\\_determinaciones\\_de\\_metodos\\_microbiologicos.pdf](http://www.lasceibas.gov.co/sites/default/files/documentacion/lb-pr-08_determinaciones_de_metodos_microbiologicos.pdf)
- Metcalf, E. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. McGraw-Hill.* <https://doi.org/10.1036/0070418780>
- Ministerio del Ambiente. (2014). Norma De Calidad Ambiental Y De Descarga De Efluentes Al Recurso Agua. *Norma De Calidad Ambiental Y De Descarga De Efluentes : Recurso Agua, 1–37.*
- Ministerio del Ambiente. (2017). Código Orgánico del Ambiente. *Lexis, 1–92.* Retrieved from <http://www.ambiente.gob.ec/wp->

content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO\_ORGANICO\_AMBIENTE.pdf

Montoya, V., & Rosado, A. (2015). DBO protocolo.

Noboa, M. E. (2010). *Comparación del efecto de riego con aguas residuales provenientes de las lagunas de oxidación de Santa Elena, sobre 4 especies forestales en etapa vivero.*

Pérez, A. (2009). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades (pp. 46–65). Retrieved from <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/19117/capitulo4.pdf>

Ramos, D. S. (2016). *Calidad del agua en ríos.* Retrieved from [http://blog.uclm.es/davidsanchezramos/files/2016/05/12\\_Calidad-agua-ríos\\_v2015\\_resumen.pdf](http://blog.uclm.es/davidsanchezramos/files/2016/05/12_Calidad-agua-ríos_v2015_resumen.pdf)

Reynolds, K. (2002). Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica Identificación del Problema.

Rivadeneria, G., & Peralta, J. (2009). Derechos colectivos en la gestión del agua en el Ecuador.

SENPLADES. (2011). *GENERACION DE GEOINFORMACION PARA LA GESTION DEL TERRITORIO A NIVEL NACIONAL ESCALA 1:25.000.*

Universidad de Salamanca. (2015). Coliformes Totales: Filtración a través de membrana. Retrieved August 15, 2018, from [http://coli.usal.es/Web/demo\\_fundacua/demo2/FiltraMembColiT\\_auto.html](http://coli.usal.es/Web/demo_fundacua/demo2/FiltraMembColiT_auto.html)

We are water. (2017). Aguas negras, el rastro de nuestra historia. Retrieved August 12, 2018, from [https://www.wearewater.org/es/aguas-negras-el-rastro-de-nuestra-historia\\_281141](https://www.wearewater.org/es/aguas-negras-el-rastro-de-nuestra-historia_281141)

WEB MINERAL. (2018). Montmorillonite Mineral Data. Retrieved August 8, 2018, from <http://webmineral.com/data/Montmorillonite.shtml#.W2sKfS1DIAY>

# **ANEXOS**

## Datos del cliente

Nombre: MARCATOMA BRITO LESLIE ARACELLY	Teléfono: 0996518492
Dirección: CDLA. KENNEDY NUEVA DR. ANTONIO MALDONADO Y AV. OLIMPO	

## Identificación de la muestra / etiqueta

Nombre: AGUA RESIDUAL	Código muestra: 18-06/0012-M001
Marca comercial: S/M	Lote: N/A
Referencia: Aguas	Fecha elaboración: 02/06/2018
Envase: RECIPIENTE ESTÉRIL	Fecha extracción: N/A
Conservación de la muestra: Refrigeración 0°C - 4 °C	Fecha recepción: 04/06/2018
Fecha análisis: 04/06/2018	Vida útil: N/A
Contenido neto declarado: 100 ml	
Contenido neto encontrado: N/A	
Presentaciones: N/A	
Condiciones climáticas del ensayo: Temperatura 22.5 °C ± 2.5 °C Y Humedad Relativa 55% ± 15%	

## Análisis Microbiológicos

Ensayos realizados	Unidad	Resultado	Requisitos	Métodos/Ref.
Coliformes Totales.	NMP/100mL.	2.4 x 10 <sup>3</sup>	---	API-5.8-04-01-00M22 (Standard Methods 22 th 9221 ABC)

Los resultados emitidos corresponden exclusivamente a la muestra proporcionada por el cliente.

Las opiniones / interpretaciones / etc. que se indican a continuación, están FUERA del alcance de acreditación del SAE.

**\* Observaciones:**

Se realizó el parametro microbiologico solicitado por el cliente.

Los datos microbiológicos se encuentran registrados en el cuaderno interno de trabajo de microbiología, en la página 18-02583.

Los ensayos marcados con (\*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.

^ Representa el Exponente

\* Subcontratado

En microbiología los valores expresados como < 1.8, < 2, < 3, y < 10 se estiman ausencia

Guayaquil, 8 de Junio del 2018.

Dra. Gloria Bajaña de Pacheco  
Directora General y Gerente Técnico

Ing. María Teresa Amador  
Gerente de Calidad